

01162

7



FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

***“TÉCNICAS DE REHABILITACIÓN
DE TUBERÍAS EN ACUEDUCTOS”***

TESIS

Que para obtener el grado de:

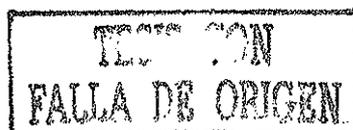
***MAESTRO EN INGENIERÍA
(HIDRÁULICA)***

PRESENTA:

Ascención Pérez Méndez

Director de tesis: Dr. Rafael B. Carmona P.

Abril de 2002





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

RESUMEN

En este trabajo se identifican varias fallas o defectos que pueden presentarse en las tuberías durante su vida útil, clasificándolas de acuerdo al impacto que generan en el funcionamiento normal de un acueducto. Se hace una recopilación de algunos procedimientos para identificar la presencia de defectos en tuberías, enfatizando la idea de evitar el daño estructural durante los trabajos de inspección (pruebas no destructivas).

Una vez identificados y clasificados los diferentes defectos existentes en la línea de conducción, y de acuerdo al tipo de material de la tubería, se analizan varios métodos de evaluación de daños. Esto permite valorar, a través de análisis cualitativos y cuantitativos, el grado de riesgo por la presencia de defectos en las tuberías.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la aplicación de los diferentes métodos de evaluación de defectos, y con el análisis del orden de prioridad en la que se deberán llevar a cabo los trabajos de reparación y rehabilitación de tuberías, se hace una revisión del estado del arte de ciertas técnicas de rehabilitación de tuberías en acueductos, oleoductos y gasoductos.

Se propone un diagrama de flujo que resume la forma más conveniente de llevar a cabo el mantenimiento y rehabilitación de los sistemas de tuberías, que en sí, es una herramienta de apoyo, tanto para la toma de decisiones, como para la obtención de bases de datos confiables del sistema de tuberías.

Finalmente, se recomienda la implantación de inspecciones periódicas a las líneas de conducción, a través del empleo de pruebas no destructivas, con el fin de supervisar el estado actual de las tuberías, para tomar decisiones oportunas sobre la rehabilitación de los sistemas.



Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi madre, a mis hermanos, a mi familia
que en todo momento me apoyaron y animaron en
el logro de esta nueva meta.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Agradecimientos

Mi agradecimiento al Dr. Rafael Carmona por sus enseñanzas y tutoría brindado en la realización del presente trabajo.

A Alejandro Sánchez, Libia Carmona y Eduardo Rodal por el apoyo que siempre me brindaron.

A los sinodales del examen de grado: Dr Gabriel Echávez Dr Oscar Fuentes, M.I. Victor Franco y Dr. Carlos Escalante

A mis amigos del Instituto de Ingeniería

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM por todo el apoyo recibido en la consecución de este trabajo final.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

INDICE GENERAL

Resumen -----	I
Dedicatoria -----	II
Agradecimientos -----	III
Introducción -----	1
1. Procedimientos para identificación de posibles daños y defectos en tuberías -----	3
1.1 Tipos de defectos presentes en tuberías -----	4
1.2 Pruebas no destructivas -----	8
1.2.1 Pigs inteligentes -----	8
1.2.2 Monitoreo acústico -----	12
1.2.3 Pruebas de impacto -----	15
1.2.4 Pruebas aplicables al recubrimiento exterior -----	16
1.2.5 Inspección visual -----	18
1.2.6 Métodos estadísticos -----	19
2. Métodos de evaluación de defectos -----	21
2.1 Prueba hidrostática -----	22
2.2 Método del área efectiva -----	28
2.2.1 Criterio <i>ASME B31G</i> -----	30
2.2.2 Criterio <i>RSTRENG</i> -----	31
2.3 Método prioriza -----	33
2.4 Análisis de la capacidad de conducción -----	40
2.5 Reglas de reemplazo de tuberías -----	43
3. Rehabilitación de tuberías -----	45
3.1 Métodos aplicables a defectos por corrosión exterior, fugas, roturas, rasgaduras, abolladuras y pandeo -----	46
3.1.1 Cuando existe fuga en la línea de conducción -----	46
- Cortar y reemplazar -----	46
- Envolvertes metálicas (mangas tipo <i>B</i>) -----	46
- Grapas mecánicas con pernos -----	47
3.1.2 Cuando no existe fuga en la línea de conducción -----	49
- Aportación de soldadura -----	49
- Envolvertes metálicas (mangas tipo <i>A</i>) -----	50
- Parche metálico -----	50
- Refuerzo mecánico de fibra de vidrio (<i>Clock Spring</i>) -----	51
- Envolvertes metálicas embebidas en resina epóxica (<i>EMERE</i>) -----	52
- Refuerzo del alambre pretensado en tubería de concreto -----	54

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

3.1.3 Protección catódica	55
- Sistema de ánodos galvánicos o de sacrificio	55
- Sistema de corriente impresa	57
3.1.4 Recubrimiento exterior	60
3.2 Métodos aplicables a problemas de incrustación y corrosión interior	61
3.2.1 Limpieza de tuberías	61
- Pigs de limpieza	62
- Tecnología de chorro a presión	66
- Dispositivos mecánicos con cuchillas	69
- Limpieza manual	70
3.2.2 Recubrimiento interior de tuberías	70
- Recubrimiento con mortero de cemento	70
- Recubrimiento con resina epóxica	71
- Recubrimiento con fibra de carbón	72
3.2.3 Inserción de tubería nueva dentro de otra existente	73
- Encamisados o mangas plásticas interiores	73
- Encamisados o mangas no plásticas interiores	75
3.3 Reemplazo de tuberías (tecnologías trenchless)	76
4. Programa de mantenimiento	78
5. Conclusiones y recomendaciones	82
Bibliografía	84
Anexo A	88

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

INTRODUCCION

Varios acueductos de México como: Chapala – Guadalajara, Río Colorado – Tijuana, Estación Manuel - González Tamaulipas, Papagayo – Acapulco, Linares – Monterrey, González Ortega II – Chetumal, entre otros, han presentado deterioro en sus líneas de conducción. La corrosión, el deterioro del recubrimiento, el pandeo, las fugas, las roturas, el aire atrapado y la presencia de adherencias e incrustaciones en la pared interior de tuberías son problemas muy comunes en las líneas de conducción.

La presencia de defectos en las líneas de conducción pueden reducir la resistencia de las tuberías por debajo de los niveles de seguridad estructural necesarios para dar confiabilidad a la operación; así mismo, las incrustaciones y el aire atrapado son dos causas que provocan la disminución en la capacidad de conducción del acueducto.

Adicionalmente, mantener operando una extensa red de tubos es una tarea complicada, ya que las decisiones técnicas de mantenimiento y rehabilitación se basan más en parámetros intuitivos que en un método científico. Aunado a esto, la disponibilidad de recursos para el mantenimiento, rehabilitación y validación de tuberías son limitados y pone en verdaderos aprietos a los responsables de su administración.

Para ayudar a establecer un mejor desempeño en la operación de los sistemas de conducción de agua, independientemente de los problemas particulares de cada sistema de abastecimiento de agua en México, es necesario realizar un estudio que permita identificar, revisar y adaptar a nuestro medio las técnicas y procedimientos de rehabilitación de tuberías disponibles en la actualidad en otros países.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar un criterio de decisión que permita identificar y evaluar la integridad estructural y funcional de las tuberías; así como proponer técnicas y procedimientos de rehabilitación adecuados para ser utilizados en México. Pretende ser una herramienta de apoyo para operadores y responsables del funcionamiento de los acueductos que permita establecer un estándar de la forma en que se evalúan las tuberías, así como para obtener bases de datos confiables del sistema de tuberías con las cuales se podrán tomar decisiones y políticas globales en cuanto a mantenimiento y rehabilitación. Además, se podrá analizar el comportamiento de nuevos diseños y materiales. Este trabajo es una revisión del estado del arte en metodologías para evaluación de daños en tuberías, sin pretender el análisis profundo de ninguna de ellas.

En el capítulo 1, se realiza la identificación de los diferentes tipos de fallas o defectos que pueden presentarse en las tuberías durante su vida útil, clasificándolas de acuerdo al impacto que generan en el funcionamiento normal de un acueducto. Se hace una recopilación de los diferentes procedimientos que sirven para la identificación de defectos en tuberías, enfatizando la idea de evitar el daño estructural en la línea al realizar los trabajos de inspección a través del empleo de pruebas no destructivas. Se mencionan las ventajas y desventajas de cada método, así como su campo de aplicación.

Una vez identificados y clasificados los diferentes defectos existentes en la línea de conducción, y de acuerdo al tipo de material de la tubería, en el capítulo 2, se analizan varios métodos de evaluación de defectos. Esto permite valorar el grado de riesgo que representa la presencia del defecto en las tuberías, a través de análisis cualitativos y cuantitativos. De igual forma, se mencionan algunas reglas de reemplazo que han sido propuestas por diferentes autores y organismos operadores del agua.

En el capítulo 3, se revisa el estado del arte de las diferentes técnicas de rehabilitación de tuberías en acueductos, oleoductos y gasoductos. Cada técnica es clasificada de acuerdo al tipo de defecto para la cual puede ser empleada. Se revisan diferentes técnicas, desde las más usuales y comunes hasta las nuevas tecnologías.

En el capítulo 4, se propone un diagrama de flujo que resume la forma más conveniente de llevar a cabo el mantenimiento y rehabilitación de los sistemas de tuberías. Es un criterio de decisión que pretende ser una herramienta de apoyo para la toma de decisiones, así como para la obtención de bases de datos confiables del sistema de tuberías.

Finalmente, se recomienda la implantación de inspecciones periódicas a las líneas de conducción, con el fin de conocer en todo momento el estado estructural y funcional de las tuberías, y con ello llegar a tomar decisiones oportunas.

En el anexo A, se muestran las tablas correspondientes a presiones hidrostáticas de prueba correspondientes a un nivel del 90 % del esfuerzo mínimo de fluencia para tuberías de acero.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO 1. PROCEDIMIENTOS PARA IDENTIFICACION DE POSIBLES DAÑOS Y DEFECTOS EN TUBERIAS

Grandes acueductos de nuestro país han presentado deterioro en sus tuberías; diversos estudios realizados por instituciones e investigadores han encontrado como causas del envejecimiento y daño de los sistemas de conducción de agua a: las fugas, la agresividad del suelo, la presión en la tubería, la corrosión, el deterioro de recubrimientos, la inestabilidad del terreno, la sismicidad y daños por terceras personas. Por otro lado, los problemas de pérdida de carga y capacidad de conducción están relacionados no sólo con el incremento en la rugosidad de la tubería sino también con el aire atrapado. Las roturas son muy comunes en nuestros sistemas de conducción y están asociadas al envejecimiento y deterioro de las tuberías, así como a la forma de operación del acueducto.

El deterioro de líneas de conducción y sus consecuencias pueden ser agrupados en:

- Calidad del agua y problemas relacionados con sólidos en suspensión, así como incrustaciones en la pared interior
- Presión baja y problemas de pérdida de carga en la línea de conducción
- Fugas a través de las juntas
- Roturas de tubería debido al deterioro interno y externo de los tubos por acción de la corrosión
- Roturas debido a: asentamientos debajo de la tubería, por sobrepresiones y por cargas excesivas sobre la misma
- Colapso de tuberías debido a fuertes depresiones originadas por transitorios hidráulicos
- Envejecimiento de tuberías
- Daños ocasionados por terceras personas

1.1 Tipos de defectos presentes en tuberías

Gran cantidad de fallas, tanto graduales como catastróficas, se han presentado en diferentes acueductos del país; las primeras son las más frecuentes y, además, representan el principal problema al cual se enfrentan los organismos operadores de los acueductos. Ejemplos del primer tipo de fallas son: incrustaciones en la pared interior de la tubería y corrosión, tanto interior como exterior, laminaciones, deformaciones; estos fenómenos afectan continuamente a las líneas, crecen con el tiempo y reducen la calidad de la operación del sistema. Las fallas catastróficas se presentan de manera ocasional, aunque su gestación pueda tomar varios años, y por ser atendidas rápidamente podrían tener un menor efecto en el volumen promedio de agua entregado por el acueducto. Ejemplos de estas fallas son: las fugas, grietas y roturas.

En los acueductos Río Colorado - Tijuana y Chapala – Guadalajara, las incrustaciones son un problema latente, pues al llegar a trabajar a capacidad llena, la pérdida de capacidad de conducción se ha hecho evidente. En otros acueductos que aún operan con gastos menores que los de diseño, el deterioro del servicio por falta de capacidad de conducción no ha sido evidente.



Foto 1.1. Acueducto Chapala – Guadalajara, incrustaciones presentes en el interior de la tubería de concreto preesforzada

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Foto 1.2. Acueducto Río Colorado – Tijuana, incrustación y corrosión interna presentes en tubería de acero

Otro defecto que continuamente está presente en los sistemas de conducción es la pérdida de metal en tuberías de acero y de concreto preesforzado debido al fenómeno de la corrosión. La corrosión es la destrucción del metal por la acción electroquímica entre éste y un medio conductor de corriente, como puede ser el suelo o un cuerpo de agua. La pérdida de metal es ocasionada por el flujo de iones del metal de la tubería al electrolito que lo rodea. Para que ocurra corrosión es necesario que se cumplan en forma simultánea las siguientes condiciones:

1. Presencia de zona anódica, donde ocurre la pérdida de electrones (oxidación)
2. Presencia de zona catódica, donde ocurre la ganancia de electrones (reducción)
3. Presencia del medio conductor que permite el flujo de electrones de la zona anódica a la catódica (electrolito)
4. Trayectoria de retorno de corriente eléctrica

En una tubería la corrosión puede originarse de diversas maneras ya que existen varias condiciones que incrementan la probabilidad de la presencia del fenómeno: por la unión de diferentes metales, distintos tipos de suelo o contaminación del mismo, contenido de oxígeno, presencia de escoria y de corrientes parásitas^[8]. Un diagrama esquemático del fenómeno se presenta en la figura 1.1

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

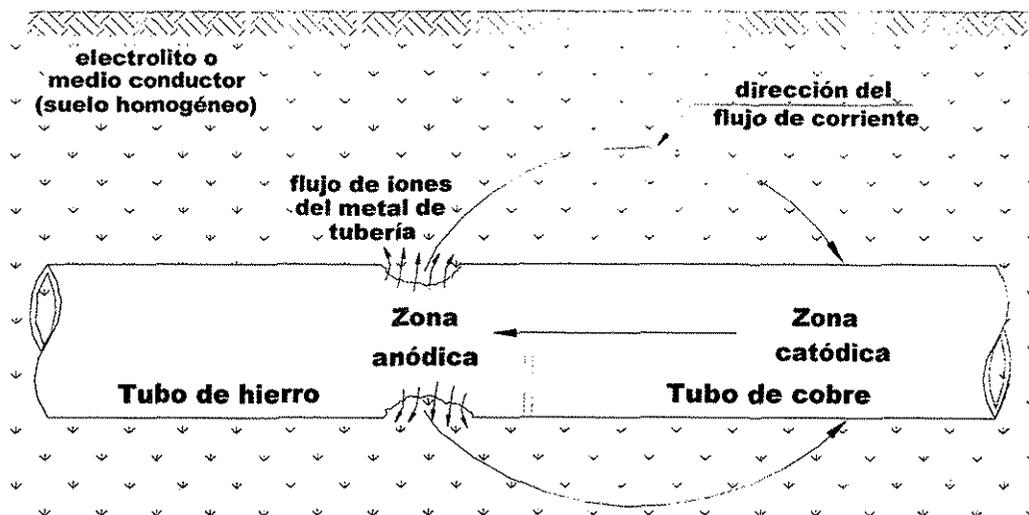


Figura 1.1. Fenómeno de la corrosión en una tubería enterrada

En función de las medidas tomadas, después de instalada la tubería, el fenómeno de la corrosión puede no ser grave o presentar serios problemas en cuanto a la integridad estructural de las tuberías y contaminación del agua. Si una línea de conducción de acero o concreto preesforzado se encuentra instalada en suelo agresivo y, además, existen corrientes eléctricas vagabundas o parásitas, la posibilidad de que la corrosión se presente es alta. Sin embargo, si la tubería está protegida catódicamente, entonces la posibilidad de que exista corrosión es muy baja. Se ha detectado el fenómeno de la corrosión en diferentes acueductos del país, como son: Estación Manuel - González Tamaulipas, Río Colorado - Tijuana y Chapala - Guadalajara, entre otros.



Foto 1.3. Acueducto Estación Manuel - González Tamaulipas, corrosión en tubería de acero

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



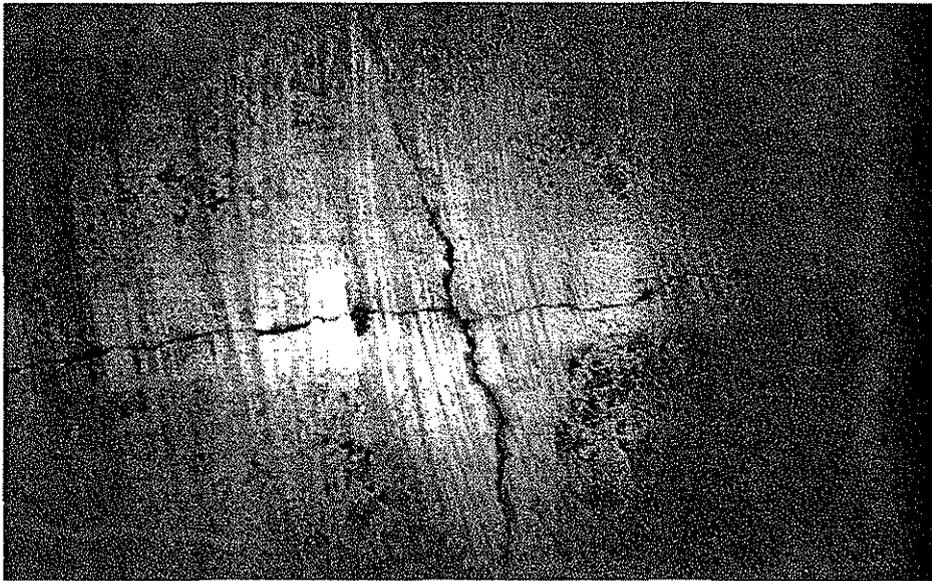
Foto 1.4. Acueducto Río Colorado – Tijuana, tubería de concreto corroída

Las fugas, grietas y roturas en tuberías, de igual forma, son eventos que se presentan en diversos acueductos del país, ejemplos son: Río Yaqui – Guaymas, González Ortega II – Ucum II, Río Colorado – Tijuana, Río Papagayo – Acapulco, entre otros.



Foto 1.5. Acueducto Papagayo - Acapulco, fuga en tubería de acero

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Foto 1.6. Acueducto Linares – Monterrey, grieta interior en tubería de concreto

1.2 Pruebas no destructivas

Muchos son los métodos que se han propuesto para evaluar la integridad estructural, el estado actual y la vida útil residual de tuberías. Se han desarrollado diferentes tipos de pruebas no destructivas las cuales diagnostican la existencia de defectos, sin llegar a la tubería a la falla o a la fatiga. Dentro de las pruebas no destructivas las más usadas y conocidas son: pigs inteligentes, monitoreo acústico, pruebas de impacto, medición del potencial eléctrico, inspecciones visuales y métodos estadísticos.

De igual forma, y como parte funcional del sistema de tuberías, para analizar el recubrimiento exterior con que cuentan algunos acueductos para su protección contra el fenómeno de la corrosión, se han desarrollado pruebas que evalúan su estado actual; principalmente mediante la medición del potencial tubo/suelo y la agresividad del suelo.

1.2.1 Pigs inteligentes

El uso de *pigs* inteligentes es una herramienta ampliamente usada en oleoductos, gasoductos y acueductos de países industrializados (en México, es una opción que sólo la ha utilizado Petróleos Mexicanos), y sirve para llevar a cabo una inspección del estado actual de la línea de conducción. Se pueden identificar defectos de fábrica, deformaciones y pérdida de metal en la pared de la tubería (corrosión).

Para aumentar la probabilidad de éxito en el proceso de recolección de datos en las tuberías, se requiere llevar a cabo corridas previas de limpieza y, si es necesario, de revisión de geometría. Los pigs de limpieza son usados para remover material adherido en la pared interior de la tubería, basura y para que la línea sea preparada para la corrida de pigs de geometría y de corrosión. Los pigs de geometría identifican las abolladuras, deformaciones y otros defectos en la línea de conducción, en tanto que pigs de corrosión detectan la presencia del fenómeno.

Los pigs usados en corridas para detección de corrosión en tuberías utilizan varias técnicas que permiten identificar el fenómeno:

➤ *Distorsión del campo magnético*

Esta técnica es aplicable a líneas de conducción de acero; su principio está basado en la distorsión de un fuerte campo magnético, inducido dentro de la pared del tubo de acero mediante imanes que son colocados equidistantes alrededor de la circunferencia del tubo. Intercalados con los imanes se colocan también una serie de sensores en contacto con la pared de la tubería. Cuando no existe defecto, el flujo pasa a través de la tubería sin distorsión, pero, cuando existe algún defecto en la pared, el flujo es desviado como se aprecia en la figura 1.2. Los sensores que detectan y graban esa desviación identifican si el defecto es interno o externo. Esta técnica no mide directamente la pérdida de metal o el espesor de pared remanente, pero permite inferirla a través del análisis de los datos de distorsión del campo magnético.

La superficie irregular en la pared interior de la tubería de acero produce vibración en el sensor, por lo que se adiciona ruido o confusión, si a esto se suma una posible variación en el espesor de pared debido a corrosión general, se hace más difícil saturar propiamente la pared con el flujo magnético; es por esto que siempre es conveniente realizar corridas de limpieza y geometría antes de una corrida para identificar la corrosión.

Con el uso de pigs inteligentes que utilizan el principio del campo magnético es posible evaluar la corrosión de manera muy acertada; de acuerdo al número de sensores y a su tamaño se puede obtener una resolución baja o alta en la localización de defectos por corrosión.

Pocos sensores, aún de gran tamaño, dan como resultado poca resolución, en tanto que mayor cantidad de sensores y más pequeños proporcionan una resolución alta. La inspección directa de los defectos generalmente ha mostrado que el tamaño reportado mediante una revisión estándar o resolución baja es menor que el tamaño real^[3].

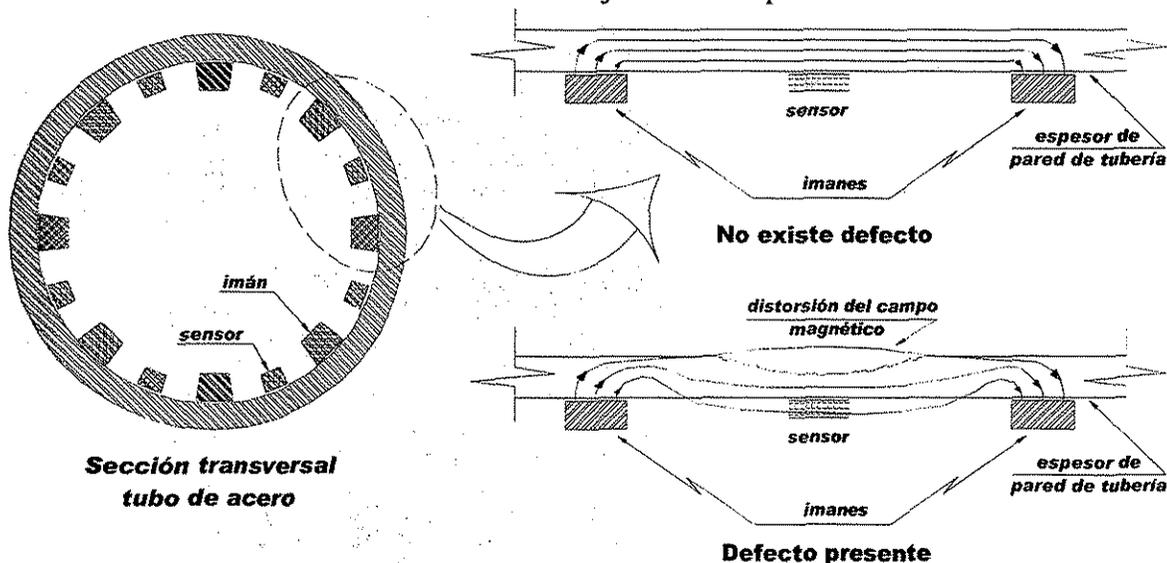
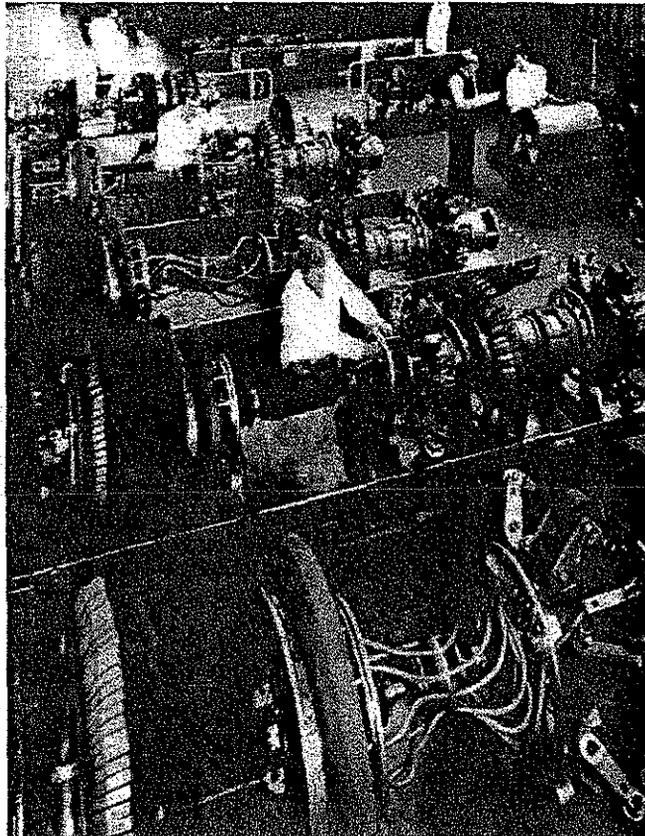
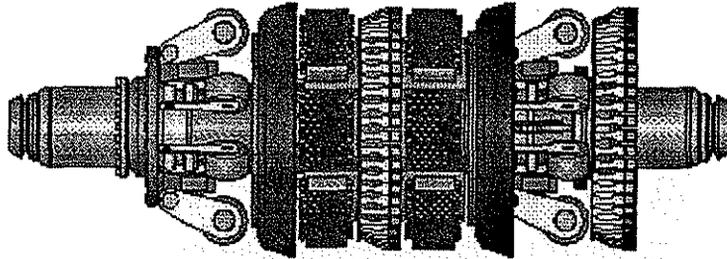


Figura 1.2. Campo magnético inducido en la pared de tubería de acero

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Los datos recabados de la inspección con pig de corrosión son grabados en chips con capacidad para almacenar grandes volúmenes de información y reflejan posición de juntas, defectos mecánicos, pérdida de metal y localización de accesorios. La pérdida de metal incluye la profundidad máxima presente en el defecto como un porcentaje del espesor de pared de la tubería, la longitud axial, la localización exacta a lo largo de la línea de conducción (utilizando un odómetro) y su orientación, reportada en función de la posición de las manecillas de un reloj.

Esta técnica no detectará los defectos a menos que éstos sean de suficiente tamaño para desviar el flujo magnético. Los defectos menores que 0.63 cm ($1/4$ in) de largo y menores que el 10% del espesor de pared, generalmente no pueden ser detectados. De igual forma, la soldadura defectuosa no puede ser detectada debido a una concentración de flujo magnético^[10].



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Foto 1.7. Pig inteligente, fabricados en el laboratorio de PII Group Ltd. Inglaterra

➤ Reflexión directa

El uso de esta técnica en corridas con pigs inteligentes apareció en los 90's como respuesta a la necesidad de inspeccionar tubería localizada bajo el mar, para transporte de gas. Características geométricas de diámetro pequeño y espesor de pared grande; por ejemplo 0.10 m (4 in) de diámetro interior y 12.7 mm (1/2 in) de espesor de pared, imponen restricciones en el uso de la técnica de pérdida de flujo magnético o ultrasonido.

La reflexión directa utiliza una técnica de medición magnética llamada reflexión magnética directa, la cual solo puede detectar la pérdida de metal local interna. Estos dispositivos o pigs son diseñados para llevar 32 sensores distribuidos sobre la circunferencia con espaciamiento de 10 mm. La medida hecha por los sensores no penetra la pared del tubo y, por lo tanto, es independiente del espesor de pared de la tubería, así como de la velocidad del pig.

La forma en que están constituidos los pigs inteligentes (para geometría y para corrosión) es básicamente la misma. Tienen un alma concéntrica de acero, plástico o aluminio en la cual llevan acoplados discos y copas de plástico intercambiables de acuerdo al diámetro requerido para la inspección. Además de incorporar los sensores en su interior, sirven como elementos de sellado para moverse junto con el flujo.

Los sensores incorporados dentro de la copa del pig, miden la distancia entre la copa donde está el sensor y la pared del tubo. Si la pared interior del tubo es suficientemente lisa entonces no se registran cambios. Esta aplicación no puede detectar la pérdida gradual de metal debido a corrosión general, por lo que, si es necesario, se puede hacer uso de una inspección con pig de geometría que detectará el incremento del diámetro interno de la tubería debido a corrosión general.

➤ Ultrasonido

Otro tipo de pig inteligente usa ultrasonido; opera de manera similar al campo de flujo magnético pero usa ondas de ultrasonido en lugar del campo magnético.

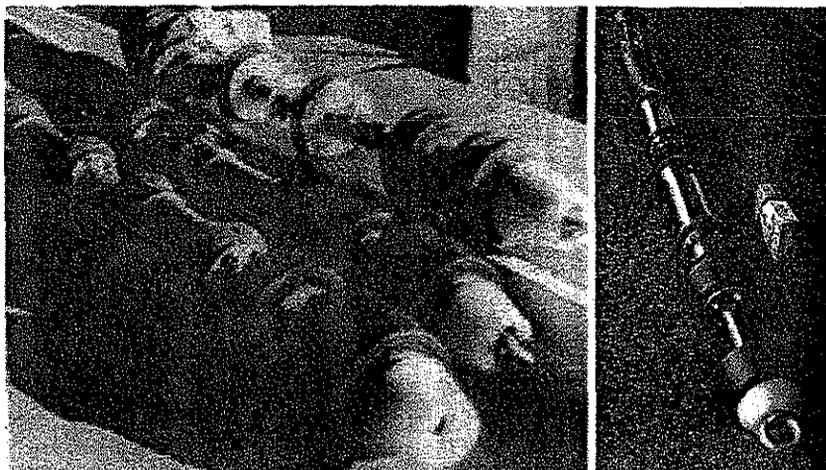


Foto 1.8. Pig inteligente, los sensores van localizados dentro de la copa

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.2.2 Monitoreo acústico

Esta técnica es la más utilizada en acueductos construidos con tubería de concreto preesforzado, ya sea cilíndrica o no cilíndrica; surgió como una técnica alternativa para detección de defectos en tuberías enterradas.

La tubería cilíndrica de concreto preesforzado (TCCP) es fabricada con un alma de acero cilíndrico, en tanto que la no cilíndrica carece de este elemento. Utilizan alambre de refuerzo pretensado que envuelve el cuerpo de concreto en forma helicoidal y desarrolla un esfuerzo de entre 11,000 y 16,000 kg/cm² y un recubrimiento de mortero de cemento que protege al alambre del ambiente, con lo que se obtienen presiones de diseño de tubería por arriba de los 35 kg/cm². El tamaño en diámetros oscila de 0.609 a 3.65 m (24 a 144 in), sin embargo, un diámetro mayor sólo está limitado por restricciones de transportación al sitio de instalación^[1].

Este tipo de tubería ha sido ampliamente usada en proyectos de sistemas de abastecimiento de agua con diámetros mayores que 1.21 m (48 in). Durante el tiempo de operación de un acueducto, su sistema de tuberías está expuesto a los efectos agresivos del ambiente; cuando el recubrimiento de mortero se deteriora, el alambre de refuerzo queda expuesto, lo que permite el desarrollo de la corrosión, hasta llegar al punto en que no soporta más la tensión y falla. El momento exacto de la ruptura depende de muchos factores: de la presión, del número de alambres de refuerzo deteriorados, del diseño del tubo, entre otros. Antes de que ocurra una falla catastrófica, la tubería puede soportar la rotura de varias espiras; se ha visto que para presiones de trabajo del orden de 15.5 kg/cm² (200 psi) soporta alrededor de 25 roturas y si trabaja con presiones de 3.5 kg/cm² (50 psi), el número de roturas permisibles crece hasta varios cientos de espiras antes de que ocurra una falla catastrófica^[2].

El concepto de monitoreo de las líneas de conducción de agua mediante señales acústicas, está basada en la tecnología acústica o de sonar usado por la fuerza naval de los Estados Unidos de América por décadas en la guerra anti - submarinos^[12]. En 1991 el U.S. Bureau of reclamation empezó a experimentar este tipo de tecnología en una serie de túneles y sifones que conducen el agua del Río Colorado hacia dos ciudades en E.U.A. (Phoenix y Tucson). Esta técnica tiene gran uso debido a que en tuberías enterradas no se tiene acceso para verificar el estado en que se encuentran.

El alambre de refuerzo puede estar tensando algo así como 3600 kg; cuando falla, parte de su energía potencial es convertida en ondas de sonido que se propagan a través del agua en la tubería. Una vez que falla, se reacomoda en el concreto adyacente (en el surco formado por el concreto y el mortero que lo rodean) sin perder toda su tensión; este evento ocurre muchas veces con todos y cada una de las espiras del alambre de refuerzo conforme el recubrimiento de mortero de cemento se va deteriorando. Este proceso quizás tome años hasta el punto en que se presente una falla catastrófica en la sección de tubería.

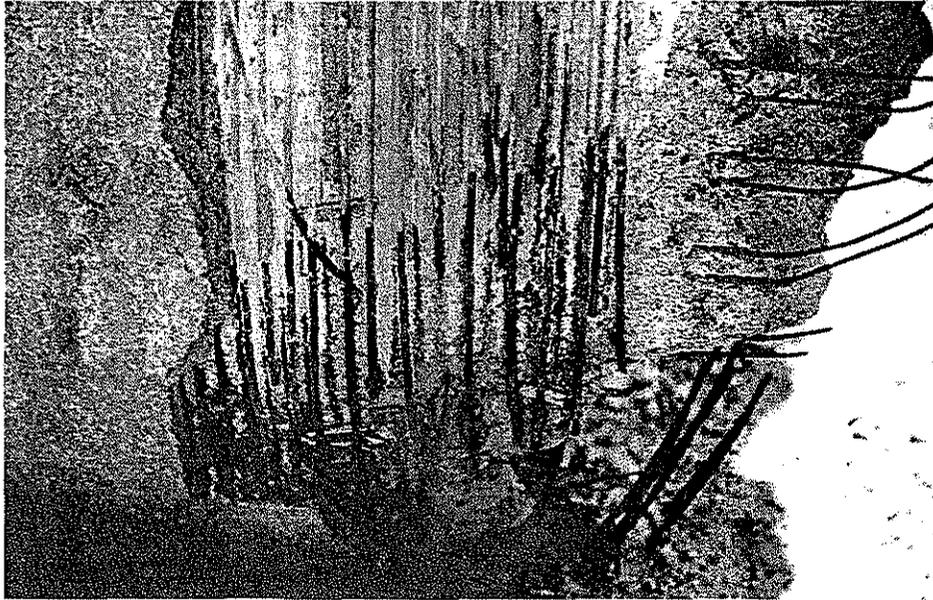


Foto 1.9. Acueducto Rio Colorado – Tijuana, alambre de refuerzo pretensado corroído

El sistema usado para detectar estos eventos acústicos consiste de hidrófonos y un procesador de señales.

Una serie de hidrófonos son insertados a través de la pared del tubo y dentro del flujo de agua a tubo lleno; cuando el alambre de refuerzo se rompe o se desliza entre el concreto y el mortero de cemento, los aparatos detectan el sonido a través de la propagación de la onda, la información es enviada al procesador de señales para ser comparada con patrones de ruido, con lo cual el sistema puede inferir si proviene o no del movimiento de espiras a tensión, en cuyo caso se calcula la posición donde ocurrió la rotura ya que son conocidas la velocidad del sonido en el agua y la distancia entre dos hidrófonos.

Por comparación del tiempo de llegada de la señal a cada hidrófono, el procesador de señal puede localizar la posición de la rotura con buena aproximación. Entre dos hidrófonos, la localización del defecto es interpretada en la figura 1.3 y con las ecuaciones 1.4 y 1.5

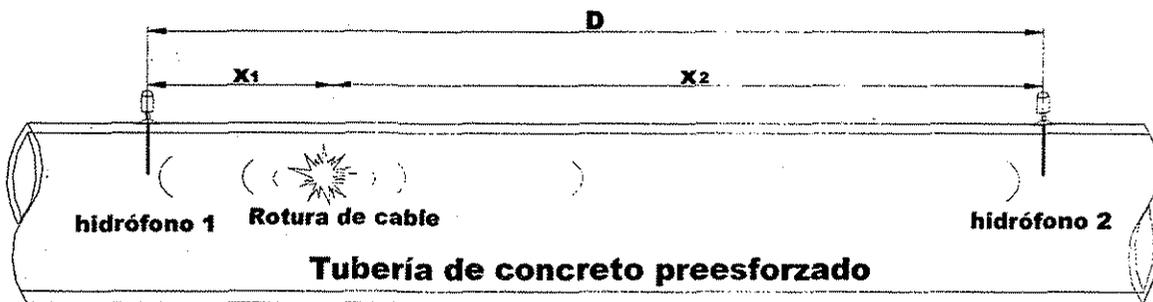


Figura 1.3. Localización de la falla en tubería de concreto

La distancia x_1 y x_2 donde se localiza la falla es:

$$x_1 = v(t_1 - t_0) \dots (1.1)$$

$$y \quad x_2 = v(t_2 - t_0) \dots (1.2), \text{ además } x_1 + x_2 = D \dots (1.3)$$

Donde:

- x_1 . distancia entre la posición de la rotura y el hidrófono 1
- x_2 . distancia entre la posición de la rotura y el hidrófono 2
- v . velocidad de propagación del sonido en el agua
- t_0 . instante de emisión del sonido (desconocido)
- t_1 . registro del ruido en el hidrófono 1
- t_2 . registro del ruido en el hidrófono 2
- D . distancia entre los hidrófonos

$$x_2 - x_1 = v(t_2 - t_1), \text{ y de (1.3) } x_1 = D - x_2, \text{ al sustituir: } 2x_2 - D = v(t_2 - t_1)$$

por lo que la distancia x_2 es: $x_2 = \frac{v(t_2 - t_1) + D}{2}$ o bien :

$$x_2 = \frac{D}{2} + v\left(\frac{t_2 - t_1}{2}\right) \dots\dots(1.4) \text{ y de manera similar } x_1$$

$$x_1 = \frac{D}{2} - v\left(\frac{t_2 - t_1}{2}\right) \dots\dots(1.5)$$

➤ *Hidrófonos*

Se colocan aproximadamente a cada 300 m (1000 ft), en caso de no existir orificios en la tubería para su inserción, es necesario perforar sobre la pared del tubo. El elemento sensor puede ser de cerámica o fibra óptica el cual es protegido en un ambiente impermeable de poliuretano. Un convertidor digitaliza la señal acústica y la envía mediante cables de fibra óptica a un procesador de señal.

Para asegurarse de que todos los elementos funcionen bien, un hidrófono emite un silbido a través de una orden y es captado por otros hidrófonos con lo que se corrobora su estado y la calibración, si es necesario. Ya que se conoce la distancia entre hidrófonos y el tiempo de arribo de la señal, se puede conocer la velocidad del sonido en el agua para las condiciones particulares de temperatura y calidad del agua en la línea de conducción.



Foto 1.10. Hidrófono

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

➤ *Procesador de señales*

Consiste de una computadora y un programa. La señal que llega al procesador se compara con un sonido pregrabado de rotura de alambre, si se identifica como ruido de corrosión entonces se graba en la base de datos y se localiza la posición de la rotura. El sistema se mantiene en operación el tiempo suficiente para captar un buen número de eventos.

Una vez grabadas las señales, el operador puede revisar y escucharlas, y pueden ser graficadas en un histograma de frecuencias para su análisis.

Para un mejor desempeño del equipo de monitoreo, el software cuenta con una base de datos de roturas de alambre que han sido grabadas en pruebas y monitoreos previos de tuberías. Una vez que se confirma la existencia de la rotura del alambre, este evento es grabado en la base de datos.

Este procedimiento asegura que el procesador de señales detecte con un mejor desempeño la rotura o deslizamiento del alambre; de igual forma, es conveniente romper deliberadamente algunos alambres para grabar el evento (la señal) en la base de datos y ayudar así a identificar el sonido que probablemente sea único para cada línea de conducción. Las ventajas de este método son la simplicidad y su calibración.

1.2.3 Pruebas de impacto

Esta metodología fue desarrollada a principios de los 80's, inicialmente fue utilizada en la inspección de estructuras de concreto, principalmente losas, vigas y columnas, en planchas de losa de carreteras y puentes, entre otros. En tubería cilíndrica o no cilíndrica de concreto preesforzado, la prueba no destructiva suministra información acerca de la integridad estructural de la tubería.

➤ *Método convencional ("impacto sísmico")*

Un impacto sobre la superficie de la tubería, proporciona un patrón de ondas a través de las diferentes capas estructurales del espesor de pared; éstas son reflejadas al encontrar alguna discontinuidad o agrietamiento, o en interfaces de material y en la frontera de la pared. Las ondas reflejadas son captadas por un transductor colocado cerca del punto de impacto.

La velocidad de la onda es función de la densidad del concreto, tipo de agregado, contenido de humedad y otros factores, las ondas son analizadas en el dominio de la frecuencia con lo que es posible asociarlas a un agrietamiento, interfase o espesor de pared, una vez que son reflejadas a través de la pared del tubo.

El procedimiento consiste en emitir impactos sobre la pared interior de la tubería, para tal efecto se usa una pistola especial y cuatro sensores, con el uso de un equipo de adquisición, los datos son grabados en un computador; cada disparo o impacto abarca 0.8 m de longitud en la tubería. Se puede medir el espesor de pared de tubería e identificar las áreas donde ha ocurrido laminación o existan agrietamientos.

Cada equipo de trabajo de 3 personas puede ensayar alrededor de 760 m de tubería por día, pero la tubería debe estar vacía. Los datos pueden ser analizados in situ y en tiempo real^[4].

➤ *Dispositivo de exploración móvil*

El sistema de exploración móvil es una variante del método convencional; consiste de un vehículo, especialmente diseñado para ser introducido al interior de la tubería vacía, en el que son colocados los sensores, que se encuentran en contacto directo con la superficie interior del tubo a través de 4 puntos de apoyo, por lo que dividen la circunferencia en 4 secciones. Para recabar la información, el sistema produce los impactos a incrementos de distancia conocidos. Con el uso de este vehículo se pueden desplegar los resultados de más de 3,000 puntos de impacto por hora, comparado con uno convencional que puede tener un rango de 30 a 60 puntos.

La primera prueba in situ desarrollada en tubería enterrada fue realizada en el Denver Federal Center, Lakewood en Colorado^[29], en tubería de concreto preesforzado de 1.37 y 1.82 m (54 y 72 in); la existencia de material adherido en la pared interior de la tubería impidió el libre paso del vehículo e hizo más difícil su tránsito por lo que se recomendó llevar a cabo la limpieza de la línea antes de realizar otra prueba. Se realizaron ambas pruebas, la convencional y el sistema de exploración móvil, los resultados no indicaron mucha diferencia entre ellas; durante esta inspección fue posible localizar áreas en donde la tubería presentaba desprendimiento del recubrimiento de mortero que protegía al alambre de refuerzo pretensado; de igual forma, se pudo medir el espesor de pared de la tubería la cual fue bastante acertada una vez que fue comparada con el espesor de pared conocido.

1.2.4 Pruebas aplicables al recubrimiento exterior

Las estructuras metálicas y las tuberías de acero y de concreto reforzado enterradas están expuestas al fenómeno de la corrosión como consecuencia del proceso electroquímico entre el sistema de tuberías y el suelo. Para minimizar el fenómeno, se ejerce un control sobre los factores que influyen en el proceso; la selección adecuada del material de tubería y el uso de recubrimiento exterior dieléctrico son dos formas de evitar el daño ocasionado por la corrosión.

Como ya se ha dicho, se han desarrollado diversos métodos que pueden ser utilizados en la identificación del fenómeno; una manera de conocer indirectamente el estado actual del recubrimiento exterior para tuberías que cuentan con este aislante es la medición eléctrica del potencial tubo/suelo y la resistividad del suelo.

➤ *Medición del potencial eléctrico a intervalos cortos*

La medición del potencial eléctrico a intervalos cortos es una técnica aplicada directamente sobre el desarrollo de la línea de conducción; puede indicar la presencia o ausencia de corrosión de acuerdo a la tabla 1.1.

Potencial tubo/suelo (referida a un electrodo de cobre/sulfato de cobre)	
Potencial (milivolts)	Interpretación
mayor de -200	90% de acero en buen estado
Entre -200 y -350	50% de posibilidad de acero en corrosión
Entre -350 y -500	90% de posibilidad de acero en corrosión
menor a -500	acero en corrosión

Tabla 1.1. Valores del potencial eléctrico tubo/suelo para tuberías sin protección catódica

El potencial tubo/suelo es el potencial eléctrico medido entre el metal y un electrodo de referencia colocado en contacto con la tierra. La celda o electrodo de referencia es la mitad de una batería (comúnmente de cobre – sulfato de cobre) que consiste de una varilla de cobre en una solución saturada de cristales de sulfato de cobre, la otra mitad de la celda es el metal inmerso en el suelo o electrolito.

La medición del potencial sobre la línea de conducción se realiza entre la superficie de la tubería y un electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre en contacto con el suelo empleando un voltímetro; las lecturas son tomadas a intervalos constantes de acuerdo al nivel de inspección que se requiera, mediciones a cada 5 m son recomendables. Por otro lado, el laboratorio de pruebas de equipos y materiales de la Comisión Federal de Electricidad recomienda mediciones de potencial a cada 100m.

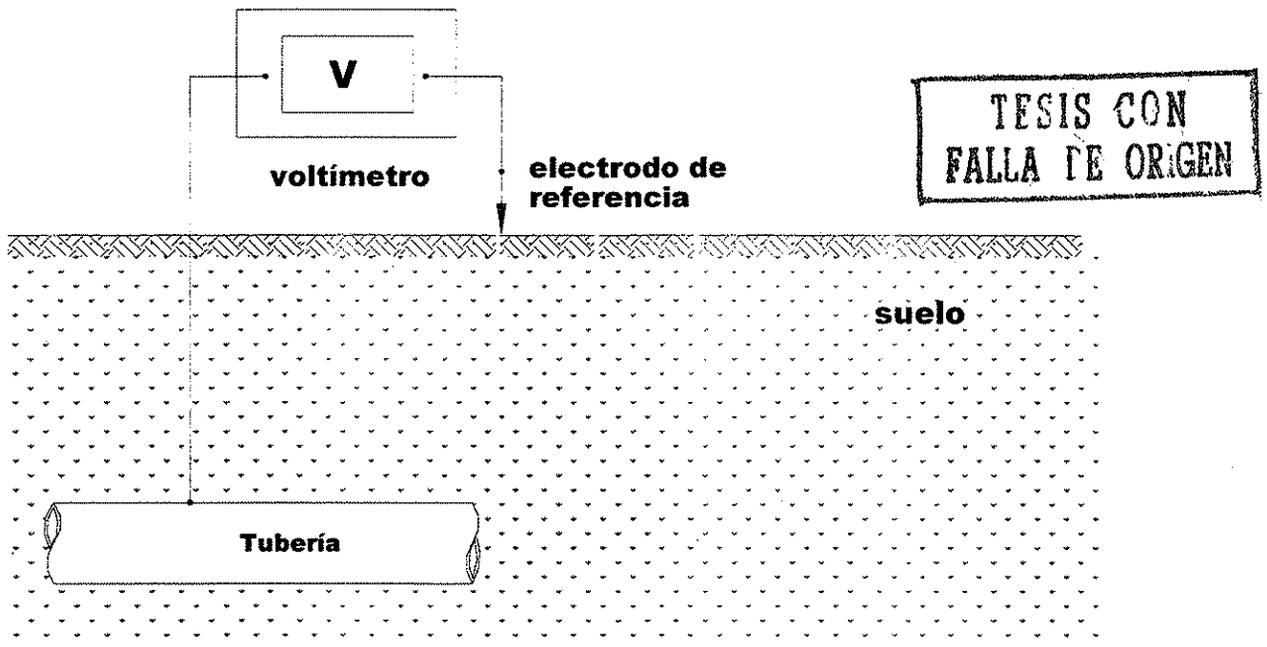


Figura 1.4. Medición del potencial eléctrico tubo/suelo

Esta prueba ayuda a determinar si existe corriente fluyendo a través del suelo o en la vecindad de la línea de conducción enterrada. Cuando se grafican los resultados de las pruebas a lo largo del alineamiento de la tubería, se pueden localizar áreas que se sospechan son anódicas en la línea.

Esta técnica no siempre es útil en la detección del fenómeno, la medición del potencial a intervalos cortos en tuberías de concreto es incapaz de identificar con seguridad las secciones de tuberías enterradas corroídas; de igual forma, cuando existe continuidad eléctrica entre dos tipos diferentes de tuberías (acero y concreto), éstas tienden a moverse hacia un potencial uniforme; con lo que se complica la identificación de áreas de corrosión en las tuberías^[7].

Potenciales mayores que -200 mv para líneas de conducción sin protección catódica, utilizando electrodos de cobre/sulfato de cobre como referencia indican que las secciones de tubería de concreto o fierro no presentan problemas de corrosión.

➤ *Medición de la resistividad del suelo*

Otro parámetro muy utilizado para la identificación del fenómeno de corrosión es la medición de la resistividad del suelo donde se encuentra alojada la conducción; de acuerdo a la norma oficial mexicana^[9], si la resistividad medida está entre 0 y 1,000 ohms/cm el suelo es altamente corrosivo, en cambio, si la resistividad es muy alta el suelo es poco agresivo (ver tabla 1.2).

Resistividad del suelo (ohms/cm)	Corrosividad del suelo
0 a 1,000	Altamente corrosivo
1,000 a 5,000	Corrosivo
5,000 a 10,000	Poco corrosivo
mayor a 10,000	Muy poco corrosivo

Tabla 1.2. Interpretación de la resistividad eléctrica en un suelo

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Algunos defectos en el recubrimiento es la presencia de una discontinuidad en el material anticorrosivo o recubrimiento dieléctrico que expone la superficie del metal al medio electrolítico que lo rodea.

El recubrimiento externo provee resistencia a la corrosión por actuar como una barrera entre la tubería y el suelo, por lo que cuando se determine una alta posibilidad de acero en corrosión indicará de igual forma el deterioro del recubrimiento; si se comprueba, a través de una inspección visual, la existencia de áreas de corrosión en la tubería, se deben tomar medidas correctivas para inhibirla.

1.2.5 Inspección visual

La excavación en el terreno adyacente a tuberías enterradas, es una inspección visual de la condición externa que guardan; los resultados de corridas de pigs inteligentes, pruebas de impacto y monitoreo acústico, entre otras, pueden indicar la mejor localización para realizar una inspección visual.

Durante la inspección visual con pozos, se debe aprovechar la tubería descubierta para realizar varias pruebas en el recubrimiento con el fin de determinar la condición en que se

encuentra (la composición, su adherencia, defectos, etc.). Pruebas para determinar la condición del recubrimiento son la medición del potencial a intervalos cortos y la medición de la resistividad del suelo. Estas pruebas indican la posible existencia de defectos en el recubrimiento y ayudan a localizar el sitio donde excavar para verificar los resultados y reparar el material dañado.

De igual forma, se pueden programar inspecciones al interior de la tubería con el fin de verificar el estado que guardan, el tipo y cantidad de incrustaciones en las paredes, la revisión de picaduras por efecto de la corrosión interna, la existencia de posibles grietas visibles, así como asegurarse de que no este desalineada.

1.2.6 Métodos estadísticos

Existen muchos métodos que evalúan las posibles roturas de tubería, así como su reemplazo. El modelo desarrollado por Shamir y Howard^[11] usa una base de datos históricos de roturas con la que se puede predecir la falla de tubería como una función de la edad de tubería, tipo, diámetro, ocurrencia de roturas previas y temperatura.

El modelo, de igual forma, puede tomar en cuenta el aspecto económico, es decir, las tuberías con el paso del tiempo se van deteriorando hasta llegar al punto en que resulta más económico reemplazar que reparar.

Con la base de datos históricos de roturas se realiza una regresión, en este caso se plantea lineal o exponencial; que representan la rotura como una función del tiempo, las ecuaciones son de la forma:

$$N(t) = N(t_0)e^{A(t-t_0)} \dots\dots\dots (1.7a)$$

$$N(t) = N(t_0) + A(t - t_0) \dots\dots\dots (1.7b)$$

Donde:

$N(t)$, número de roturas en el año t , en $\left[\frac{\text{rotura} \cdot \text{año}}{m} \right]$

t , año en que se quiere conocer el número de roturas

A es una constante, en $[1/\text{año}]$

t_0 es el año base

Si t_0 es el año en que se instaló la tubería, entonces $t_0 = k$ y $N(t_0) = a$, donde a es el coeficiente de regresión; sustituyendo en la ecuación 1.7a queda:

$$N(t) = ae^{b(t-k)} \dots\dots\dots (1.8)$$

Donde:

$N(t)$ es el número de roturas en el año t por m , en $\left[\frac{\text{rotura} \cdot \text{año}}{m} \right]$



a es el coeficiente de regresión, en $\left[\frac{\text{rotura} \cdot \text{año}}{m} \right]$

b es el coeficiente de regresión, en $[1/\text{año}]$

t es el año en que se quiere conocer el número de roturas

k es el año de instalación de la tubería

Puede realizarse una regresión para cada tipo de tubería, historia de roturas previas y diámetro de tubería de tal forma que se tendrán tantas ecuaciones como tipos de tubería instalada en el acueducto.

La ecuación 1.8 sirve como base del modelo de predicción de rotura; sin embargo, no toma en cuenta el hecho de que a mayor diámetro mayor será la posibilidad de rotura; de igual forma una tubería que ya ha experimentado rotura será mucho más sensible de volver a fallar que una que no se ha roto.

Estos factores de corrección quedan expresados de la siguiente forma:

$$c_1 = \frac{f_{RP}}{f_{RT}} \dots\dots\dots (1.9)$$

$$c_2 = \frac{f_{RD}}{f_{RT}} \dots\dots\dots (1.10)$$

Donde:

c_1 es el factor de corrección por rotura previa

c_2 es el factor de corrección por tamaño de tubería

f_{RP} es la frecuencia de rotura en tubería con fallas previas

f_{RT} es la frecuencia de rotura total

f_{RD} es la frecuencia de rotura en tubería dividida en dos rangos: menos de 20 in y mayor o igual a 20 in

La frecuencia de rotura de tuberías es expresada en $\left[\frac{\text{roturas} \cdot \text{año}}{m} \right]$. Una vez que se toman en cuenta los factores de corrección la ecuación 1.8 queda:

$$N(t) = c_1 c_2 a e^{h(t-k)} \dots\dots\dots (1.11)$$

Esta ecuación representa el modelo de predicción de rotura desarrollado por Shamir y Howard con la cual se puede extrapolar el número de roturas futuras para el año requerido.

El modelo de predicción de roturas es fácil de aplicar; sin embargo, tiene la gran desventaja de que para predecir alguna rotura se requiere que las tuberías ya hayan fallado, por lo que es un método poco usado.



CAPITULO 2. METODOS DE EVALUACION DE DEFECTOS

Un deterioro excesivo puede reducir significativamente la resistencia de las tuberías por debajo de los márgenes de riesgo de seguridad de la operación de los acueductos. Cuando hay o se sospecha la presencia de corrosión, abolladuras, grietas o material adherido, es conveniente llevar a cabo evaluaciones para determinar si la sección de tubería afectada es susceptible de permanecer en servicio o deberá ser reparada o sustituida.

En los métodos de evaluación de defectos en tuberías se debe plantear la pregunta: ¿Cuándo es necesario reparar?

La corrosión y otros defectos deben ser reparados cuando reducen la resistencia, la capacidad de conducción o la integridad estructural de las tuberías. En manuales desarrollados por diversas instituciones, se ha definido como “*defecto aceptable*” uno que puede pasar una prueba hidrostática (*hydrotest*).

Actualmente existen diversos métodos para evaluar los defectos en tuberías, así como múltiples opciones para repararlos. La rehabilitación y el mantenimiento de las tuberías pueden ser evaluados a través de métodos estadísticos y heurísticos. Los métodos estadísticos requieren de robustas bases de datos históricas de fugas, fallas, etc, mientras que los heurísticos se basan en evaluaciones cualitativas, de acuerdo con la percepción de especialistas y operadores de acueductos.

A menudo existen decisiones con criterios excesivamente conservadores, lo que puede resultar en una reparación no necesaria o elegir un método de reparación caro, siendo que existen otros menos costosos y que son totalmente aceptados.

2.1 Prueba hidrostática

La prueba hidrostática sirve para verificar la integridad estructural y la hermeticidad de tuberías nuevas o existentes y de cualquier material (acero, asbesto – cemento, concreto, polietileno, pvc, etc). Es una forma de identificar y evaluar algunos defectos presentes en la línea.

Para realizar la prueba es necesario poner fuera de servicio el tramo a ensayar, las válvulas admisoras y expulsoras de aire deben ser cuidadosamente revisadas para asegurar su correcta operación, llevar a cabo la purga en la línea de conducción y todas las salidas o conexiones a otros ramales deben ser tapadas antes de iniciar. Debido a estas maniobras es importante tomar en cuenta el tiempo en que estará fuera de operación el tramo a probar.

En tuberías recién instaladas se debe tapar la zanja donde se ubican con el propósito de que la línea pueda desarrollar la fricción contra el suelo. La línea debe ser llenada lentamente para evitar atrapar aire. Si se trata de tubería de concreto, ésta debe ser llenada y dejada a baja presión durante 24 horas previas al inicio de la prueba, esto ayudará a saturar las paredes de concreto de las tuberías y reducirá la fuga aparente de agua. Las conexiones y el equipo deben ser inspeccionados para asegurarse de que estén en condiciones aceptables.

El código ASME B31.8, las Normas Mexicanas y el AWWA, entre otras normas y especificaciones, señalan que la línea de conducción debe ser ensayada hidrostáticamente al menos al 125% de su máxima presión de operación permitida (*MAOP*), es decir:

$$\sigma = 1.25MAOP$$

Generalmente, los fabricantes definen:

$$MAOP = 72\%SMYS$$

por lo que

$$\sigma = 90\%SMYS$$

Donde:

SMYS, es el esfuerzo mínimo de fluencia del material de la tubería

➤ Cálculo de la presión hidrostática de prueba

Considérese el diagrama de cuerpo libre de un tramo de tubería de pared delgada sometida a presión, como se ilustra en la figura 2.1. Los esfuerzos principales σ_1 y σ_2 , que actúan sobre las caras laterales, representan los esfuerzos de membrana en la pared y son conocidos como esfuerzo circunferencial o tangencial y esfuerzo longitudinal o axial, respectivamente. Cada uno de estos esfuerzos es calculado a partir del equilibrio de fuerzas para cada dirección. El peso propio del elemento, así como el del fluido, son omitidos en el análisis de fuerzas.

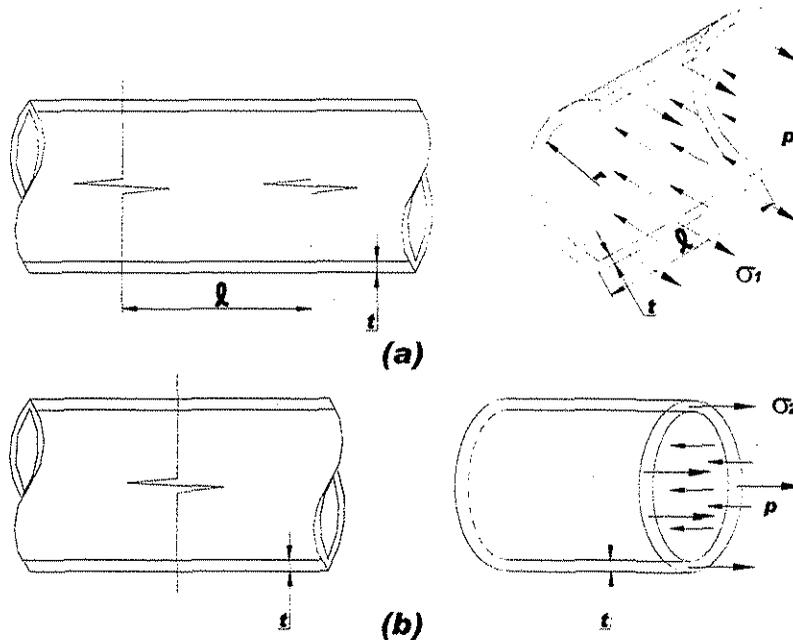


Figura 2.1. Corte longitudinal y transversal de una sección de tubería

Las figuras 2.1a y b ilustran dos tipos de fallas en las tuberías, una longitudinal y otra transversal, respectivamente.

Al aplicar el equilibrio de fuerzas para la dirección longitudinal del tramo de tubería, se tiene:

$$\sigma_1(2lt) - p(lD) = 0, \text{ despejando } \sigma_1:$$

$$\sigma_1 = \frac{pD}{2t} \dots\dots\dots (2.1) \quad \text{o bien}$$

$$p = \frac{2\sigma_1 t}{D} \dots\dots\dots (2.2)$$

De manera similar, para el corte transversal de la sección de tubería se tiene:

$$\sigma_2(\pi Dt) - p\left(\frac{\pi D^2}{4}\right) = 0, \text{ despejando } \sigma_2:$$

$$\sigma_2 = \frac{pD}{4t} \dots\dots\dots (2.3) \quad \text{o bien}$$

$$p = \frac{4\sigma_2 t}{D} \dots\dots\dots (2.4)$$

Donde:

D .- diámetro del tubo

p , presión interna en la tubería

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Si se comparan las ecuaciones 2.2 y 2.4, se observa que la presión (p) necesaria para llevar la tubería a la falla a través de una fisura longitudinal representa la mitad de la que se requeriría para originar una falla del tipo transversal, es por ello que para los análisis se utiliza la ecuación 2.2. La ecuación para el cálculo de la presión hidrostática de prueba es:

$$p = \frac{2\sigma_1 t}{D} \quad \text{válida para tubos mayores que } 3 \frac{1}{2}'' \text{ de diámetro}$$

Donde:

p .- presión hidrostática de prueba, pero no mayor que 211 kg/cm² (3000 psi)

t .- espesor de pared del tubo

D .- diámetro del tubo

σ_1 .- esfuerzo tangencial en la pared del tubo y depende de recomendaciones en normas y especificaciones; puede tomar valores de:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

σ_1	% del SMYS	Condición de operación de la tubería
0.72SMYS	72	Máxima presión de operación permisible (MAOP) 1.25 veces MAOP
0.90SMYS	90	
1.00SMYS	100	-
1.10SMYS	110	-

El esfuerzo mínimo de fluencia del material de la tubería depende de los requerimientos químicos para cada tipo de tubo, es decir, de la especificación con la cual está elaborado. Los valores de SMYS y de resistencia a la tensión se muestran en las tablas 2.1 y 2.2

ESPECIFICACION API 5L (Requerimientos de propiedades mecánicas)				
Grado	Esfuerzo mínimo de fluencia (SMYS)		Resistencia a la tensión mínima	
	psi	kg/cm ²	psi	kg/cm ²
A25	25000	1758	45000	3164
A	30000	2109	48000	3375
B	35000	2461	60000	4218
X42	42000	2953	60000	4218
X46	46000	3234	63000	4429
X52	52000	3656	66000	4640
X56	56000	3937	71000	4992
X60	60000	4218	75000	5273
X65	65000	4570	77000	5414
X70	70000	4922	82000	5765
X80	80000	5625	90000	6328

Tabla 2.1. Especificación API 5L

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ESTANDAR ASTM					
(Requerimientos de propiedades mecánicas)					
Designación	Grado	Esfuerzo mínimo de fluencia (SMYS)		Resistencia a la tensión mínima	
		psi	kg/cm ²	psi	kg/cm ²
A 53	A	30000	2109	48000	3375
	B	35000	2461	60000	4218
A 139	A	30000	2109	48000	3375
	B	35000	2461	60000	4218
	C	42000	2953	60000	4218
	D	46000	3234	60000	4218
	E	52000	3656	66000	4640
A 252	1	30000	2109	50000	3515
	2	35000	2461	60000	4218
	3	45000	3164	66000	4640
A 500	A	33000	2320	45000	3164
	B	42000	2953	58000	4078
	C	46000	3234	62000	4359
	D	36000	2531	58000	4078

Tabla 2.2. Estándar ASTM volumen 01.01

En el anexo A se presentan en forma tabular las presiones hidrostáticas de prueba para diferentes tipos y grados de tubería de acero, correspondientes a un nivel del 90 % del esfuerzo mínimo de fluencia.

El nivel de presión para verificar la integridad estructural de la tubería puede ser más alto que el nivel necesario para validar la MAOP, o sea, mayor que el 72% del SMYS. Durante la prueba se permite una caída de presión debido a fuga aparente, es decir, a los efectos de aire atrapado, absorción del agua en la pared de los tubos y variaciones de temperatura; la fuga aparente permitida oscila entre 10 y 50 galones por pulgada de diámetro por milla de tubería y por 24 horas, es decir:

$$F = (10a50)(D)(longitud)(24)$$

o bien

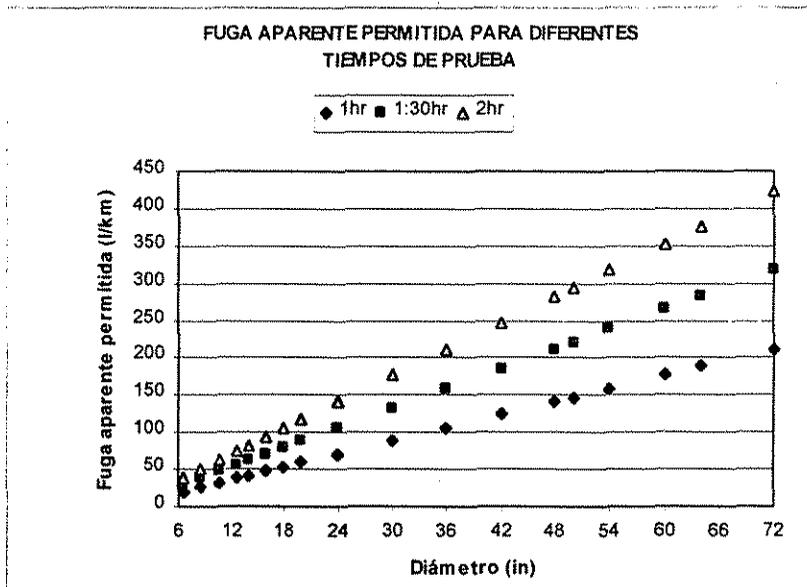
$$F = (0.03785a0.18925)(D)\left(\frac{L}{1609.34}\right)\left(\frac{H}{24}\right) \dots\dots\dots (2.5)$$

Donde:

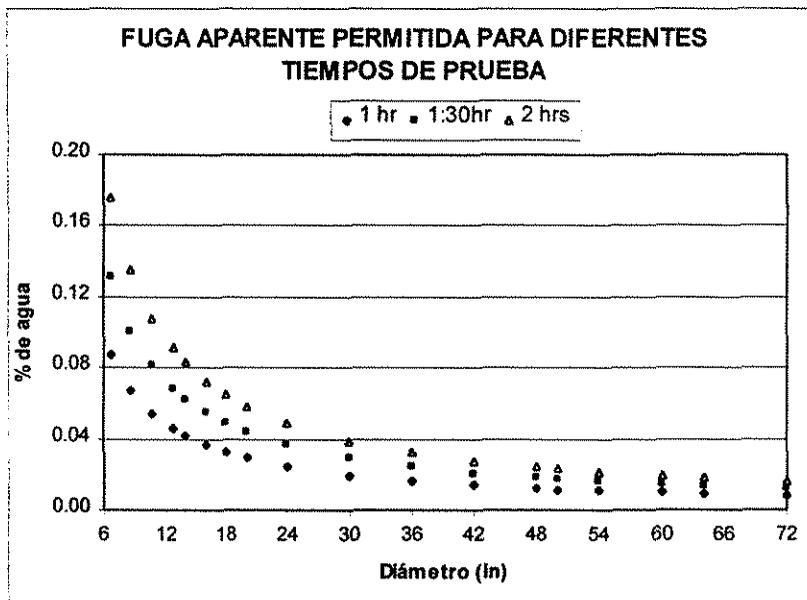
- F, es la fuga aparente permitida en m³
- D, diámetro de la tubería en pulgadas
- L, longitud del tramo de prueba en m
- H, el tiempo de ensayo de la prueba en horas



Las gráficas 2.1 y 2.2 ilustran la fuga aparente permitida en función del tiempo de duración de la prueba para diferentes diámetros de tubería.



Gráfica 2.1. Fuga aparente permitida



Gráfica 2.2. Fuga aparente permitida durante la prueba hidrostática

La duración de la prueba recomendada es de 1 a 2 horas. Aunque para validar la prueba es suficiente con mantener la carga, se recomienda llevar a cabo la inspección en el derecho de vía de la conducción para revisar si es que existen fugas o roturas^[1]. Otros autores recomiendan se lleve a cabo la prueba en 4 horas^[5].

Algunos autores mencionan que la prueba hidrostática daña la línea de conducción, especialmente si es llevada a niveles por arriba del 100% del SMYS, por lo que se recomienda se limite a niveles de alrededor del 90% del SMYS. Es importante asegurar que durante la prueba no ocurra alguna sobrepresión, por lo que es conveniente contar con válvulas de alivio.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Existen otras opiniones que recomiendan que las líneas de conducción deberían ser reensayadas periódicamente para asegurar su servicialidad.

El criterio del hydrotest o prueba hidrostática define un factor mínimo de seguridad para tuberías, específicamente para una tubería operando al 72% del *SMYS*, el factor mínimo de seguridad esta dado por:

$$\text{Factor de seguridad} = \frac{100\%SMYS}{72\%SMYS} = 1.39$$

Es decir, la tubería no debe operar a más del 72% del *SMYS*, o sea, su máxima presión de operación permisible. El factor de seguridad es más alto para tuberías operando con presiones más bajas.

La prueba no es una solución universal para evaluar el estado actual de las tuberías, mas bien, es una herramienta que puede ser considerada en un programa de rehabilitación.

El hidrottest revela todos los puntos que fallarían para cierta presión de ensayo; lo más conveniente, según algunos autores, es ensayar la línea de conducción a los niveles más altos posibles que sean factibles sin provocar numerosas fallas durante la prueba, es decir, debería ser terminada, si es necesario, para limitar el número de roturas debidas al ensayo una vez que se haya alcanzado la máxima presión de operación permisible.

La prueba hidrostática es recomendada para eliminar tantos defectos como sean posibles de detectar, es importante hacer notar que no detectará cualquier posible falla futura.

La experiencia en campo y en laboratorio han revelado mucho a cerca de los beneficios y limitaciones de las pruebas hidrostáticas:

- Los defectos orientados longitudinalmente tienen niveles de presión de falla únicos que son predecibles de acuerdo a su longitud axial, máxima profundidad del defecto, geometría y de las propiedades del material de la tubería.
- Durante la prueba, al incrementar la presión, si hay defecto presente, éste comienza a crecer debido a un agrietamiento dúctil, antes de que ocurra la falla. Si el defecto es susceptible a la falla, el agrietamiento dúctil que ocurre antes de la rotura continuará creciendo, incluso al detenerse el incremento de presión, manteniendo la presión al nivel constante en que comenzó a agrietarse. El daño puede ser tan grande que pudiera ser que una vez aliviada la presión y se procediera a volver a presurizar, el defecto podría llegar a la falla catastrófica, aún incluso por debajo del nivel de presurización anterior.
- Puede darse el caso que para presiones de prueba que están por arriba de la *MAOP* (del 100 o 110% del *SMYS*), el defecto existente sea lo suficientemente pequeño como para soportar la presión sin llegar a la falla catastrófica.

- Para una línea de conducción nueva, con especificaciones adecuadas y buena inspección, se esperaría que no ocurrieran fallas, incluso para niveles de presión del 100 o 110% del *SMYS*. En líneas existentes con muchos años de operación, éstos niveles de prueba quizá sean bastante difícil de alcanzar.

Por varias razones, la realización periódica de pruebas hidrostáticas no es necesariamente la mejor forma de conocer la confiabilidad del sistema de tuberías; la razón más importante por la que una prueba hidrostática quizás no sea la mejor opción para validar la integridad estructural de una línea de conducción es la existencia de pruebas no destructivas que permiten identificar defectos pequeños, corrosión, incrustaciones, etc. que no podrían ser detectados por una prueba hidrostática llevada a niveles razonables de presión, incluso hasta un 110% del *SMYS*.

La inspección en línea es preferible sobre una prueba hidrostática; ya que, de existir algún defecto que pudiera crecer con el tiempo (corrosión, agrietamiento, etc.), la prueba hidrostática solo demostraría la servicialidad del acueducto por un corto período.

2.2 Método del área efectiva

Como alternativa al *hydrotest*, se han desarrollado criterios que estiman la presión de reventamiento o falla catastrófica por defectos debidos a la pérdida de metal en tuberías de acero, basados en sus dimensiones, en el tipo de material y propiedades de la tubería. El más común y ampliamente aceptado para determinar la resistencia remanente por corrosión y otros defectos como pérdida de metal es el método del área efectiva. Está incluido en el manual para determinar la resistencia remanente en tuberías *ANSI/ASME B31G*.

Este criterio fue desarrollado a principios de los 70's, intentó ser un criterio fácil de utilizar; sin embargo, aunque requiere de un mínimo de información de la tubería y del defecto, su empleo necesita de información que sólo puede ser proporcionada a través de una corrida con pig inteligente. También existen programas de cómputo especialmente desarrollados, como el *RSTRENG*, que usan mapas detallados de la corrosión, por lo que hacen un análisis con más detalle del esfuerzo remanente.

La hipótesis principal de este método es que la pérdida de resistencia debido a la corrosión es proporcional a la cantidad de metal perdido, medido axialmente a lo largo de la tubería, como se aprecia en la figura 2.2, aunque la ruta que une los puntos más profundos de pérdida de metal es, en distancia, más grande que la que se toma axialmente para el cálculo de la resistencia remanente. La ecuación 2.6 muestra el esfuerzo circunferencial o tangencial de falla de la tubería con defecto presente.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

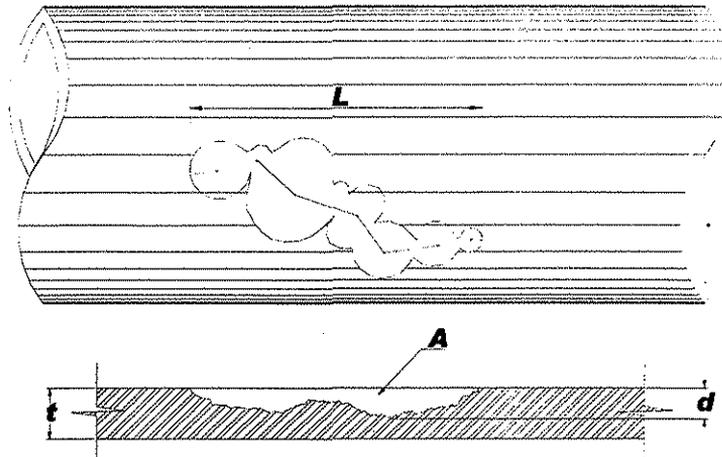


Figura 2.2. Pérdida de metal en tubería de acero

$$S = S_{flow} \left[\frac{1 - \frac{A}{A_0}}{1 - \left(\frac{A}{A_0}\right)(M^{-1})} \right] \dots (2.6)$$

Donde:

- M .- factor del defecto (de pandeo o foliación), es función de L , D y t
- S .- esfuerzo circunferencial, cuando la pared del tubo es llevada a la falla
- S_{flow} .- es una propiedad del material, relacionada con su esfuerzo de fluencia
- A .- área defectuosa a través de un plano longitudinal del espesor de pared
- A_0 .- área original a través de un plano longitudinal, es $L * t$
- L .- longitud axial del defecto
- t .- espesor de pared del tubo
- D .- diámetro de la tubería

Esta expresión asume que el esfuerzo circunferencial de falla es directamente proporcional al esfuerzo o punto de fluencia del material de la tubería y toma en cuenta la disminución del área original transversal del defecto, así como un factor de pandeo o foliación debido a la concentración de esfuerzos alrededor del defecto.

Existen por lo menos tres diferentes relaciones para determinar el valor de S_{flow} :

- $S_{flow} = 1.10 SMYS$, esta forma es la recomendada en el criterio *ASME B31G*
- $S_{flow} = 1.15 SMYS$ y
- $S_{flow} = SMYS + 68.95 Mpa$ o $S_{flow} = SMYS + 10 ksi$, la cual es una expresión obtenida experimentalmente

La ecuación 2.6 incluye el término M , conocido como factor de pandeo o de foliación; está basado en el análisis de falla a través de la pared y toma en cuenta la concentración de esfuerzos alrededor del defecto debido a la deflexión radial externa, es decir, al pandeo en el área de corrosión. Se incrementa para defectos grandes en tamaño y queda definido en función de la longitud del defecto, diámetro y espesor de pared de la tubería.

2.2.1 Criterio ASME B31G

Para poder aplicar el método a través de la ecuación 2.6 es necesario encontrar una expresión simplificada, lo cual se logra aproximando el área del defecto a una figura geométrica conocida. Este criterio aproxima el área transversal del defecto a una parábola, como se ilustra en la figura 2.3. Esta hipótesis resulta ser conservadora ya que el área real del defecto es menor que el área correspondiente de la parábola.

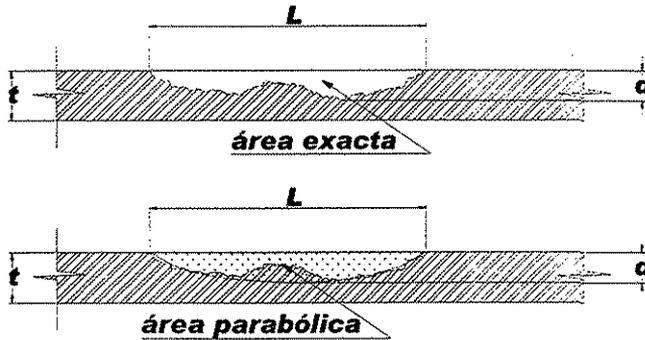


Figura 2.3. Aproximación del cálculo del área transversal a un área parabólica

$$A = \frac{2}{3} Ld, \quad A_0 = Lt \quad \text{y} \quad S_{flow} = 1.10 \text{ SMYS}, \quad \text{donde:}$$

A.- área parabólica

A₀.- área original

Por lo que la ecuación 2.6 resulta ser:

$$S = 1.10 \text{ SMYS} \left[\frac{1 - \frac{2d}{3t}}{1 - \frac{2d}{3t} (M^{-1})} \right] \quad \dots (2.7a)$$

y el factor de pandeo está definido por:

$$M = 1 + \frac{0.8L^2}{Dt} \quad \dots (2.7b)$$

Donde:

d.- es la máxima profundidad del defecto

S.- es el esfuerzo circunferencial de falla

Esta ecuación predice el esfuerzo que causará la falla en una tubería corroída con diámetro D , espesor t , y esfuerzo de fluencia $SMYS$; donde la pérdida de metal tiene una longitud axial L y una profundidad máxima d .

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En secciones de tubería recta, un defecto orientado en dirección axial o longitudinal representa mayor peligro estructural que uno orientado transversalmente, debido a que la presión interior de falla para un defecto longitudinal es la mitad de la presión de falla para uno orientado transversalmente. La ecuación 2.2 representa la presión interior de falla para un defecto longitudinal. Si se sustituye la ecuación 2.7 en 2.2, se tiene:

$$p = \frac{2t}{D} 1.1SMYS \left[\frac{1 - \frac{2d}{3t}}{1 - \frac{2d}{3t}(M^{-1})} \right] \dots\dots\dots (2.8)$$

p.- representa la presión interior del fluido para la cual el tubo alcanza la falla

Para que la tubería no falle se requiere que la presión interior de falla sea mayor a la presión de operación; de esta forma el criterio B31G incorpora el factor de seguridad para tuberías:

$$\text{Factor de seguridad} = \frac{\text{presión de falla}}{\text{presión de operación}}$$

De igual forma, se puede calcular la máxima longitud de corrosión *L*, si se hace *S* = *SMYS*, dando como dato la profundidad *d*.

$$L = 1.12 \left[\left(\frac{\frac{d}{t}}{1.1 \frac{d}{t} - 0.15} \right)^2 - 1 \right]^{\frac{1}{2}} [Dt]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (2.9)$$

Es decir, la máxima longitud de corrosión *L* es aquella para la cual la tubería fallaría, asumiendo que el esfuerzo tangencial último o de falla correspondería al esfuerzo de fluencia del material.

2.2.2 Criterio RSTRENG

Este criterio está basado en el *ASME B31G* y es menos conservador; se tienen dos formas de evaluar el esfuerzo remanente: uno conocido como *0.85RSTRENG* o ecuación modificada *B31G* y el *RSTRENG Software*.

La ecuación modificada *B31G* incorpora expresiones para el cálculo del factor *M*; el factor 2/3 de la hipótesis del área parabólica ha sido reemplazado por un valor de 0.85.

$$S = 1.1SMYS \left[\frac{1 - 0.85 \frac{d}{t}}{1 - 0.85 \frac{d}{t}(M^{-1})} \right] \dots\dots\dots (2.10a)$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$$M = \left(1 + 0.6275 \frac{L^2}{Dt} - 0.003375 \frac{L^4}{D^2 t^2} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ para } \frac{L^2}{Dt} \leq 50 \quad \dots (2.10b)$$

$$M = 0.032 \frac{L^2}{Dt} + 3.3 \quad \text{para } \frac{L^2}{Dt} > 50 \quad \dots (2.10c)$$

Al sustituir la ecuación 2.10a en 2.2, se tiene:

$$p = \frac{2t}{D} 1.1SMYS \left[\frac{1 - 0.85 \frac{d}{t}}{1 - 0.85 \frac{d}{t} (M^{-1})} \right] \dots (2.11)$$

Las expresiones para el cálculo del factor de pandeo fueron sugeridas por Kniefer y Vieth^[16]

El criterio *RSTRENG Software* es un programa que requiere de mediciones del defecto de corrosión más detalladas, es decir, del perfil del defecto con lo cual se calcula el área *A* de la pérdida de metal. Para el cálculo del área, el programa utiliza un mapa del contorno del defecto y de sus profundidades. En la figura 2.4 se presenta un esquema del mapa del contorno de corrosión, mostrando algunas de las posibilidades que se tienen en un defecto para el cálculo del área transversal de pérdida de metal y de la longitud axial *L*.

El software analiza todos los posibles defectos, las diferentes rutas de profundidades de corrosión y calcula el esfuerzo circunferencial y presión interior de falla, dando como resultado final los valores más bajos encontrados.

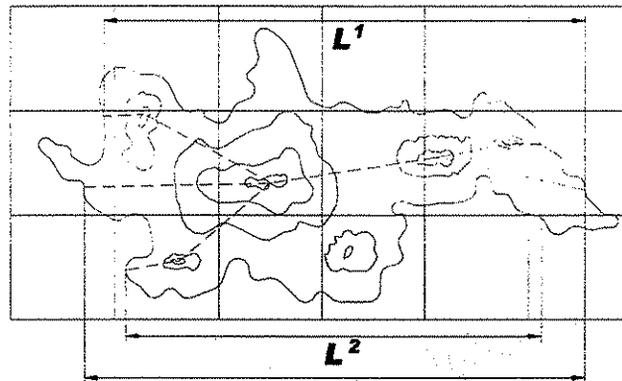
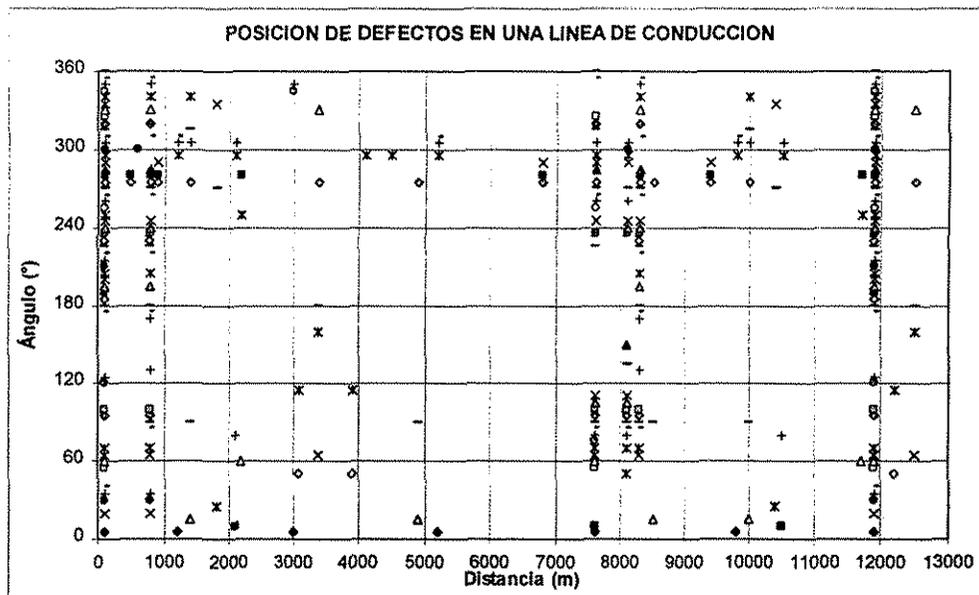
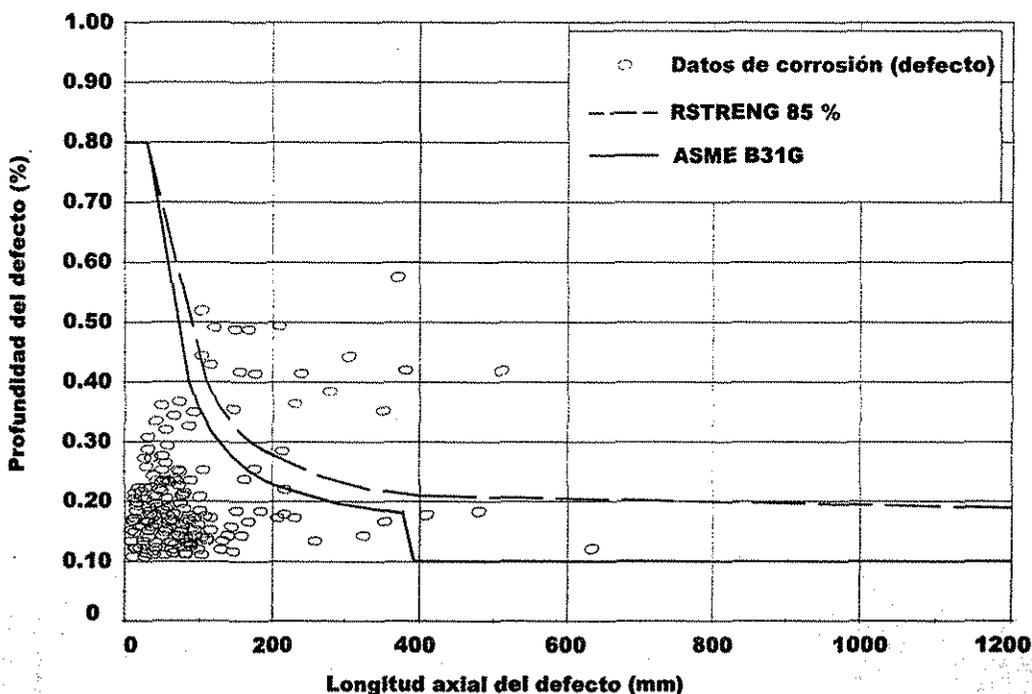


Figura 2.4. Mapa del contorno de corrosión, mostrando las zonas de mayor profundidad y las diferentes longitudes axiales para un mismo defecto

Además del software *RSTRENG*, existen otros programas de cómputo que evalúan la integridad estructural de tuberías; por ejemplo, la compañía *NKK corporation*^[46] cuenta con software que proporciona información para ser desplegada en computadora; por ejemplo, la gráfica 2.3 muestra la posición de defectos (pérdida de metal) a lo largo de la línea de conducción después de una corrida con pig inteligente, en tanto que la gráfica 2.4 representa la frontera de falla para el cual el defecto puede ocasionar o no la rotura de tubería en función del tamaño del defecto.



Gráfica 2.3. Localización de defectos (pérdida de metal) a lo largo de una línea de conducción



Gráfica 2.4. Criterio ASME B31G y RSTRENG 85 %

La ventaja de los métodos *ASME B31G* y *RSTRENG* para evaluación del esfuerzo remanente en defectos por corrosión, son su simplicidad y su validación experimental. Estos métodos han sido usados exitosamente por la industria de las tuberías; sin embargo, tienen la desventaja de que están limitados en su aplicación para defectos pequeños y aislados, como picaduras o defectos continuos orientados de manera circunferencial o en espiral.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

2.3 Método prioriza

La metodología *Prioriza*, desarrollada por PEMEX^[13] para líneas de conducción de acero, es de tipo heurístico y se basa en la evaluación cualitativa de factores asociados a la tubería y a su entorno. Con esta herramienta se puede priorizar la inspección interna de la línea, el mantenimiento y la rehabilitación de tuberías.

El método permite calcular un índice de riesgo a través de la revisión de parámetros asociados a la operación de tuberías, los cuales pueden ser agrupados en 6 categorías:

1.- Interferencia externa

- a) Espesor de la tubería
- b) Poblaciones por las que pasa la línea de conducción

2.- Corrosión

- a) Protección catódica
- b) Interferencia eléctrica
- c) Recubrimientos
- d) Operación de juntas aislantes
- e) Corrosión interna

3.- Movimiento de terreno

- a) Cercanía a minas y canteras
- b) Sismos
- c) Ríos, deslaves y agrietamientos causados por intemperismo

4.- Normatividad en construcción

- a) Fecha de construcción
- b) Incidencia de fugas

5.- Seguridad en la operación

- a) Presión de operación
- b) Zonas pobladas según el tipo de construcción

6.- Seguridad de suministro

- a) Producción perdida
- b) Consumidores afectados
- c) Impacto económico al país

El método asigna un factor de peso para cada parámetro a través de la siguiente ecuación:

$$IP = a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 + a_5X_5 + a_6X_6 \quad \text{Donde:}$$

IP.- es el índice de prioridad y está relacionado con el riesgo de falla de la tubería en estudio.

Los valores de los factores de peso se muestran en la siguiente tabla y corresponden a una ponderación hecha con las opiniones de especialistas.

Variable	Factor	Factor de peso a_i
X_1	Interferencia externa	0.13
X_2	Corrosión	0.22
X_3	Movimiento de terreno	0.05
X_4	Normatividad en construcción	0.18
X_5	Seguridad en la operación	0.22
X_6	Seguridad de suministro	0.20

El valor de cada factor o parámetro que entra en la ecuación anterior es calculado en función de sus propias características.

1.- Factor de interferencia externa

El factor de interferencia externa está relacionado con la posibilidad de falla originada por daños mecánicos, debido a eventos ajenos a los programas de mantenimiento e inspección, es decir, daños por terceros. Este factor se determina de acuerdo al espesor de pared y a la clase de localización de la tubería.

Espesor de pared (t) en mm	Factor de interferencia externa X_1 Localización de la tubería		
	Clase 1	Clase 2	Clase 3
$t > 11.89$	1	2	5
$9.53 < t < 11.89$	2	4	7
$t < 9.53$	3	6	9

Para determinar el tipo de localización de la tubería se hace uso de la norma NRF-012-PEMEX-2000^[14] donde se define la clase de localización:

➤ Clase 1

Se define como localización clase 1, aquella donde se tienen 10 o menos construcciones para ocupación humana en un área unitaria (200 m a ambos lados de la línea de conducción en una longitud de 1,600 m); o en los casos donde la tubería se localice en terrenos despoblados, desiertos, de pastoreo y granjas.



➤ Clase 2

Localización clase 2 es aquella donde se tienen más de 10, pero menos de 46 construcciones para ocupación humana en un área unitaria. Comprende áreas en la periferia de las ciudades, áreas industriales y rurales.

➤ Clase 3

Se define como localización clase 3, aquella área donde se cumpla una de las siguientes condiciones:

- ✓ Cuando en un área unitaria existan 46 o más construcciones destinadas a ocupación humana o habitacional
- ✓ Cuando exista una o más construcciones a menos de 100 m del eje de la tubería y se encuentre ocupada normalmente por 20 o más personas
- ✓ Cuando exista un área al aire libre bien definida a menos de 100 m del eje de la tubería y ésta sea ocupada por 20 o más personas durante su uso normal, como sería un campo deportivo, un parque de juegos, un teatro al aire libre u otro lugar público de reunión
- ✓ Cuando la línea de conducción pase a 100 m o menos de áreas destinadas a fraccionamientos o casas comerciales, aún cuando en el momento de construirse la línea solamente existan edificaciones en la décima parte de los lotes adyacentes al trazo
- ✓ Cuando la tubería se localice en sitios donde a 100 m o menos haya un tránsito intenso u otras instalaciones subterráneas. Considerándose como tránsito un camino o carretera pavimentada con un flujo de 200 o más vehículos en una hora pico de aforo

2.- Factor de corrosión

El factor de corrosión se evalúa de las gráficas de protección catódica, del potencial tubo/suelo, de la interferencia eléctrica (corrientes vagabundas), tipo y estado del recubrimiento, juntas aislantes y encamisados en cruces con vías de comunicación. Este factor se determina con la ponderación de los subfactores de corrosión usando la fórmula:

$$X_2 = a_{2,1}x_{2,1} + a_{2,2}x_{2,2} + a_{2,3}x_{2,3} + a_{2,4}x_{2,4} + a_{2,5}x_{2,5}$$

Variable	Subfactor	Coefficiente de ponderación, $a_{2,i}$
$x_{2,1}$	Protección catódica	0.25
$x_{2,2}$	Interferencia eléctrica	0.10
$x_{2,3}$	Recubrimiento	0.26
$x_{2,4}$	Operación de juntas aislantes	0.14
$x_{2,5}$	Corrosión interna	0.25

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

➤ *Subfactor de protección catódica*

La evaluación sugerida para la protección catódica es:

Protección catódica	Subfactor de protección catódica ($x_{2,1}$)	Potencial (volts)
Excelente	1	-0.8 a -2.5
Regular	5	-0.7 a -0.8
Mala	9	Menor de -0.7

➤ *Subfactor de interferencia eléctrica*

La cercanía con sistemas de protección catódica, trenes eléctricos y sistemas que utilicen corriente directa, estructuras metálicas, líneas de conducción eléctrica de alta tensión, influyen en la aplicación efectiva de la protección catódica.

Interferencia eléctrica	Subfactor de interferencia eléctrica ($x_{2,2}$)	Efecto
Excelente	1	No se presentan efectos
Regular	5	Se sabe de la presencia, pero se toman acciones preventivas oportunamente
Malo	9	Se sabe que hay interferencias y no se han tomado medidas de protección

➤ *Subfactor de recubrimiento*

El factor de recubrimiento es función del estado del material de recubrimiento en las tuberías.

Recubrimiento	Subfactor de recubrimiento ($x_{2,3}$)	Efecto
Excelente	1	Se tiene conocimiento de que está en buenas condiciones, ya sea por aplicación del método de medición del potencial a intervalos cortos o una determinación de área desnuda con pruebas de requerimiento de corriente e inspección visual
Regular	5	Se inspeccionó 100% cuando se construyó
Malo	9	No se ha realizado inspección reciente a través de la medición del potencial, ni prueba de requerimiento de corriente; está sujeta a movimientos de tierra en los alrededores del tubo con climas extremos de sequías o deslaves o no se tuvo un buen control durante su instalación

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

➤ *Subfactor de operación de juntas aislantes*

Este factor se determina analizando las condiciones de las juntas aislantes, de tal manera que se evita al 100% un cortocircuito del sistema de protección catódica.

Aislamiento	Subfactor de operación de juntas aislantes ($x_{2,4}$)	Efecto
Excelente	1	La instalación y operación de juntas aislantes es adecuada, los encamisados están colocados correctamente, y el espacio anular relleno con material o gas inerte, o bien un medio alcalino
Regular	5	La instalación y operación de las juntas es incorrecta, los encamisados y el tubo no están perfectamente aislados y el espacio anular está parcialmente libre de lodos, agua, etc.
Malo	9	No se conoce el estado de aislamiento, o se sabe que los encamisados están en cortocircuito y no se han tomado acciones correctivas

➤ *Subfactor de corrosión interna*

En este factor influyen la corrosividad del fluido, tratamiento con inhibidores químicos, monitoreo de la velocidad de corrosión, etc.

Corrosión interna	Subfactor de corrosión interna ($x_{2,5}$)	Efecto
Excelente	1	El fluido transportado no es corrosivo o se ha tenido tratamiento eficiente con inhibidores de corrosión
Regular	5	El fluido es corrosivo y está bajo tratamiento químico, se tienen velocidades de corrosión menores a 2 Ampers/m^2 sin que manifiesten picaduras los ánodos de sacrificio
Malo	9	El fluido es corrosivo con contenido de agua, sales, CO_2 , H_2 , etc. Y no se trata con inhibidores de corrosión

3.- *Factor de movimiento de terreno*

Es determinado con la ponderación de los factores inherentes a la cercanía a minas y canteras operando, fallas geológicas y modificaciones en cauces de ríos, a través de la ecuación:

$$X_3 = a_{3,1}x_{3,1} + a_{3,2}x_{3,2} + a_{3,3}x_{3,3}$$



Variable	Subfactor	a _{3,i}	Influencia			
			sin	mínima	moderada	severa
x _{3,1}	Cercanía a minas y canteras	0.20	0	3	6	9
x _{3,2}	Sismos	0.11	0	3	6	9
x _{3,3}	Ríos, huracanes, deslaves o agrietamientos del terreno por intemperismo	0.69	0	3	6	9

4.- Factor de normatividad en construcción

Este factor está relacionado con el tiempo en operación y la normatividad aplicada en la construcción; se evalúa por comparación con la incidencia de fugas F_0 .

$$F' = \frac{NF}{LA} \quad \text{Donde:}$$



F' , factor de incidencia de fugas en el tramo (fugas/km/año)

NF , número de fugas históricas en la operación de las tuberías

L , es la longitud del tramo de tubería en km

A , edad de la tubería en años

El coeficiente histórico de fugas dado por PEMEX es: $F_0 = 0.028$, obtenido del sistema de tuberías compuesto por gasoductos y oleoductos.

5.- Factor de seguridad de operación

El factor de seguridad de operación se determina de acuerdo a la posibilidad de que ocurra una rotura, la cual está en función de la resistencia de la tubería a través del espesor de pared del tubo, de la presión máxima de operación en la línea y del número de personas afectadas por la fuga.

Espesor de la tubería actual y de diseño	Presión de operación (kg/cm ²)	Tipo				Peso relativo, multiplicar por
		A	B	C	D	
el espesor actual se redujo menos del 30% con respecto al de diseño	$p \leq 24$	1	3	7	9	0.08
	$24 < p \leq 69$	1	3	7	9	0.17
	$p > 69$	1	3	7	9	0.25
el espesor actual se redujo más del 30% con respecto al de diseño	$p \leq 24$	1	3	7	9	0.25
	$24 < p \leq 69$	1	3	7	9	0.67
	$p > 69$	1	3	7	9	1.00

6.- Factor de seguridad de suministro

Este factor se determina de acuerdo con la cantidad de producto que se deja de entregar, por el número de consumidores domésticos que pueden quedar sin servicio debido a una falla, por sucesos que provocarán situaciones críticas en alguna región del país o sector de la economía. El factor se calcula a través de la siguiente ecuación:



$$X_6 = a_{6,1}x_{6,1} + a_{6,2}x_{6,2} + a_{6,3}x_{6,3}$$

Variable	Subfactor	a _{6,1}	Influencia			
			mínima	moderada	severa	Excesiva
x _{6,1}	Producción perdida	0.30	1	3	6	9
X _{6,2}	Consumidores afectados	0.39	1	3	6	9
X _{6,3}	Impacto económico al país	0.31	1	3	6	9

El índice de prioridad, calculado de manera cualitativa, es asociado a un período máximo de inspección o rehabilitación del tramo de tubería estudiado. PEMEX desarrolló un estudio de opinión con 150 especialistas en tuberías preguntando por el período máximo permisible para realizar una inspección con diablo instrumentado; se analizó estadísticamente la información, con lo cual se pudo construir una tabla donde se relaciona el período de inspección con el índice de prioridad:

Prioridad de grupo	Índice de prioridad	Máximo período de inspección (años)
Máxima	Mayor que 4.77	3
Media	Entre 1.91 y 4.77	6
Baja	Menores que 1.90	12

La metodología Prioriza no es una herramienta que resolverá todos los problemas de mantenimiento y rehabilitación en tuberías; sin embargo, es una buena guía para establecer un estándar de la forma en que se evalúan las tuberías, así como para obtener bases de datos confiables del sistema de tuberías

2.4 Análisis de la capacidad de conducción

Este tipo de análisis es llevado a cabo en líneas de conducción de cualquier arreglo o composición de materiales, ya sea acero, concreto, asbesto – cemento, pvc, polietileno, etc. En el diseño hidráulico de líneas de conducción, la selección del tipo, diámetro y resistencia de tuberías debe garantizar la operación confiable del acueducto, tanto estructuralmente como en la capacidad de conducción deseada.

El factor de fricción *f* y el coeficiente de rugosidad *n* de Manning son dos parámetros ampliamente usados para representar la capacidad de conducción y la rugosidad interna en la pared de las tuberías; su conocimiento es crítico para el cálculo del diámetro del tubo. Estos parámetros toman gran importancia cuando se trata de líneas de conducción con longitudes mayores que 1000 veces su diámetro; en estos casos la pérdida de carga por fricción toma mayor importancia.

La capacidad de conducción en un acueducto, invariablemente, se ve reducida en el tiempo; estudios realizados por el Instituto de Ingeniería de la UNAM a diferentes acueductos del país han mostrado que la disminución en la capacidad de conducción es un fenómeno que depende del incremento en la rugosidad absoluta o equivalente de la tubería, del aire atrapado y de la presencia de material fino en el fluido.

Otros autores han estudiado el fenómeno de pérdida de capacidad de conducción en tuberías, Echávez⁵⁰ en 1997 encontró, en un estudio realizado con tuberías de diámetros pequeños y de antigüedad de entre 15 y 50 años, que el diámetro nominal de las tuberías había disminuido y que la rugosidad absoluta creció con el tiempo. Además, el factor de fricción se incrementó del orden de 2.86 veces en aquellas tuberías con antigüedad de 50 años.

➤ *Disminución de la capacidad de conducción en el Acueducto Río Colorado - Tijuana*

El acueducto Río Colorado – Tijuana abastece de agua a las ciudades de Tijuana, Ensenada, Tecate y Rosarito. Toma agua del Río Colorado que es conducida por canales abiertos hacia un sistema de tanques sedimentadores para después ser entregada en el cárcamo de bombeo de la planta de bombeo 0. La longitud total del acueducto es de 112.7 km, incluyendo tubería y dos túneles, tiene un gasto de diseño de 4 m³/s y una carga total de 1136 m proporcionada por seis plantas de bombeo, cada una de las cuales cuenta con tres bombas, más una de reserva, con un gasto de diseño de 1.33 m³/s.

En 1983 se puso en operación la primera etapa de este acueducto con el funcionamiento de un solo equipo de bombeo por planta. Años más tarde se observaron problemas de derrame de agua por el coronamiento de la torre de oscilación 1 (TO1), en esta primera etapa el tramo de conducción localizado entre la torre y el tanque de sumergencia 2 (TS2) contaba únicamente con la operación de una línea de conducción de un total de tres proyectadas (ver figura 2.5).

Las primeras mediciones de gasto y gradiente hidráulico llevadas a cabo en julio de 1987 permitieron conocer el factor de fricción en el tramo TO1–TS2 el cual era de 0.0133; con los resultados de estas mediciones se efectuó el análisis del funcionamiento hidráulico con tres equipos y tres líneas de conducción en paralelo correspondientes a la última etapa de operación, lo que permitió establecer la necesidad de sobreelevar 5 m el coronamiento de la TO1.

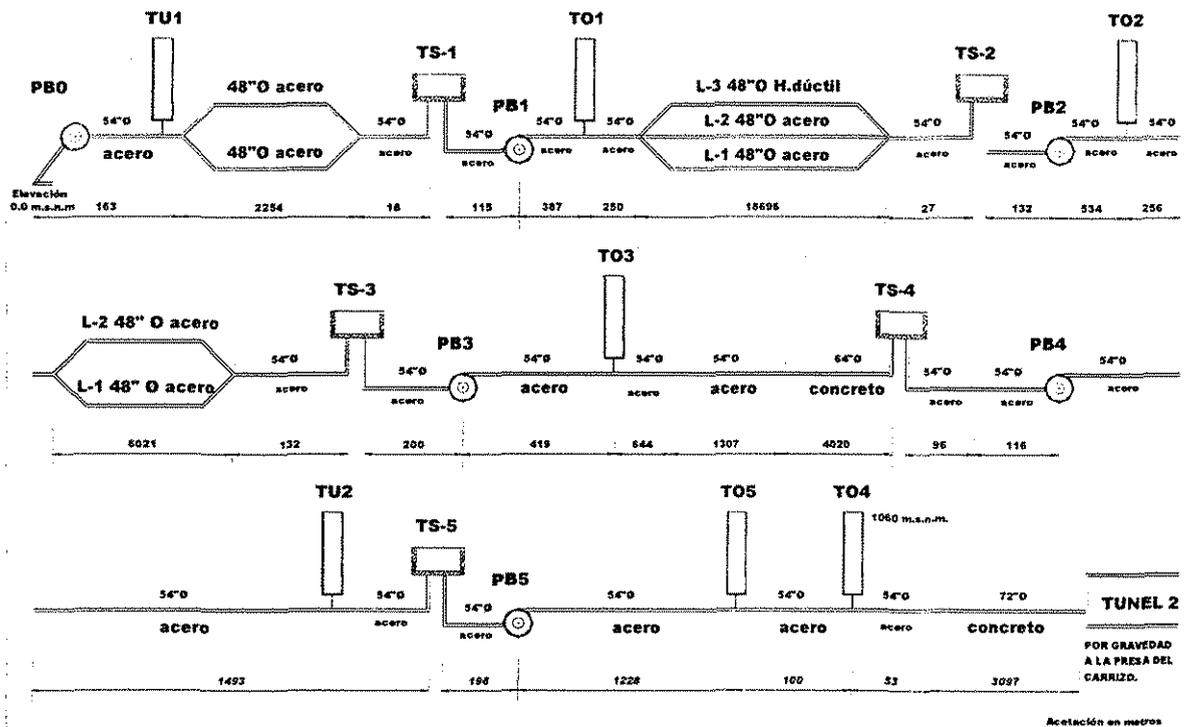
Una segunda campaña de mediciones, en septiembre de 1988, fue realizada debido a que los derrames en la torre persistieron aún después de su sobreelevación. Los resultados mostraron que la pérdida de carga en el tramo se había incrementado considerablemente; el valor de f obtenido fue de 0.0236. Nuevas mediciones realizadas en 1992 mostraron que el problema de reducción en la capacidad de conducción continuaba incrementándose de manera importante ya que el valor de f había crecido hasta 0.0317. La tabla 2.3 muestra un resumen de las mediciones de gasto y pendiente de fricción, así como los resultados del cálculo del factor de fricción y rugosidad equivalente en la línea 1.

Año	Q (m ³ /s)	S _f	f	ε equivalente (mm)
1987	1.46	0.000905	0.0133	0.14
1988	1.33	0.001332	0.0236	2.41
1992	1.17	0.001382	0.0317	6.88

Tabla 2.3. Mediciones llevadas a cabo en diferentes años



Croquis de la línea de conducción en la zona de bombeo del A.R.C.T.



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 2.5. Esquema del tramo a bombeo del acueducto Río Colorado - Tijuana

➤ *Disminución de la capacidad de conducción en el Acueducto Chapala - Guadalajara*

El acueducto Chapala – Guadalajara fue diseñado para entregar un gasto de 7.5 m³/s a la ciudad de Guadalajara. El lago de Chapala constituye su fuente de abastecimiento, cuenta con una planta de bombeo (PB) con 6 equipos de bombeo, 5 en operación y uno de reserva, con gasto y carga de proyecto de 1.5 m³/s y 138 m, respectivamente. La línea de conducción tiene una longitud total de 42 km de tubería cilíndrica de concreto preesforzado de 2.1 m de diámetro; los primeros 26 km forman el tramo por bombeo que entrega el agua en un tanque de cambio de régimen (TCR) a partir del cual el agua escurre a gravedad hasta el tanque del Cerro del Cuatro (TE).

En el mes de mayo de 1990 se puso en servicio el tramo por bombeo (PB – TCR), vertiendo el agua bombeada del TCR hacia el canal El Guayabo para conectar con el sistema de abastecimiento antiguo. En septiembre de 1991 entró en operación el tramo a gravedad (TCR- TE), permitiendo la operación completa del nuevo sistema de conducción.

En agosto de 1994 se realizaron las primeras mediciones de gasto y piezométrica en el tramo a gravedad con cuatro equipos en operación. Se llevaron a cabo nuevas mediciones con cuatro equipos de bombeo operando en octubre de 1994 y noviembre de 1995 y con cinco equipos de bombeo en abril de 1996. Las mediciones llevadas a cabo en estos años para el tramo a gravedad se presentan en la tabla 2.4.

Año	Q (m ³ /s)	S _f	f	ε equivalente (mm)
1994	5.46	0.001053	0.0175	1.23
1994	5.48	0.001078	0.0177	1.30
1995	4.99	0.001171	0.0232	3.99
1996	5.56	0.001504	0.0240	4.54

Tabla 2.4. Mediciones llevadas a cabo en diferentes años

En estos dos acueductos del país se observa claramente una tendencia al incremento en la rugosidad de la pared interior de los tubos; inspecciones visuales llevadas a cabo en el interior de las tuberías de cada acueducto mostraron la existencia de incrustaciones presentes en la pared interior. La presencia de esta capa de material no disminuye significativamente el área hidráulica efectiva, pero genera zonas de turbulencia muy cercanas a las irregularidades del material lo que provoca una disminución en el gasto transportado.

La corrosión interior de igual forma puede estar presente junto con la incrustación, lo que provocaría contaminación del agua por oxidación, dando un color rojizo al agua.

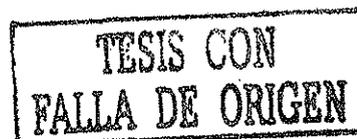
Como ya se vio, la mejor forma de averiguar si existe o no material adherido en la pared interior de las tuberías es a través de campañas de medición en las cuales es necesario aforar para conocer el gasto conducido e instalar manómetros a todo lo largo de la línea de conducción con el fin de encontrar el gradiente hidráulico a gasto establecido. Con estas variables se puede llegar a conocer tanto el factor de fricción como el coeficiente de rugosidad y la rugosidad equivalente de la línea de conducción. Mediciones llevadas a cabo en el tiempo permitirán obtener un registro de la manera en que crece la rugosidad en tuberías.

La limpieza de la línea de conducción depende de muchos factores: de la necesidad de agua que se tenga en la población a la que se abastece, del incremento en costos de bombeo, del crecimiento poblacional, del costo de llevar a cabo esta tarea, de decisiones políticas, etc.

2.5 Reglas de reemplazo de tuberías

Muchos autores han propuesto reglas de reemplazo o de “dedo”, que son consideradas totalmente cualitativas:

- Morris^[15] dio la regla de que si 3 o más roturas ocurrían por cada 300 m de tubería, entonces ésta debería de ser reemplazada; de igual forma, para una tubería de menos de 99.9 m si ocurría una falla, entonces debería ser reemplazada. Desde que esta regla apareció no se especificó cual fue el análisis hecho para encontrar estos números ni tampoco se hizo referencia a que si las fallas estaban referidas a un año específico en la vida útil de las tuberías.



- Puede haber decisiones de reemplazo de tuberías como la hecha en Los Angeles Water System que utilizaron para el análisis, el costo histórico de mantenimiento, la condición del suelo y de las calles, la capacidad hidráulica y la calidad del agua.
- Una forma de calificar cualitativamente que tan dañada está la tubería cuando presenta corrosión es a través de la clasificación propuesta por Kiefner y Maxey^[5], de acuerdo a la tabla 2.5, con lo que se puede tener presente la gravedad del defecto.

Clasificación	% de pérdida de metal
Defecto ligero	Menor al 30% del espesor
Defecto moderado	Entre el 30% y 50% del espesor
Defecto severo	Mayor al 50% del espesor

Tabla 2.5. Clasificación del defecto por corrosión

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO 3. REHABILITACIÓN

La gran variedad de técnicas de rehabilitación que se encuentran disponibles, hace muy difícil la decisión de cual tecnología es la mejor para satisfacer las necesidades específicas del acueducto. Todas las tecnologías de rehabilitación tienen sus ventajas y desventajas, y su aplicación está limitada por el tipo de material de la tubería, diámetros, tiempos y necesidades de rehabilitación.

Decidir cuando darle mantenimiento a las tuberías es importante para mantener operando la línea de conducción; se tienen dos principales objetivos: mantener operando el acueducto económicamente y proporcionar seguridad en su operación.

Actualmente se cuenta con tecnología avanzada para mantenimiento y rehabilitación de tuberías: con equipo para limpieza, para detección de corrosión, técnicas para sustitución del alambre de preesfuerzo, para eliminación de fugas o para revestimiento interior con nuevos materiales con características mecánicas y químicas muy ventajosas, entre otras. Muchas de esas técnicas proponen su aplicación sin la suspensión del servicio y con el mínimo efecto posible sobre la población; no nada más por falta de agua, sino por el uso de técnicas que evitan abrir zanjas para descubrir las tuberías, con lo que se reduce la interrupción de muchas de las actividades cotidianas propias de las zonas urbanas.

3.1 Métodos aplicables a defectos por corrosión, fugas, roturas, rasgaduras, abolladuras y pandeo

La corrosión excesiva puede reducir la resistencia de las tuberías por debajo de los niveles que son necesarios para cuidar y dar seguridad a la operación de los acueductos. Cuando se encuentra corrosión en una tubería deben llevarse a cabo mediciones para determinar si la sección de tubería corroída es susceptible de permanecer en servicio o deberá ser reparada o reemplazada. Actualmente hay muchos métodos para evaluar los defectos por corrosión en tuberías, así como múltiples opciones para repararlos. Defectos tales como fugas, roturas, rasgaduras, abolladuras y pandeo de igual forma ponen en riesgo la operación del acueducto; en este subcapítulo se verán algunas de las técnicas de rehabilitación en tuberías disponibles en el mercado.

3.1.1 Cuando existe fuga en la línea de conducción

La reparación de este tipo de defectos debe guardar la integridad estructural de la tubería y soportar la presión de trabajo del sistema. Algunos métodos de reparación para defectos cuando existe fuga e incluso para aquellos donde la profundidad de pérdida de metal sea mayor que el 80% del espesor de pared del tubo, se mencionan a continuación:

- Cortar y reemplazar
 - Envolvertes metálicas (mangas tipo B)
 - Grapas mecánicas con pernos
-
- Cortar y reemplazar

La práctica de reemplazar tubería de cualquier tipo tiene la ventaja de recuperar la seguridad en la integridad estructural de la nueva sección de tubería; este tipo de reparación corrige cualquier defecto presente en la sección reemplazada. En lugares donde la tubería es objeto de cargas axiales, se prefiere el reemplazo del tubo sobre los métodos de reparación con mangas, con el fin de asegurar que la carga axial sea transferida a través de la sección de tubería reparada. Aunque este método tiene numerosas ventajas, el mayor inconveniente del remplazo del tubo es la necesidad de suspender la operación y vaciar la sección o tramo de tubería a reemplazar.

Este método es uno de los más caros debido al costo de sacar de operación el tramo de tubería a reparar; esto es práctico solo en el caso de reparar una sección de tubería larga y en paralelo con múltiples acciones de mantenimiento y rehabilitación.

- *Envolvertes metálicas (mangas tipo B)*

Esta técnica es aplicada a tuberías de acero, adecuada para reparar defectos pequeños tales como: rasgaduras, abolladuras o áreas corroídas con fuga; la manga prefabricada es colocada alrededor del área afectada, consiste en soldar dos medias cañas de acero que cubren la totalidad del perímetro del tramo a reparar.

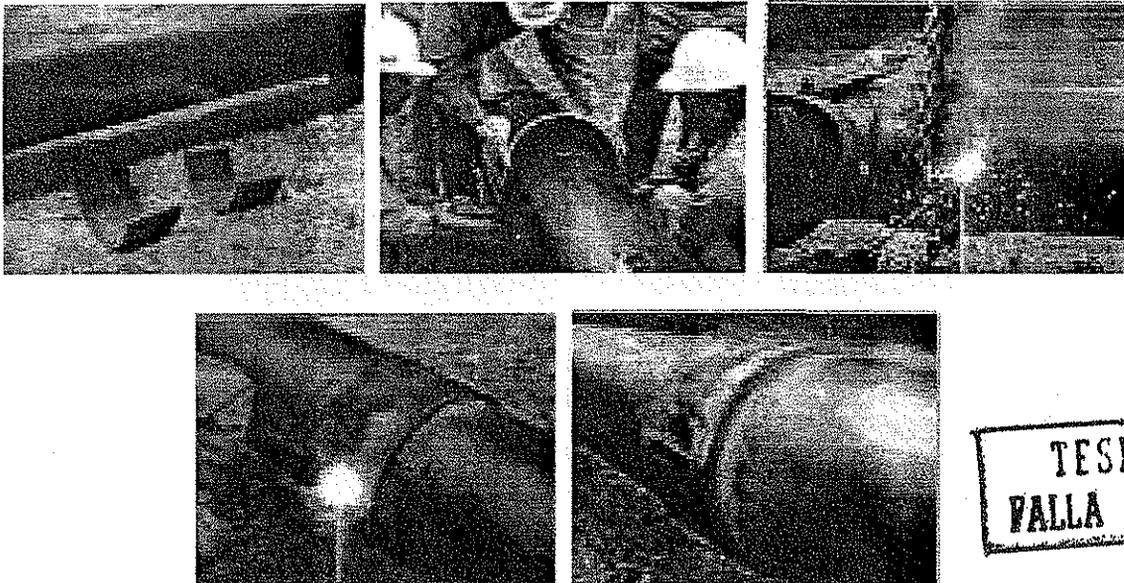
Este tipo de envolventes con 2 medias cañas de acero, conocidas como mangas tipo B, deben llevar soldadura tanto longitudinal como circunferencial. La envolvente completa deberá tener al menos la especificación de la tubería que está siendo reparada y longitud no menor que 0.10 m (4 in)

La sucesión de fotos 3.1 ilustra el procedimiento de colocación de las medias cañas de acero.

Para que esta reparación sea aceptada como definitiva debe de cumplir con el siguiente procedimiento:

- ✓ Las envolventes completas deben ser habilitadas con tubería probada hidrostáticamente de especificación y/o espesor igual o mayor que del tubo a reparar
- ✓ Tener longitud mayor que 0.1 m (4") y menor que 2 m
- ✓ Inspeccionar mediante pruebas no destructivas las soldaduras realizadas, así como el empleo de soldadores calificados para la realización de los trabajos

Este tipo de mangas tienen la ventaja de contener la presión en la tubería, pero posee problemas de fabricación, de soldadura y de manejo de personal calificado.

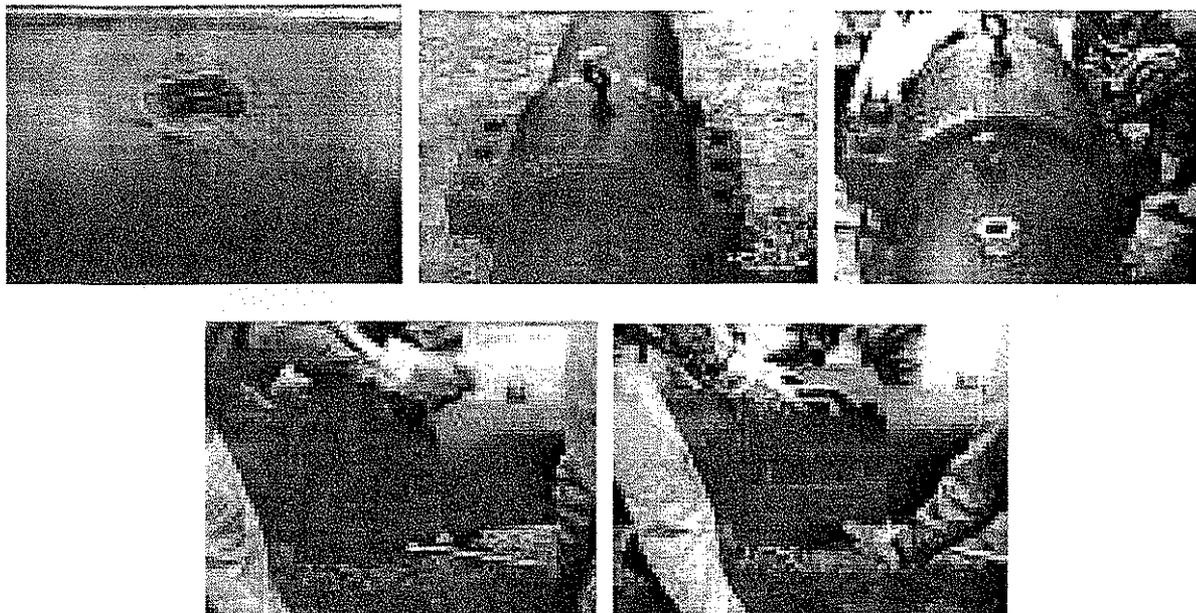


Fotos 3.1. Procedimiento de colocación de las envolventes metálicas

➤ *Grapas mecánicas con pernos*

Este tipo de abrazaderas son usadas en tubería de acero para defectos tales como: abolladuras, rasgaduras y áreas corroídas con o sin fuga; son muy útiles cuando la tubería presenta fuga y no es posible detener la operación de la línea de conducción.

Las abrazaderas son diseñadas para soportar la presión a tubo lleno, usan sellos o empaques interiores que permiten la hermeticidad del dispositivo. Consiste de dos medias conchas de acero, con tornillos y tuercas de sujeción. La sucesión de fotos 3.2 ilustra este dispositivo.



Fotos 3.2. Colocación de grapa o abrazadera mecánica con pernos

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Actualmente existen diseños que permiten el procedimiento de soldadura en los sentidos axial y circunferencial e inclusive en tornillos y tuercas de sujeción; cuando se suelda el dispositivo, se debe tener cuidado de no dañar los empaques interiores que permiten su hermeticidad. Para defectos por abolladuras se recomienda rellenar el espacio entre camisa y tubo con resina epóxica.

Para que este tipo de reparación sea aceptada como definitiva debe cumplir con el siguiente procedimiento de instalación:

- ✓ Limpiar y lubricar todos los tornillos y tuercas antes de su instalación
- ✓ Todas las tuercas deberán ser apretadas uniformemente tal y como lo indica la tabla de torque del fabricante
- ✓ Verificar la instalación del dispositivo al torque recomendado: se debe tener presente que un ligero incremento en torque a un tornillo puede causar un decremento en torque del tornillo adyacente.
- ✓ Los pasos para llevar a cabo el procedimiento de soldadura de las dos medias conchas, tornillos y tuercas deberán hacerse bajo la siguiente secuencia:
 1. Soldadura de filete en los extremos de las dos medias conchas
 2. Soldadura lateral en las aberturas entre las dos medias conchas
 3. Reapriete de tornillos y tuercas
 4. Soldadura alrededor de las tuercas con las barras laterales de las medias conchas
 5. Soldadura entre tornillos y tuercas
- ✓ Se deberá monitorear el calor generado por el procedimiento de soldadura, particularmente en la zonas adyacentes a los empaques con el fin de permitir el enfriamiento del área afectada. Es necesario un reapriete periódico a tuercas durante la aplicación de la soldadura para evitar que estos se aflojen con la dilatación del acero.

Estos dispositivos son simples en concepto, pero tienen la desventaja de que son muy pesados, requiriendo de más equipo y personal para instalarlos.

Para estos procedimientos de rehabilitación, la aplicación de soldadura directa al tubo es una tarea en la cual se debe llevar un control muy riguroso sobre la soldadura a emplear, certificación de soldadores que realicen estos trabajos y verificación de la soldadura a través de inspección radiográfica o ultrasonido.

3.1.2 Cuando no existe fuga en la línea de conducción

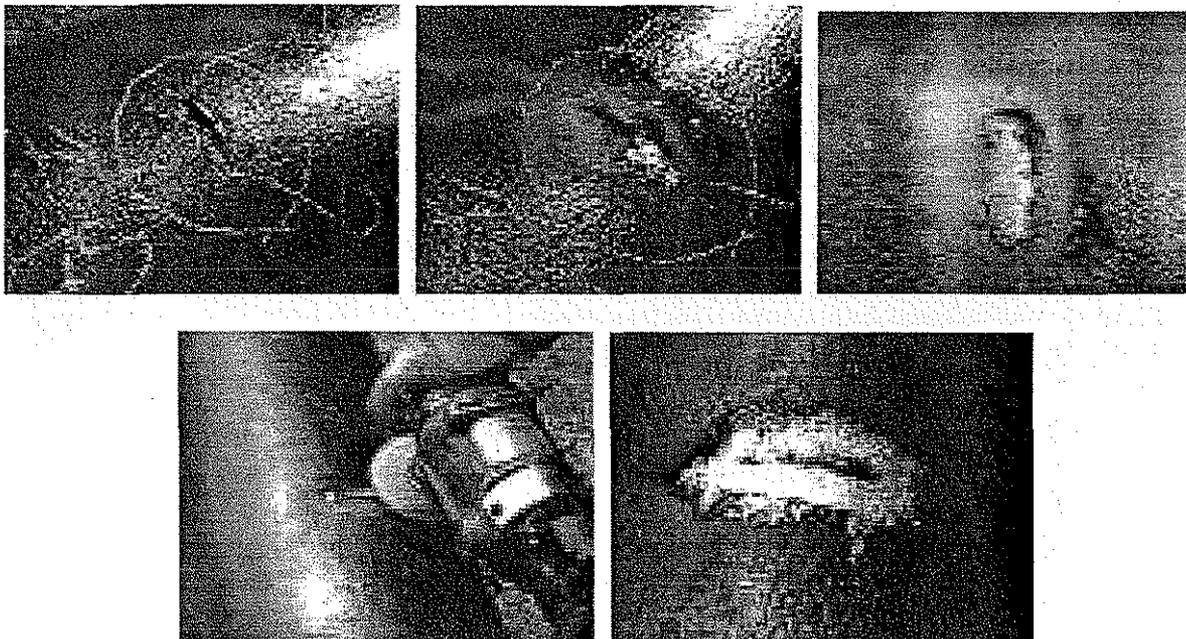
Los métodos para reparación de defectos con fuga quizá también puedan ser usados para defectos sin fuga; para este último tipo de daños en tuberías que deben ser reparados, se cuenta con varios métodos de rehabilitación:

- Aportación por soldadura
- Envoltentes metálicas (mangas tipo A)
- Parche metálico
- Refuerzo mecánico de fibra de vidrio (*Clock Spring*)
- Envoltentes metálicas embebidas en resina epóxica (*EMERE*)
- Refuerzo del alambre pretensado en tubería de concreto

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- Aportación por soldadura

Este tipo de procedimiento es aplicable a tuberías de acero que presentan áreas pequeñas de corrosión, es hecha con electrodos de bajo hidrógeno y se recomienda no hacer este tipo de reparación para tubos susceptibles a la fractura, es decir, con alto contenido de carbono. La sucesión de fotos 3.3 muestra el procedimiento de aplicación.



Fotos 3.3. Procedimiento de colocación de soldadura

➤ *Envolventes metálicas (mangas tipo A)*

Este tipo de mangas es una variante de las envolventes metálicas tipo B, son usadas en tuberías de acero, y su principal diferencia es que no se aplica soldadura circunferencial a las medias cañas y solo cuenta con soldadura en la dirección axial.

El método consiste en encamisar la tubería con dos mitades de tubo de acero unidas por soldadura longitudinal; es un método de reparación efectivo y ampliamente usado.

Aunque el uso de este tipo de mangas no siempre reducen el esfuerzo de membrana en la tubería original, si proporcionan refuerzo al defecto, incrementando su presión de falla hasta niveles aceptables debido a que controlan el pandeo en el área corroída.

En el área corroída, la presión interna empuja de forma radial la pared delgada induciendo el pandeo; durante la instalación de la manga este defecto es reducido un poco cuando la presión en la línea es reducida. El pandeo no puede ser removido completamente, debido a la deformación plástica que puede existir una vez que se descarga o reduce la presión en la línea de conducción.

Para la reducción o control del pandeo la efectividad radica en el llenado del defecto con un epóxico rígido (de baja compresibilidad) o con un compuesto equivalente. El epóxico de relleno en el defecto transfiere la presión hacia la manga y ayuda a controlar el pandeo.

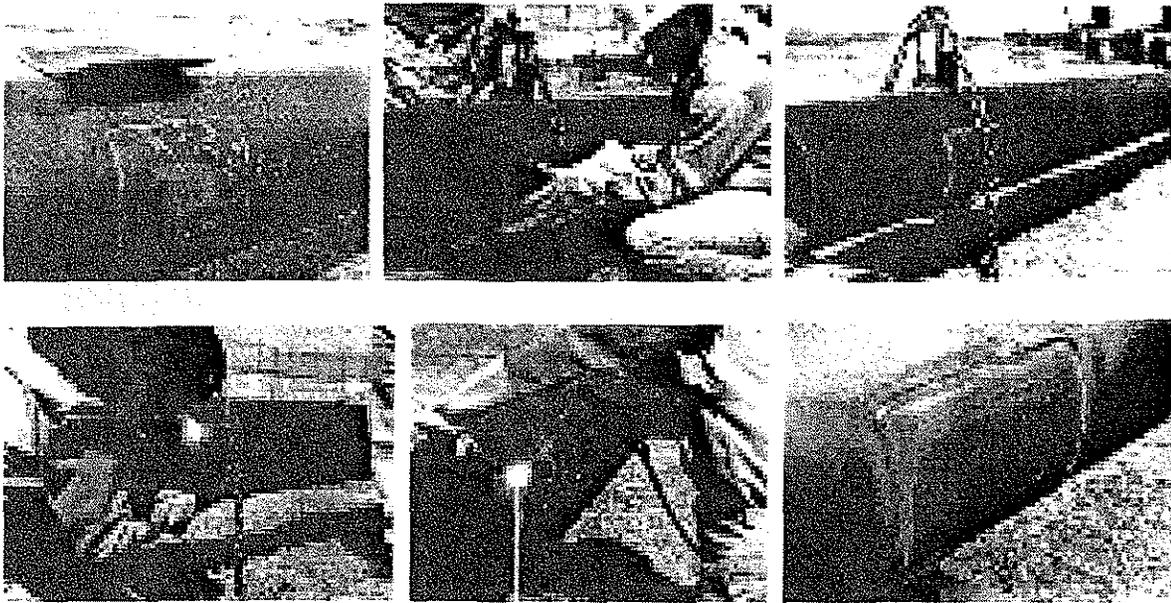
Debido a que estas mangas no reciben toda la presión, no necesitan ser tan resistentes como la tubería en la línea de conducción. Kiefner sugiere que la manga para defectos menores que $20 * D * t$ de largo sea al menos de $2/3$ partes del espesor a reparar, D y t en metros; para defectos mayores deben ser tan gruesos como lo son las tuberías dañadas, es decir, del mismo espesor.

Una desventaja de este método de reparación es que se puede crear una hendidura en forma de espacio anular entre la manga y la tubería que quizás sea difícil de proteger contra corrosión externa.

➤ *Parche metálico*

Este tipo de reparación es usada para áreas de corrosión con o sin fuga. El parche deberá tener aristas redondeadas y las dimensiones no deberán exceder la mitad de la circunferencia de la tubería a rehabilitar.

La especificación del parche deberá ser igual o mayor que la del tubo a reparar. De igual forma se deberá tener un estricto control sobre el tipo y calidad de soldadura a emplear, así como de los soldadores que realicen el trabajo de reparación. La secuencia de fotos 3.4 muestra el proceso de rehabilitación.



Fotos 3.4. Colocación del parche metálico

➤ *Refuerzo mecánico con fibra de vidrio (Clock Spring)*

Una alternativa al refuerzo con mangas de acero es el método *Clock Spring*, desarrollado por *Gas Research Institute* y fabricado por *Clock Spring Company*. Consiste en una cinta de fibra de vidrio que tiene una 'memoria' resultado del método de manufactura, que lo aprieta cada vuelta que da en la tubería dañada, formando así un cilindro con varias capas concéntricas.

Cuando se enrolla la fibra de vidrio con un adhesivo adecuado el resultado es una estructura que provee un reforzamiento circunferencial. Un *Clock Spring* estándar es de 0.30 m (12 in) de longitud y 12.7 mm (0.5 in) de espesor cuando está instalado y un peso de entre 13 y 30 kg dependiendo del diámetro. Múltiples *Clock Spring* pueden ser instalados de manera adyacente, intercalados uno del otro para reparar defectos con mayor longitud.

Este método es apropiado para reparar la mayor cantidad de defectos por corrosión, sin embargo, para casos extremos con defectos y profundidades grandes el método sólo puede ser usado como una reparación temporal.

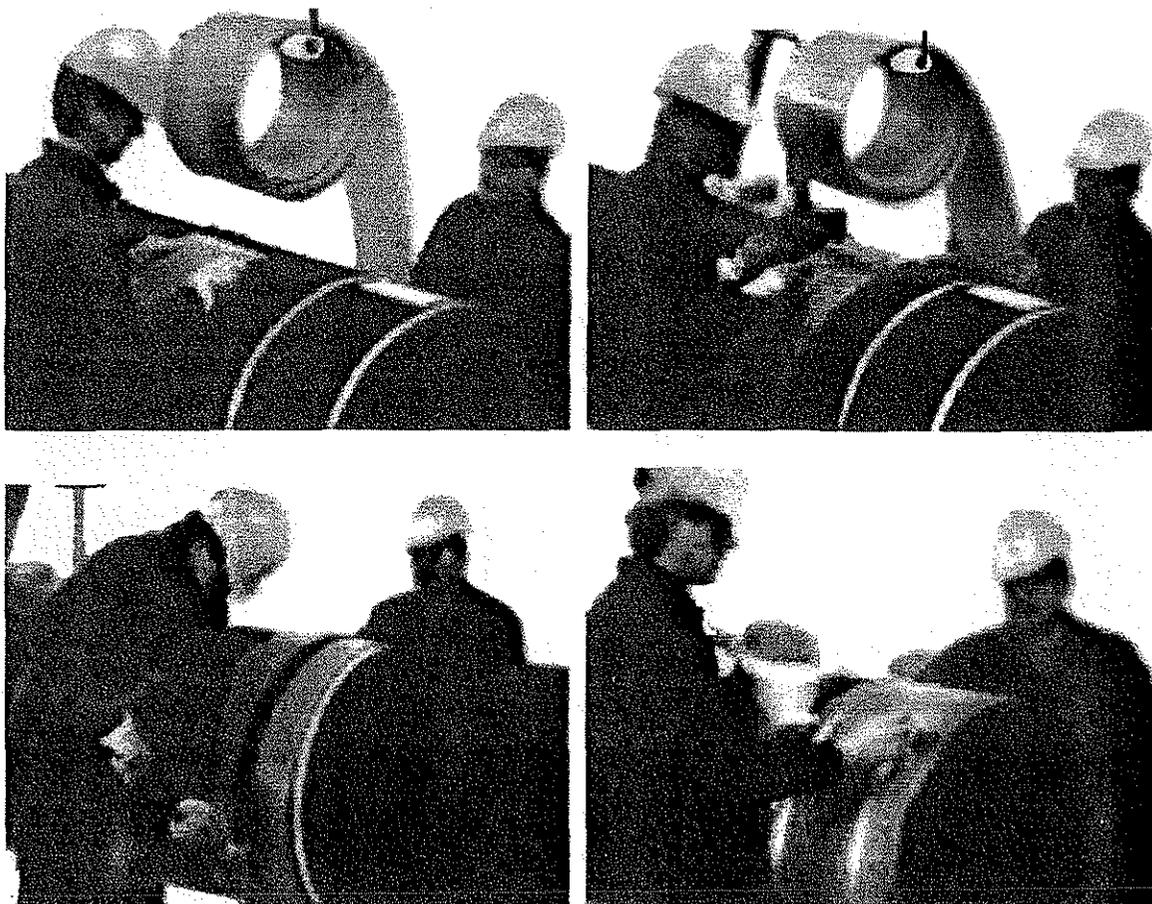
Pruebas de ruptura llevadas a cabo por diversas instituciones y supervisadas por *Gas Research Institute* han demostrado que el refuerzo *Clock Spring* puede restaurar el esfuerzo permisible hasta alcanzar al menos la presión de diseño del tubo.

Entre las mayores ventajas de las cintas *Clock Spring* para refuerzo de tuberías están la facilidad y rapidez de instalación; el procedimiento de aplicación del refuerzo es:

- ✓ se requiere de 8 cm de espacio debajo de la tubería para que la cinta pueda ser instalada mientras la línea de conducción está en operación.
- ✓ El área donde se va a instalar el refuerzo deberá limpiarse con chorro de arena hasta obtener un perfil de anclaje adecuado (0.025 mm es suficiente)

- ✓ Una vez conseguido el perfil de anclaje, se aplica el adhesivo. El adhesivo, además de funcionar como elemento de unión entre la tubería y la cinta Clock Spring, sirve como iniciador de relleno del área corroída. El adhesivo debe ser aplicado en cada vuelta de la cinta
- ✓ La memoria del diámetro de la cinta aprieta inicialmente alrededor de la tubería y se usa una palanca de tensión para asegurar dar el apriete final
- ✓ La instalación requiere de un tiempo aproximado de 25 minutos y tomando en cuenta el tiempo de curado del adhesivo se necesitan menos de 2 horas para que la línea de conducción regrese a su presión de operación normal

En la secuencia de fotos 3.5 ilustra el método *Clock Spring*



Fotos 3.5. Método *Clock Spring*

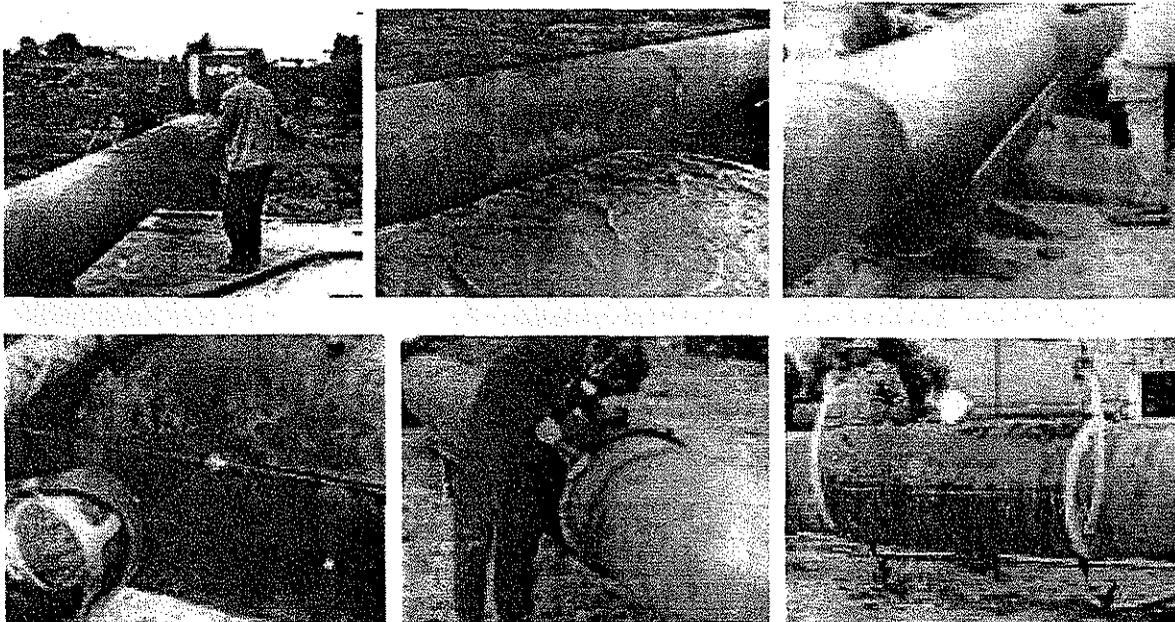
➤ *Envolventes metálicas embebidas en resina epóxica (EMERE)*

Esta técnica fue desarrollada para ser usada en tuberías de acero, utiliza dos medias cañas soldadas a tope, las cuales son embebidas en resina epóxica, son instaladas por medio de tornillos controladores con la intención de dejar espacio anular entre el tubo a reparar y éstas. El espacio anular es sellado en sus extremos y llenado con fluido epóxico. El curado de la resina epóxica es de 24 horas y es aceptada como reparación definitiva en diferentes países.

British Gas ha desarrollado un concepto de manga de acero que deja un espacio anular entre la tubería y el escudo o manga; el procedimiento de instalación de la *EMERE* es el siguiente:

- ✓ Se requiere un espacio de al menos 0.6 m por debajo de la tubería a reparar
- ✓ Limpieza del área afectada con chorro de arena a presión para obtener un perfil de anclaje de al menos 0.0254 mm
- ✓ Colocación de las medias cañas, centrándolas mediante los tornillos controladores, dejando un espacio anular uniforme entre el tubo y la *EMERE*
- ✓ Se aplica soldadura longitudinal a tope entre las dos medias cañas
- ✓ Colocación de resina de poliéster de curado rápido en los extremos de la *EMERE* mediante espátula
- ✓ Con el uso de un sistema de bombeo de baja presión, se llena el hueco anular desde la parte inferior de la *EMERE* con una lechada de epóxico altamente rígido; los tornillos de venteo alineados en la parte superior son utilizados como testigos de la presencia del epóxico, apretándolos en el momento de observar fuga y posteriormente son esmerilados
- ✓ El curado de la resina epóxica es de 24 horas, por lo cual la presión en la línea puede ser incrementada hasta la presión de operación normal sin riesgo alguno

La sucesión de fotos 3.6 ilustra el procedimiento de instalación. Esta técnica de reparación puede ser tardada, pero tiene una gran ventaja: la capacidad para reforzar toda el área distorsionada y compleja del defecto; además, cubre toda su geometría. Este sistema asegura el pleno contacto y el apoyo estructural para el defecto y tiene una amplia tolerancia para reparar tuberías en líneas de conducción de 0.1 a 1.42 m (4 a 56 in) de diámetro.



Fotos 3.6. Envoltentes metálicas embebidas en resina epóxica

➤ *Refuerzo del alambre pretensado en tuberías de concreto*

Cuando una sección de tubería de concreto debe ser reparada debido a la pérdida excesiva del preesfuerzo en el alambre por acción de la corrosión, es necesario llevar a cabo su rehabilitación; para este caso se cuenta con el método de reparación de tubería de concreto pretensada mediante tendones.

Este método de refuerzo de la tubería requiere de la colocación de tendones de acero alrededor de la circunferencia externa del tubo. El tendón de 7 hilos de alambre va cubierto con grasa anticorrosiva y envueltos en material de polipropileno. La tensión en el tendón se distribuye sobre los 360° de la circunferencia del tubo; El espaciamiento y la fuerza de tensión es diseñada para cada sección del tubo. El objetivo del refuerzo es proporcionar al tubo su compresión original y reestablecer así la integridad estructural de la línea de conducción. La fuerza de tensión requerida es aplicada a los tendones a través de una prensa hidráulica y, por medio de coples de hierro dúctil y anclas acuñadas en tres partes, se permite tensar los extremos del tendón.

Para proteger el área reparada de la corrosión se cuenta con terminales de conexión en cada tendón, que permiten incorporarlos al sistema de protección catódica de la tubería. Los coples son rellenados con grasa anticorrosiva y los tendones son cubiertos con cemento de mortero para proporcionar protección química y física a la zona rehabilitada. De esta forma se tiene un sistema de protección de cuatro etapas: grasa anticorrosiva, envoltura de polipropileno al tendón, protección catódica y protección con mortero de cemento.

Algunas de las ventajas del método son:

- ✓ Facilidad y rapidez en la instalación de tendones
- ✓ Resistencia a condiciones ambientales adversas (suelos agresivos)
- ✓ Capacidad de instalar bajo condiciones físicas adversas del sitio
- ✓ Su bajo costo

Una desventaja del método, es la necesidad de poner fuera de servicio el tramo de tubería a reparar debido a que los trabajos de rehabilitación requieren dejar el área circunferencial en la zona corroída sin alambre de preesfuerzo.

Un ejemplo de aplicación de este método fue llevado a cabo en la parte a gravedad del acueducto Río Colorado – Tijuana, la siguientes fotos muestran la sección de tubería reparada.

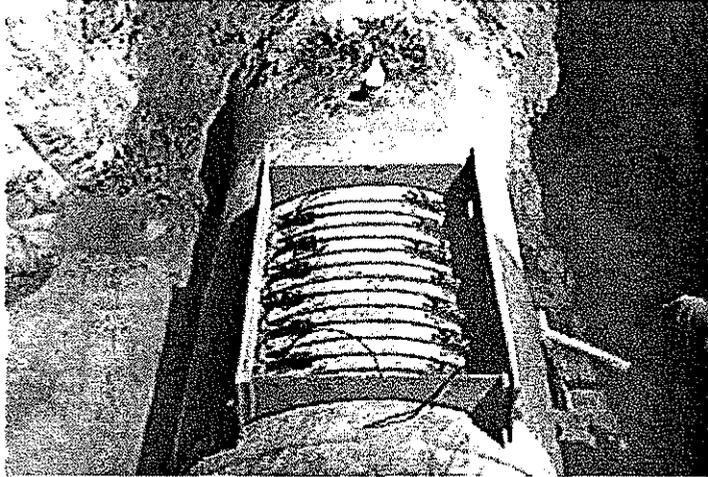


Foto 3.7. Refuerzo de tubería de concreto presforzada mediante tendones



Foto 3.8. Detalle de la unión entre coples y anclas

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.1.3 Protección catódica

La protección catódica es el método más efectivo para el control de la corrosión a través de la aplicación de corriente eléctrica externa, con lo que se logra mantener expuesto un metal en un ambiente corrosivo por tiempo indefinido sin causarle pérdida de metal.

Para prevenir o detener la corrosión en un metal expuesto a medios agresivos, la base de la protección catódica es convertir u obligar a que la zona anódica del metal se comporte como cátodo; es decir, se evita que exista flujo de corriente de la zona anódica hacia el electrolito, con lo que se logra detener el flujo de iones del metal y la corrosión. Para lograr esto, se requiere aplicar corriente eléctrica externa ya sea por medio del sistema de ánodos galvánicos o el sistema de corriente impresa.

Sistema de ánodos galvánicos o de sacrificio

Al igual que una celda de corrosión, para formar una celda galvánica o protectora, se requiere que exista: un ánodo, un cátodo, un electrolito y un circuito de retorno para la

corriente. El cátodo será formado por toda la estructura metálica a proteger, incluso la zona corroída (ánodo) la cual deberá ser eléctricamente continua para asegurar una protección completa. El electrolito es el suelo y el ánodo, así como la trayectoria de retorno, son dos elementos que se adicionan a la celda protectora, ver figura 3.7.

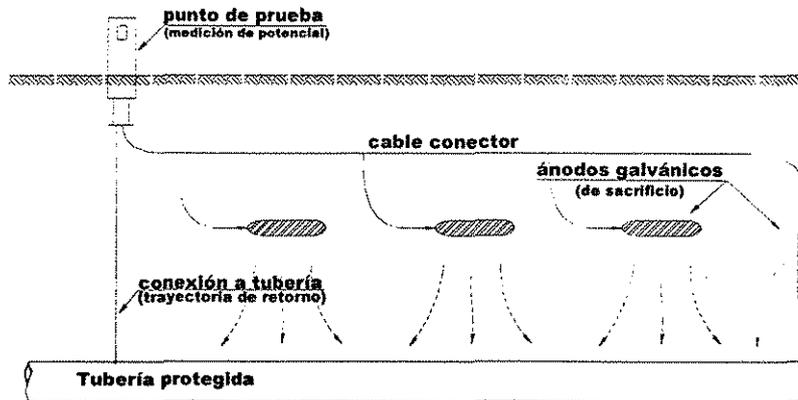


Figura 3.7. Tubería protegida catódicamente mediante ánodos de sacrificio

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Para generar la corriente necesaria o una diferencia de potencial, se seleccionan los ánodos de la serie galvánica, éstos son barras o varillas de metal destinadas a corroerse los cuales después de varios años de servicio deben ser reemplazados.

La batería que proporciona el voltaje o diferencia de potencial entre dos metales puede apreciarse en la tabla 3.2; de esta forma tenemos que la corriente sale del ánodo, en donde se presenta corrosión y entra al electrolito o suelo para después hacer contacto con el cátodo o metal protegido sin causar corrosión.

Los metales de sacrificio usados para protección catódica son principalmente magnesio y sus aleaciones, zinc y aluminio. Este método es usado para proteger tramos cortos de tubería debido a la diferencia de potencial que puede existir entre los metales que funcionan como ánodos y el metal a proteger.

Serie galvánica o electromotriz*		
	Metal	Voltios
ánodo ↑ ↓ cátodo	Magnesio comercial puro	-1.75
	Aleación de magnesio (6% Al, 3%Zn, 0.15%Mn)	-1.60
	Zinc	-1.10
	Aleación de aluminio (5% Zn)	-1.05
	Aluminio comercialmente puro	-0.80
	Acero suave (limpio y brillante)	-0.5 a -0.8
	Acero suave (oxidado)	-0.2 a -0.5
	Hierro fundido (sin grafito)	-0.50
	Plomo	-0.50
	Acero suave en concreto	-0.20
	Cobre, latón, bronce	-0.20
	Hierro fundido con alto contenido de silicón	-0.20
	Escala de molibdeno en acero	-0.20
	Carbono, grafito, coque	+0.30

* Potenciales típicos medidos entre el metal enterrado y un electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre en contacto con el suelo

Tabla 3.2. Serie galvánica o electromotriz

Los ánodos de sacrificio son colocados a lo largo de la línea de conducción para lograr una distribución uniforme de corriente. La determinación de las corrientes de protección es empírica, en la mayoría de los casos, se requieren ajustes de tamaño del ánodo y del valor de voltaje aplicado, hasta que se llegue al nivel de protección deseado; en la figura 3.8 se ilustra la forma de conocer el voltaje de la tubería a proteger.

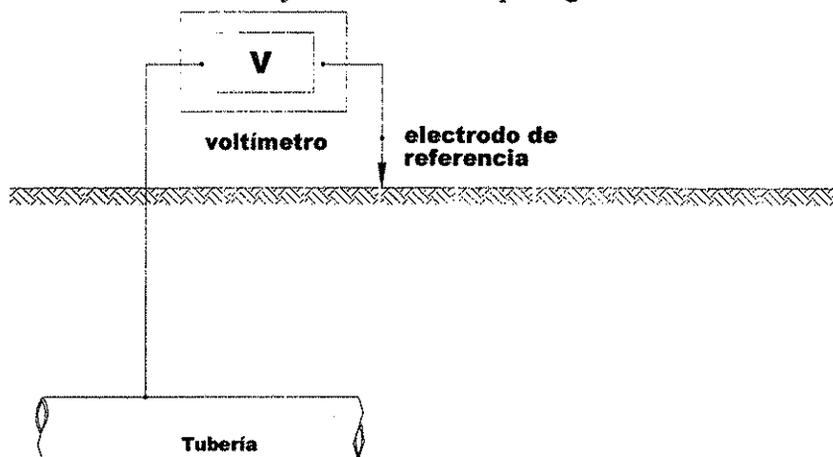


Figura 3.8. Medición del potencial de corrosión electroquímico de la tubería a proteger

Es conveniente aplicar material de relleno a los ánodos de sacrificio ya que si se instalan descubiertos, el producto de la corrosión puede volver pasivo al ánodo o causar un ataque corrosivo no uniforme. El material de relleno utilizado debe cumplir con:

1. Proporcionar un ambiente uniforme
2. Con capacidad para retener humedad
3. Retardar o prevenir la pasividad del ánodo

El relleno generalmente está compuesto por mezclas de yeso hidratado, arcilla bentonítica y sulfato de sodio.

Sistema de corriente impresa

Los sistemas de corriente impresa están formados por una unidad rectificadora para suministrar corriente eléctrica directa, una serie de ánodos auxiliares insertados en el suelo (cama anódica). La corriente eléctrica se envía desde la terminal positiva a los ánodos cama-tierra desde donde es impresa en la tierra para que viaje y entre a la estructura protegida, un cable conector regresa la corriente hasta la terminal negativa del rectificador. En esta forma la estructura funciona como un cátodo mientras que la cama anódica se corroe. Este procedimiento se ilustra en la figura 3.9

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

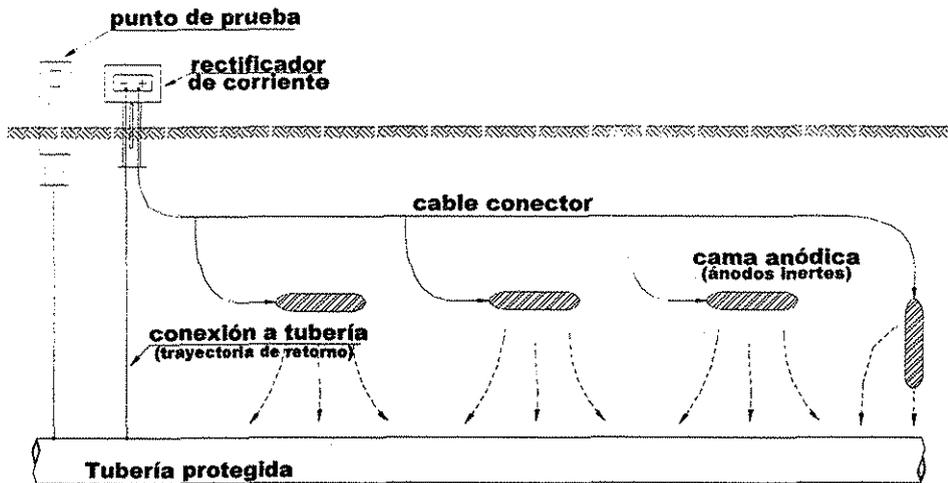


Figura 3.9. Tubería protegida catódicamente mediante corriente impresa

Los ánodos auxiliares utilizados en una cama anódica pueden ser de aluminio, grafito, hierro, plomo y titanio platino.

Este sistema es utilizado para proteger longitudes de tubería grandes y en suelos de alta resistividad; sin embargo, existe el peligro de daño por corrientes parásitas, además de que los costos de instalación y mantenimiento son mayores comparados con el sistema de ánodos galvánicos.

Es importante mantener la continuidad eléctrica del tramo de línea protegida, ya que actúa como parte de la trayectoria de retorno de corriente; de igual forma, la tubería debe quedar eléctricamente aislada de cualquier otro tipo de estructura metálica o de concreto que no esté considerada en la implantación del sistema de protección catódica, tales como soportes de tubería, estructuras de puente, túneles, pilotes, etc. Las juntas aislantes deben de instalarse en lugares tales como: cabezales de pozos, en el origen de los ramales, en la entrada y salida de las estaciones de bombeo, en uniones de metales diferentes para protección contra corrosión galvánica, en el origen y final del tramo de tubería protegida catódicamente y en la unión de tuberías enterradas con superficiales.

La corrosión por corrientes parásitas de igual forma debe tenerse en cuenta, por ejemplo, en un sistema de protección catódica donde la estructura a proteger es un tanque de acero y además se encuentra presente una línea de conducción de acero, si no existe continuidad eléctrica entre tanque y tubería, el fenómeno de corrosión se presentará en la tubería; el problema es resuelto al hacer un puenteo entre estas dos estructuras, ver figura 3.10

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

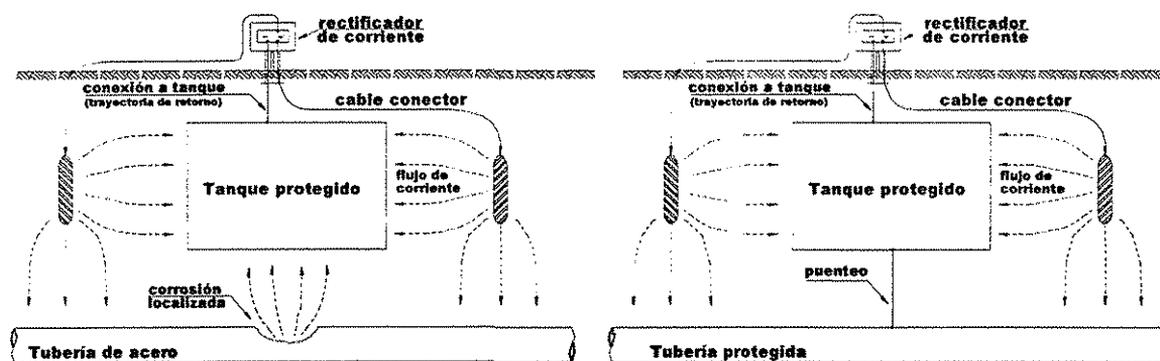


Figura 3.10. Corrosión por corrientes parásitas y su solución

Los sistemas que incorporan protección catódica requieren monitoreo y mantenimiento periódico, para asegurar que se ha suministrado la protección adecuada.

De acuerdo a la norma *NOM-008-SECRE-1999* acerca del control de la corrosión externa en tuberías de acero enterradas y/o sumergidas, para proteger catódicamente la tubería se debe cumplir, como mínimo, con uno de los siguientes criterios:

1. Un potencial tubo/suelo (catódico) mínimo de -850 milivolts, medido respecto a un electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre, en contacto con el electrolito
2. Un potencial de protección tubo/suelo (catódico) de -950 milivolts, cuando el área circundante de la tubería se encuentre en condiciones anaerobias y estén presentes bacterias sulfatoreductoras

El potencial tubo/suelo máximo permisible no deberá exceder de -2.5 volts.

Para proteger catódicamente el acero embebido en concreto, un potencial de -710 milivolts es considerado adecuado.

Con el fin de reducir el riesgo de daño a personas, los ánodos y el material de relleno deben estar enterrados, como mínimo, a 0.9 m de profundidad, además de aislar y proteger de daños mecánicos a los cables eléctricos de interconexión.

Una vez instalado el sistema de protección catódica se debe verificar el nivel de protección a lo largo de la trayectoria de la tubería y establecer pruebas de rutina para verificar el comportamiento del sistema de protección.

Todos los sistemas de tubería de acero deben contar con un sistema de protección catódica permanente en un plazo no mayor que un año, posterior a la terminación de su construcción, con estaciones de registro o puntos de prueba para la medición del potencial tubo/suelo y evaluación de la corriente eléctrica del sistema de protección catódica.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

3.1.4 Recubrimiento exterior

Los recubrimientos aplicados a líneas de conducción pueden sufrir durante su vida útil daños en la integridad de la película, lo que puede repercutir en su funcionalidad, reduciendo su durabilidad y capacidad de protección. Estos daños pueden ser de origen mecánico, químico o de naturaleza inherente a las actividades de operación y mantenimiento de los sistemas de tuberías.

Después de haber rehabilitado una sección de tubería o para líneas de conducción existentes o nuevas, es conveniente instalar un recubrimiento externo, el cual proveerá resistencia a la corrosión por actuar como una barrera entre tubería y suelo.

En tuberías de concreto reforzado, el recubrimiento de mortero de cemento es una buena barrera que aísla al alambre de preesfuerzo del medio que lo rodea. El recubrimiento es usado para protección contra corrosión, evita que penetre y se ponga en contacto la superficie del alambre de preesfuerzo con el oxígeno, bióxido de carbono y varias sales. El alto *ph* del ambiente del cemento hidratado inhibe la corrosión; sin embargo, el fisuramiento del recubrimiento de mortero puede remover la protección permitiendo el inicio de la corrosión.

La selección errónea del tipo de recubrimiento a usar es una de las causas más importantes de la falla o deterioro en el material. Para evitar este error, su selección debe basarse en consideraciones generales mínimas, resultados en aplicaciones anteriores, en propiedades físicas y químicas del recubrimiento, en condiciones de exposición y servicio, así como la relación costo - beneficio.

Existen gran cantidad de productos diseñados para actuar como recubrimientos dieléctricos en tuberías y accesorios que conforman la línea de conducción, la función principal de estos elementos es satisfacer las necesidades específicas de la línea, las características más importantes que deben cumplir los recubrimientos son mencionadas a continuación:

- ✓ Excelente aislamiento, que impida el paso de corriente eléctrica, así como posibles infiltraciones de agua
- ✓ Resistencia al deterioro por contacto con el suelo
- ✓ Buena adhesión al contorno de la superficie a recubrir
- ✓ Comportamiento mecánico adecuado para soportar esfuerzos de tensión
- ✓ Fácil aplicación, ya sea manual o mecánica
- ✓ Resistente y moldeable a la superficie a proteger
- ✓ Tiempo de aplicación moderado
- ✓ Para recubrimientos líquidos, se requiere de un secado rápido
- ✓ Con excelentes propiedades para acomodarse a cambios de volumen por expansión o contracción
- ✓ Resistente a rasgaduras
- ✓ Terminados uniformes
- ✓ Bajo costo

Una vez realizados los trabajos, se procede a inspeccionar el sistema de recubrimiento anticorrosivo a través de la evaluación de: la profundidad del perfil de anclaje, grado de limpieza, adherencia, curado, espesores de película, apariencia del producto y continuidad.

El recubrimiento aislante, proporcionado a la línea de conducción, puede mejorar la distribución de la corriente de protección catódica. En la práctica, se acostumbra usar recubrimiento exterior junto con la aplicación de protección catódica ya que la distribución de corriente es controlada mejor, comparada con una línea de conducción desnuda. Además, la corriente total y número de ánodos utilizados se reduce.

El éxito de un sistema de recubrimientos depende principalmente de: la preparación de la superficie (limpieza), correcta aplicación de los recubrimientos y de la elección adecuada del recubrimiento para el medio corrosivo a que va a estar expuesto.

3.2 Métodos aplicables a problemas de incrustación y corrosión interior

Los acueductos con mucho tiempo de operación, presentan a menudo depósitos de material fuertemente adherido en la pared interior de tuberías y en otras ocasiones corrosión interna. Para llevar a cabo su rehabilitación existen diversas técnicas que mitigan e incluso eliminan el problema de corrosión e incrustación en el interior de los tubos.

La limpieza interior de tuberías es una técnica ampliamente usada en los sistemas de conducción de agua la cual puede disminuir significativamente el espesor del material adherido e incluso eliminarlo, dependiendo del método utilizado. Para eliminar el problema de corrosión interior e incrustaciones se han desarrollado diversas metodologías, las cuales se pueden agrupar en dos categorías: inserción de tubería nueva dentro de otra existente y recubrimiento interior.

La gran mayoría de técnicas existentes requieren de trabajos previos de limpieza interior, por lo que su empleo debe tener el balance apropiado entre llevar a cabo una buena limpieza y evitar el daño estructural en tuberías; es por esto que las técnicas más agresivas deberían utilizarse con precaución.

3.2.1 Limpieza de tuberías

La limpieza interior de tuberías es ejecutada mediante diversos procedimientos, dependiendo de las características geométricas y topográficas de la línea, tipo de tubería, tipo de accesorios en la conducción, temperatura ambiental y formas de operar del acueducto.

La limpieza puede ser clasificada de acuerdo al tipo de interrupción que se haga en la operación normal del acueducto. El uso de dispositivos tipo bala o pigs de limpieza no requiere del paro total en la operación de la línea de conducción, pero sí un control cuidadoso sobre las maniobras de cierre y apertura de válvulas y compuertas, así como del número de equipos de bombeo funcionando, es decir, depende de las características particulares de cada acueducto. De igual forma hay métodos de limpieza que requieren del

vaciado de la línea o tramo de tubería a limpiar, a través del uso de máquinas de chorro de agua o aire a altas presiones y de dispositivos con cuchillas adosadas.

➤ *Pigs de limpieza*

Uno de los procedimientos de limpieza interior de tuberías más utilizados, es el uso de pigs, también conocidos como balas. Estos dispositivos presentan tres formas básicas: tipo bala, tipo mandril y esferas.

Tipo bala. Son dispositivos en forma de bala, tienen base cóncava y son fabricados de espuma de poliuretano de alta densidad. Tienen una longitud aproximada de dos veces el diámetro del tubo a fin de reducir la posibilidad de que vuelquen y su diámetro es ligeramente mayor que el de la tubería, con el objeto de ejercer un arrastre por fricción entre la superficie exterior de la bala y la pared interior del tubo.

Tipo mandril. Este tipo de dispositivos están constituidos de un cuerpo cilíndrico sólido de acero, aluminio o plástico, llevan adosadas copas o discos intercambiables del diámetro requerido que proporcionan el sellado y cuentan con cepillos de alambre que van distribuidos perimetralmente, los cuales proporcionan el efecto de raspado sobre la pared interior del tubo.

Tipo esfera. Estos dispositivos son fabricados de espuma de poliuretano de alta densidad o pueden ser elaborados de plástico para ser inflados de agua o algún otro líquido pero nunca de aire debido a su alta compresibilidad.

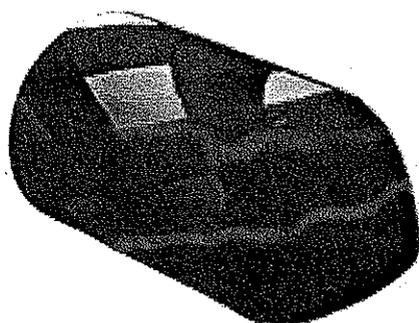


Foto 3.9. Pig tipo bala

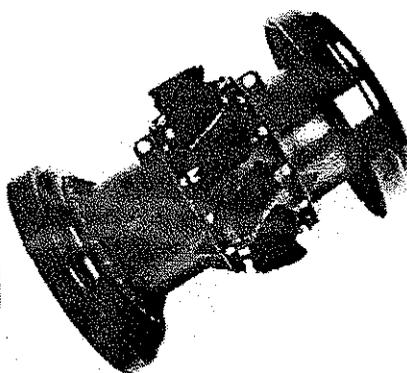


Foto 3.10. Pig tipo mandril

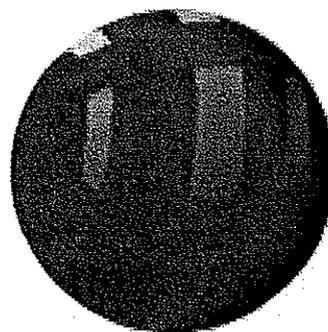


Foto 3.11. Pig tipo esfera

Una característica en la clasificación de los pigs es la dureza de su material, la escala del durómetro A es empleada para medir la dureza de plásticos parecidos al caucho, por ejemplo, según Harper ⁷, una dureza que varía entre 30 y 40 corresponde a una liga de hule, entre 50 y 60 a una llanta de automóvil y de 70 un tacón de zapato. Los diablos típicos presentan en su cubierta de base una dureza de 90, la cual proporciona una superficie selladora trasera para la presión propulsora de agua. Un esquema de la escala del durómetro A es presentada en la figura 3.1.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

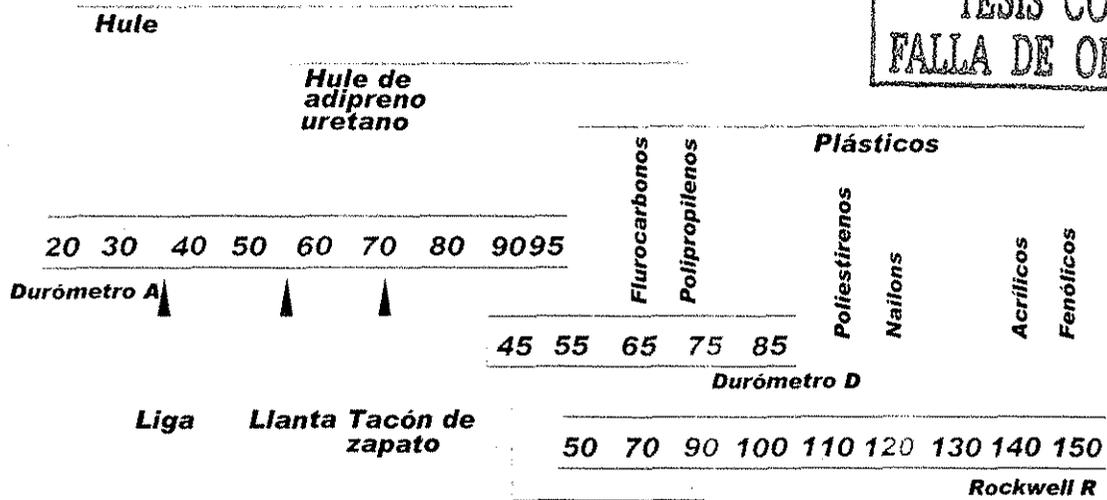


Figura 3.1. Dureza de material

Las capas externas de algunos diablos consisten en espirales de poliuretano con dureza de 90, las cuales proporcionan mayor eficiencia de raspado y resistencia al desgaste; en comparación con la espuma sola, dan mayor acción barredora y raspadora. En estas espirales de poliuretano se pueden empotrar cepillos de alambre o cerdas de plástico, las cuales proporcionan mayor acción limpiadora.

Acción de limpieza

Los pigs se mueven a través de la línea de conducción junto con el flujo, sin interrumpir la operación del sistema. Cuando al dispositivo se le aplica presión hidráulica en la base, éste se expande provocando una acción de sellado y raspado en la pared interior de la tubería, la acción limpiadora de los diablos comienza en el arrastre por fricción, proporcionado por su mayor diámetro respecto al del tubo. La mayor parte del sedimento incrustado que ha sido raspado, es empujado hacia adelante del dispositivo conforme éste avanza a través de la tubería, ver figura 3.2. Una parte del sedimento puede quedar detrás del diablo, el cual podrá ser limpiado por los siguientes pigs que sean lanzados o por el mismo flujo que circula dentro de la tubería.

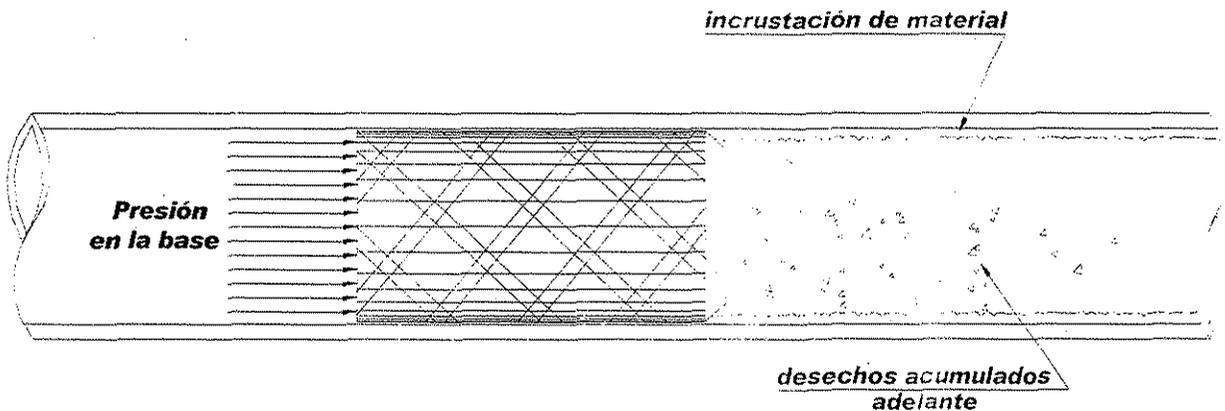


Figura 3.2. Esquema de la acción limpiadora de un pig

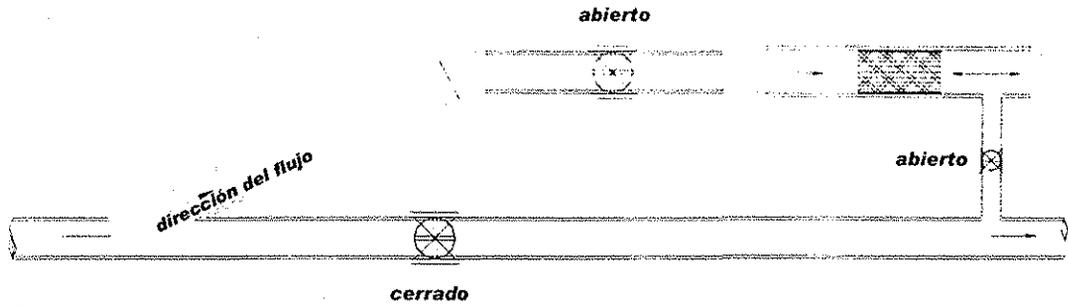


Figura 3.3. Esclusas de entrada y salida paralelas a la línea de conducción

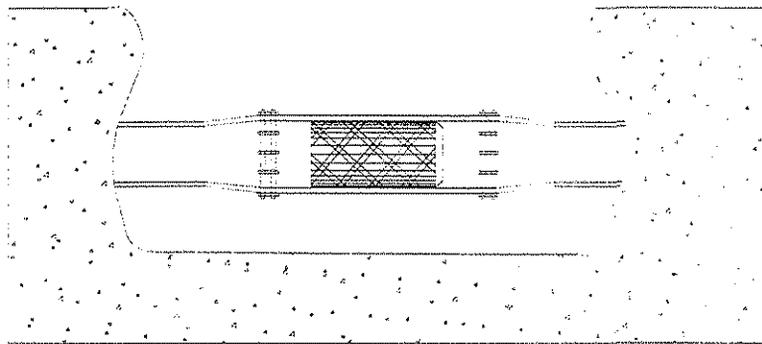


Figura 3.4. Esclusa de entrada, especialmente adaptada a la tubería

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

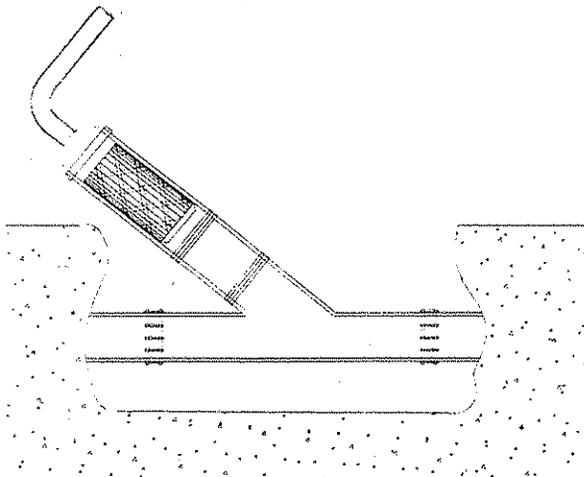


Figura 3.5. Esclusa de entrada en forma de Y

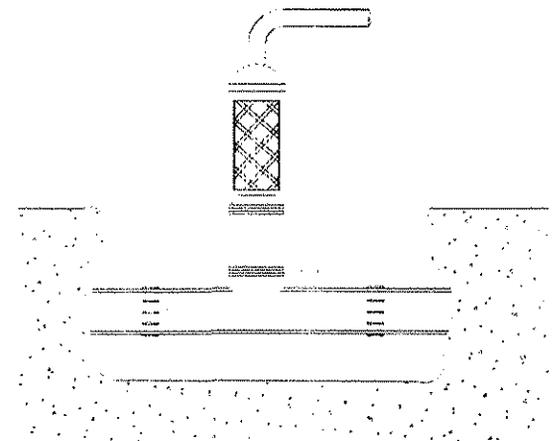


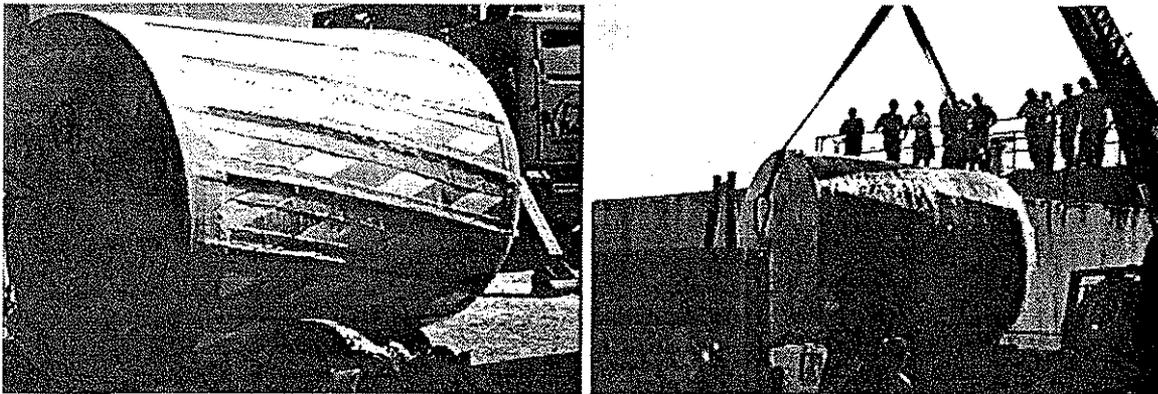
Figura 3.6. Esclusa de entrada en forma de hidrante

Para que los dispositivos puedan pasar a través de las válvulas, éstas deben ser check o de compuerta. Con el fin de monitorear el avance de los diablos a través de la línea, se utiliza un sistema rastreador de diablos, éste consiste en un transmisor instalado en el interior del diablo, una antena rastreadora y un receptor. Las señales electrónicas de baja frecuencia del transmisor indican la localización del diablo. Si un diablo ha encontrado un obstáculo inesperado en la tubería y no llega al sitio deseado su localización puede ser ubicada caminando en paralelo a la tubería con la antena rastreadora y el receptor hasta que sean captadas las señales del transmisor.

Dependiendo de la configuración del acueducto y del tramo de tubería a limpiar, puede darse el caso en el que no se requiera la instalación de alguna de las dos estructuras de

entrada y salida del pig e incluso ninguna. Esta última situación, se presentó en los trabajos de limpieza interior de tubería llevados a cabo en el acueducto Chapala – Guadalajara en su parte a gravedad, en noviembre de 2000^[20]. De igual forma, el primer caso se presentó en el acueducto Río Colorado – Tijuana donde se llevaron a cabo labores de limpieza en la parte a bombeo, entre la torre de oscilación 1 y el tanque de sumergencia 2; en esta parte del acueducto se llevó a cabo la construcción de la esclusa de lanzamiento en tubería de acero de 1.21 m (48 in), la limpieza interior fue realizada en junio de 1997^[21].

La siguiente serie de fotos ilustra las maniobras de izado, colocación, llegada y retiro del pig de espuma de poliuretano utilizado en los trabajos de limpieza interior en tubería de concreto de 2.1 m (82 in) de diámetro en enero de 2001 en el acueducto Chapala - Guadalajara. En estas maniobras no se necesitaron estructuras de lanzamiento o recepción de pigs ya que el tanque de cambio de régimen fue utilizado como estructura de lanzamiento y la estructura de llegada fue la caja de enlace.



Fotos 3.12. Acueducto Chapala- Guadalajara, pig utilizado para limpieza interior
Izado y colocación del pig en el tanque de cambio de régimen



Fotos 3.13. Acueducto Chapala- Guadalajara, Llegada y retiro del pig en la caja de enlace

➤ Tecnología de chorro a presión

Estas tecnologías de chorro a presión incluyen el uso de agua o abrasivo a altas presiones, son ampliamente usadas en casi todos los campos de la industria y su uso en limpieza de tuberías es de gran éxito ya que prácticamente es la única tecnología capaz de dejar una superficie de limpiado con características de metal blanco. Pero no pueden ser usadas en tubos con pared de concreto.

El tipo de acabado depende de las condiciones necesarias para las cuales la tubería va a ser rehabilitada, si se requiere recubrir con algún tipo de material. o si sólo es un procedimiento de limpieza interior para eliminar o disminuir la cantidad de incrustaciones presentes en la pared de la línea. Estas técnicas de limpieza proveen un perfil de anclaje o terminado de superficie adecuado. De acuerdo a diversas normas, existen diferentes grados de limpieza a saber:

Metal blanco, este grado de limpieza se aplica cuando se requiere una excelente preparación de la superficie, es considerada como la limpieza ideal del acero, remueve completamente toda la herrumbre y escoria, dejando una superficie de color gris ligero, uniforme y sin manchas.

Cercano a metal blanco, este tipo de limpieza remueve completamente toda la herrumbre y la escoria, dejando una superficie de color gris ligero, uniforme pero con ligeras sombras, o coloraciones causadas por la herrumbre o por la pintura que se encontraba en la superficie. Estas sombras no deben ser mayores que el 5% de cada unidad de área de superficie.

Grado comercial, esta limpieza remueve óxido, escoria, aceite, pintura y otras sustancias extrañas, dejando una superficie de color gris oscuro y no se requiere que sea uniforme, con ligeras sombras o coloraciones las cuales no deben ser mayores que el 33% de cada unidad de área de superficie.

Grado ráfaga, este grado de limpieza remueve las escamaciones sueltas, productos de óxido y residuos de pintura sueltos. La superficie debe quedar libre de grasa, polvo o de cualquier sustancia extraña o suelta. Las escamaciones, óxidos o pinturas fuertemente adheridas pueden observarse sobre la superficie y para cerciorarse de su adherencia puede utilizarse una espátula sin filo.

La limpieza con chorro de abrasivo es uno de los métodos mas efectivos para limpiar superficies metálicas; consiste en impulsar partículas abrasivas por medio de aire comprimido que golpean la superficie a muy alta velocidad, provocando un efecto de picado y desgaste por rozamiento, removiendo junto con los contaminantes algo de la base metálica.

Los dos tipos de abrasivos principalmente utilizados para limpieza son: metálicos y arena sílica. Algunas consideraciones para elegir el tipo de abrasivo son:

- ✓ Tipo de material a ser limpiado
- ✓ Forma de la estructura
- ✓ Condición original de la superficie
- ✓ Naturaleza de los residuos a ser removidos
- ✓ Tipo de acabado de la superficie

El sistema utilizado para limpieza con abrasivo incluye: un compresor, el recipiente a presión, válvula de control del abrasivo, manguera de hule, separadores de humedad y boquillas.

Las boquillas son la parte del equipo que gobiernan los requerimientos del abrasivo, la válvula de control provee la más simple y exacta medida de arena, entrega un flujo exacto en peso de arena a la boquilla, es muy fácil de regular; puede proporcionar cualquier volumen de arena.

Los separadores de humedad son necesarios para deshumedecer el abrasivo, ya que cuando presentan contenido de agua, al chocar contra la superficie, se quedan adheridos originando un trabajo extra de limpieza al tener que desprender estas partículas de la superficie, también se puede ocasionar el bloqueo de la válvula de control de abrasivo

El aire a alta presión es un factor imprescindible, porque la fuerza de las partículas abrasivas depende de la velocidad del aire en la boquilla.

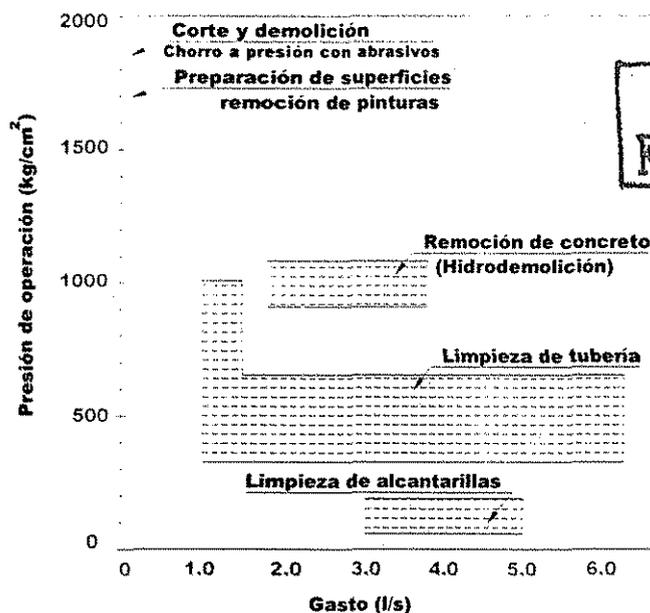
Al llevar a cabo estos trabajos se debe tratar de emplear la técnica adecuada para obtener los mejores resultados:

- ✓ Regular la cantidad de abrasivo de modo tal que siempre haya suficiente para una limpieza con rapidez
- ✓ Mantener la boquilla lo suficientemente cerca de la superficie a limpiar
- ✓ Mover la boquilla en forma uniforme de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha sobre áreas pequeñas hasta dejarla completamente limpia
- ✓ Terminado el sopleteo, se debe retirar el polvo de la superficie con aire limpio, usando el mismo equipo, pero sin abrasivo.

El uso de arena resulta peligroso por su rápida velocidad de desintegración al impacto, produciendo un exceso de polvo, el equipo de seguridad es de vital importancia, ya que el trabajador esta expuesto a muchos riesgos: exceso de polvo y a las enormes velocidades con las que se trabaja el flujo del abrasivo, entre otros.

El enorme desperdicio de abrasivo que existe al trabajar con este método hace imprescindible el uso de sistemas de recuperación a través de un equipo de vacío. Todos los depósitos, producto de la limpieza deben removerse completamente.

La limpieza de tuberías con agua a presión es similar al sistema de limpieza con abrasivos, la diferencia principal entre estos dos métodos es el cambio del flujo de aire por agua. El sistema de limpieza con agua incluye el uso de una bomba, manguera de plástico y boquilla. La boquilla es el elemento principal donde se regula la velocidad requerida para la acción de limpiado, estas velocidades pueden alcanzar valores de hasta 600 m/s que corresponde a una bomba con presión de trabajo del orden de 2041 kg/cm² (200 Mpa). En la gráfica 3.1 se muestran los rangos de presión y gasto que se han observado para llevar a cabo diferentes trabajos de limpieza^[24].



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Gráfica 3.1. Presión y gasto requerido para llevar a cabo limpieza

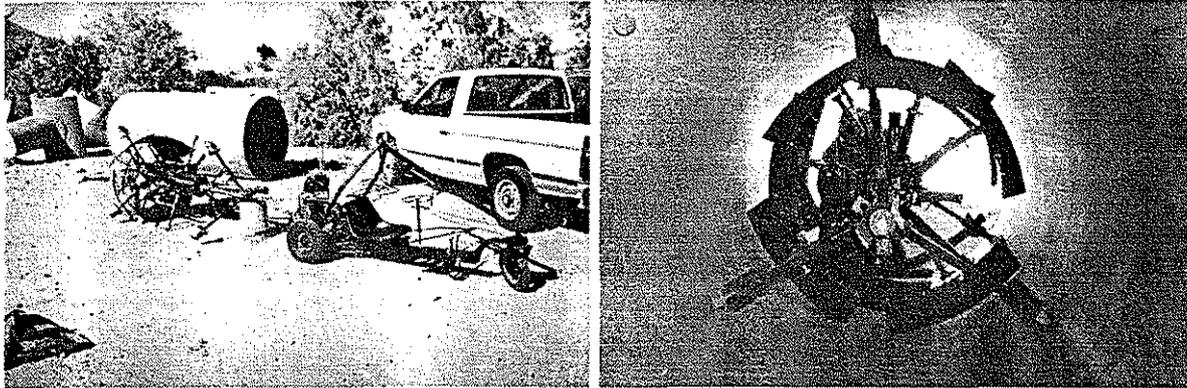
➤ *Dispositivos mecánicos con cuchillas*

Existen dispositivos especialmente diseñados para ser introducidos al interior de tuberías de acero o concreto, tienen adosadas cuchillas de acero retráctiles que van distribuidas perimetralmente y en contacto con la pared interior de la tubería, pueden ser jalados o autopropulsados para llevar a cabo el raspado de la pared.

El empleo de este sistema requiere que el tramo de tubería a limpiar este vacío y del uso de ventanas en la tubería para desalojar el material producto de la limpieza. La acción de limpiado es proporcionado por la combinación del raspado de las cuchillas con la pared interior del tubo y del propio movimiento del vehículo. El sistema de cuchillas puede ser diseñado para que sean rotatorias y ayudar a proporcionar un mejor limpiado, al combinar la acción de jalado, raspado y giro, con lo que se pueden obtener buenos resultados.

Durante los trabajos de limpieza interior de tuberías llevados a cabo en junio de 1997 en el acueducto Río Colorado – Tijuana, se utilizaron tanto pigs de limpieza como un dispositivo equipado con cuchillas de acero; este último fue introducido en el tramo de torre de oscilación 2 y tanque de sumergencia 3. La limpieza se realizó en tramos de 100 m ya que el dispositivo fue jalado mediante un malacate y motor eléctrico montado en un vehículo móvil y empotrado a la tubería al momento de realizar el jalado. El rendimiento alcanzado fue de 500 a 1000 m al día. La foto 3.14 muestra el sistema usado para la limpieza de tubería de acero de 1.21 m (48 in).

Algunas desventajas de este tipo de limpieza es que requieren cortes en la tubería, a cada 50 m aproximadamente, para desalojar el material producto de la limpieza, por lo que su empleo puede dañar la integridad estructural de la tubería.



Fotos 3.14. Acueducto Río Colorado – Tijuana, Dispositivo mecánico con cuchillas utilizado para limpieza interior en tubería de acero de 48 in

➤ Limpieza manual

La limpieza manual es un método utilizado para aquellas aplicaciones donde no se requiere de un grado de limpieza muy exhaustivo, es caro y limitado, por lo que es recomendable para áreas pequeñas o de difícil acceso. Este tipo de limpieza puede remover la herrumbre, escoria mal adherida, así como pintura desgastada desprendida de la superficie. La labor de limpieza puede realizarse con el uso de cepillos de alambre, lijado, raspado y picado. Es un método impráctico por el tiempo que requiere, por lo que sólo es recomendable para áreas pequeñas. De igual forma se puede hacer uso de herramientas eléctricas o neumáticas con las cuales se pueden obtener mejores resultados

Si se ha llevado a cabo limpieza en una línea de conducción y se trata de tuberías de acero que han estado expuestas a corrosión, es recomendable llevar a cabo su recubrimiento interior y exterior con el fin de suministrar una barrera lisa, hermética y permanente entre el acero y el medio corrosivo.

3.2.2 Recubrimiento interior de tuberías

A menudo el objetivo principal, durante los trabajos de rehabilitación de una línea de conducción, es remover el material adherido y la corrosión interior, para después instalar el recubrimiento, el cual minimizará el deterioro de tuberías. Los materiales más comunes usados para este propósito son el mortero de cemento y la resina epóxica, los cuales son aplicados de manera mecánica a lo largo de la línea de conducción.

➤ Recubrimiento con mortero de cemento

Esta técnica regularmente es usada como protección contra corrosión interior en tuberías de acero; el espesor del recubrimiento evita que penetre y se ponga en contacto la superficie de acero de la tubería con el oxígeno, bióxido de carbono y varias sales.

El recubrimiento con mortero de cemento provee una barrera entre la tubería de acero y el medio corrosivo, un aislamiento que consiste de una capa de mortero, la cual es lanzada en

dirección radial hacia la pared interior de la tubería y aplanado con llanas rotatorias que van adosadas en una máquina especialmente diseñada para esta operación.

Esta técnica requiere realizar trabajos previos de limpieza interior en la línea, los cuales pueden ser realizados a través del uso de pigs de limpieza, con chorro de arena a presión, manualmente o una combinación de estos.

El proceso del recubrimiento es importante, ya que debe tomarse en cuenta la dirección que se seguirá, el abastecimiento de material y la distancia máxima adecuada entre cada pozo de acceso para propósitos del recubrimiento; una distancia aceptable son 300 m.

Deberá tomarse en cuenta que no en todas las zonas de la tubería, el recubrimiento será de forma mecánica, sino que habrá lugares tales como remaches, accesorios y deformaciones de algunas secciones de tubería en las cuales no se podrá realizar, por lo que será necesario ejecutar estos trabajos de forma manual.

Una vez recubierta la tubería se procede a cerrar ambos extremos, pudiendo ser con costales de arena para introducir agua como parte del proceso de curado.

Es necesario realizar una inspección del recubrimiento en la pared interior de la tubería, un circuito de televisión cerrado es muy útil; sin embargo, es preferible realizar la inspección física para que cualquier deficiencia pueda ser identificada y marcada para ser reparada.

Debe tenerse mucho cuidado en proporcionar al cemento un curado adecuado para que no existan fisuramientos, ya que la grieta se verá incrementada y aumentará su ancho al entrar en operación el acueducto debido a que la línea puede ser sometida a altas presiones de operación. El proveer un espesor adecuado a la tubería bajo condiciones de fisuramiento está en función de la variabilidad del proceso de recubrimiento, del control de calidad de materiales, de variables ambientales (temperatura interna y humedad), de espesores de recubrimiento diferentes, ya que muchas de las máquinas utilizadas para lanzar el mortero de cemento no aseguran dejar un espesor parejo y de la presión interior en la tubería.

Una vez inspeccionada la línea, debe procederse a realizar la prueba de presión a la tubería para identificar los posibles puntos de fuga que pudieran existir; como último punto se procede a clorar (desinfectar) la tubería para que el acueducto este listo para ser puesto en operación.

Es importante recordar que este recubrimiento no funciona como un refuerzo estructural y no es apropiada para tuberías que presenten fuga o con reducción significativa del espesor de pared. La experiencia indica que el recubrimiento con mortero de cemento puede extender la vida útil de la línea por 50 años^[22].

➤ *Recubrimiento con resina epóxica*

En tanto que el recubrimiento con mortero de cemento impone un ambiente alcalino en la interfase metal - mortero de cemento, lo cual inhibe la corrosión, el recubrimiento con resina epóxica actúa simplemente como una barrera que sólo protege la zona recubierta. Es

el procedimiento más usual para proteger contra la corrosión a los sistemas de tuberías de acero, su aplicación debe ser continua y con espesores uniformes.

Para realizar la aplicación del epóxico, es necesario llevar a cabo trabajos previos de limpieza, la superficie interior debe estar libre de material adherido, ya que el objetivo del epóxico es adherirse para formar un recubrimiento el cual evite el contacto entre metal y el fluido con lo cual se evita la corrosión. Este recubrimiento es generalmente mucho más delgado que el de mortero de cemento, por lo que no causa una reducción significativa del diámetro interior y presentan un curado rápido. Sin embargo, cualquier defecto en el recubrimiento permitiría el inicio de la corrosión y, a diferencia del mortero de cemento, no existe un ambiente alcalino que permita inhibir la corrosión químicamente. La resina epóxica no perjudica la calidad del agua si es propiamente mezclada en la proporción correcta y se tiene un curado adecuado.

La resina es aplicada a través de un eje rotatorio adosado a una máquina; con la que, a través de su velocidad, se controla el espesor del recubrimiento. Idealmente, el tiempo de curado debería ser tan corto como sea posible para minimizar el tiempo en que la línea esté fuera de servicio, así como la contaminación de la resina antes del curado; sin embargo, un curado muy rápido conduciría a un riesgo de taponamiento en el sistema de rocío. Una diferencia importante con el recubrimiento con mortero es que la resina epóxica no es alisada después de adherirse a la pared del tubo, por lo que la calidad en la superficie terminada dependerá de la técnica de aplicación y de las propiedades del material.

➤ *Recubrimiento con fibra de carbón*

La fibra de carbón ha sido usada en estructuras, edificios, puentes y en la industria aeroespacial debido a su excelente comportamiento mecánico; hasta 1997 fue utilizada por primera vez en una línea de conducción de agua para enfriamiento, en la estación de generación de energía nuclear en Palo Verde, Arizona^[4].

Esta técnica de recubrimiento fue diseñada para adherirse y endurecerse en la pared de tubería; requiere de una superficie libre de incrustaciones y corrosión, por lo que es necesario realizar trabajos previos de limpieza en las secciones a reparar.

Antes de aplicar el recubrimiento, la fibra de carbón debe ser embebida en resina para después ser colocada sobre la pared interior de la tubería. Pocas hojas de fibra de carbón son colocadas longitudinalmente y la mayoría en forma circunferencial.

El recubrimiento interior realizado en tuberías de concreto de 102", en el Providence Water Supply Board en Rhode Island, consistió en colocar 5 o 6 capas de fibra de carbón^[4]. La temperatura que se tuvo dentro de la tubería fue tal que alcanzó el punto de rocío o condensación en la pared interior de la tubería; debido a esto fue necesario colocar sistemas de ventilación, ya que el método requiere de una superficie seca, con esto se logró obtener condiciones adecuadas para la instalación de la fibra de carbón.

El uso de fibra de carbón requiere un recubrimiento primario para después ser colocada, la última capa del recubrimiento es un sellador que provee impermeabilidad en la zona

cubierta. Debido a que los espesores de este tipo de recubrimiento oscilan entre 6.3 y 12.7 mm ($\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{2}$ in) la reducción en la capacidad de conducción no es significativa ya que en la mayoría de los casos el acabado final de la fibra es mas liso que el de la tubería de concreto original.

Este método es novedoso dentro del ámbito del agua potable, el procedimiento de instalación es muy sencillo, pues los rollos de fibra son sumergidos en resina y posteriormente pegados a la pared interior del tubo, la fibra endurece dejando un acabado liso que podría mejorar la capacidad de conducción; los beneficios en el uso de esta técnica son:

- ✓ Resisten altos niveles de esfuerzo de tensión 8437 kg/cm² (120,000 psi)
- ✓ Facilidad para formar múltiples capas
- ✓ Excelente adherencia
- ✓ Recubrimiento relativamente delgado 6.3 a 12.7 mm (de $\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{2}$ in)
- ✓ Terminado de superficie liso
- ✓ Relativamente fácil de instalar

El tiempo de curado en este tipo de recubrimiento oscila entre 8 y 10 horas. Una vez realizado el recubrimiento, se realiza la prueba de hermeticidad en la sección rehabilitada. Los costos de aplicación de este tipo de recubrimiento son comparables con el costo que se tendría al llevar a cabo la reparación a través de la excavación (método cortar y reemplazar).

Hay casos en donde excavar no es una muy buena opción, por lo que este método es muy útil aplicarlo ya que proporciona hermeticidad (a través del epóxico) y gran resistencia a la tensión.

3.2.3 Inserción de tubería nueva dentro de otra existente

➤ Encamisados o mangas plásticas interiores

El uso de mangas plásticas internas es un concepto novedoso, el cual ha demostrado gran eficiencia en la solución de problemas asociados con la corrosión interna. Consiste en la introducción de tubería de polietileno de alta densidad dentro del tubo existente ya sea de acero o concreto; esto permite obtener una barrera lisa, hermética y permanente entre la tubería original y el fluido transportado.

La unión de tubería de polietileno con acero o concreto permite conjuntar resistencia mecánica, además de una superficie lisa e inerte a los efectos de la corrosión interior.

Los puntos de jalado de la tubería a insertar estarán en función de las características topográficas de la línea de conducción, cambios de dirección, válvulas, derivaciones y pozos de acceso; es importante tomar en cuenta la fricción entre tubería nueva y existente, peso por metro lineal y área superficial de contacto entre el tubo de polietileno y tubería existente, así como las curvas existentes en el trazo original.

El objetivo es introducir la tubería de plástico y adherirla a la pared interior de la línea existente; para tal efecto se cuenta con dos métodos de instalación. La metodología es la siguiente:

1.- En ambos casos y con objeto de garantizar la adherencia a la pared del tubo de polietileno es necesario llevar a cabo una adecuada limpieza por medio de pigs de limpieza o algún otro método; verificar posibles anomalías constructivas, redondez, deformación y cambios de espesor de pared para lo cual un pig inteligente es adecuado para hacer esta evaluación.

2.- Este revestimiento requiere la instalación de bridas de acero, coples para tubo de venteo y verificación de la integridad de la tubería de polietileno en cada extremo de conexión.

3.- La unión térmica entre los tubos de polietileno debe ser revisada a través del muestreo de secciones fusionadas sometidas a esfuerzos de tensión mayores que los que sufrirán durante el proceso de instalación y con inspección visual de la unión, removiendo el labio externo que se provoca al aplicar termofusión. En caso de presentar alguna área con vacío se deberá iniciar nuevamente el proceso de fusión.

En la instalación de la tubería es donde difieren los dos métodos:

Primer método:

En este caso el diámetro exterior de la tubería de polietileno es menor que el diámetro interior de la tubería existente (de un cuatro a seis por ciento), por lo que la tubería de revestimiento no sufre esfuerzos concéntricos durante el proceso.

Antes de terminar de jalar la tubería se termofusiona una brida de polietileno que se acopla a la brida de acero instalada en el extremo de la tubería existente; para la instalación de la segunda brida de polietileno, en el extremo opuesto, se aplica tensión en el extremo jalado y se coloca una grapa que impide que el tubo se regrese al estado de reposo, posteriormente se termofusiona la segunda brida de polietileno y se quita la grapa para permitir el acople entre bridas de acero y polietileno.

Para realizar la expansión del polietileno se coloca provisionalmente una brida ciega en uno de los extremos y en el otro se aplica aire comprimido, que permitirá expandir el revestimiento interno hasta la pared del tubo existente.

Segundo método:

Una vez unida la tubería de polietileno, se sujeta el cable de jalado a un extremo y se hace pasar por una caja reductora de rodillos la cual comprime y reduce el diámetro del encamisado antes de introducirlo al tubo existente. El encamisado, cuyo diámetro exterior es originalmente más grande que el diámetro interior del tubo existente, queda ligeramente comprimido y tensionado, como un resorte dentro del tubo, permitiendo su fácil instalación.

La tubería de *PVC* o *HDPE* también puede ser entregada directa de fábrica en forma de "u", en las longitudes requeridas, para ser insertada fácilmente dentro de la tubería existente

y después expandida, usando presión, a su forma original; en la actualidad la tubería deformada de plástico esta disponible en diámetros mayores que 0.6 m (24 in).

Al quedar instalados todos los tramos se reconectan por medio de bridas de acero y polietileno.

En este tipo de instalación se realiza una prueba neumática, cualquier fuga se manifestará en el espacio anular entre las dos tuberías. Este método garantiza la integridad interior de la línea de conducción, solucionando de manera definitiva el problema de corrosión interior.

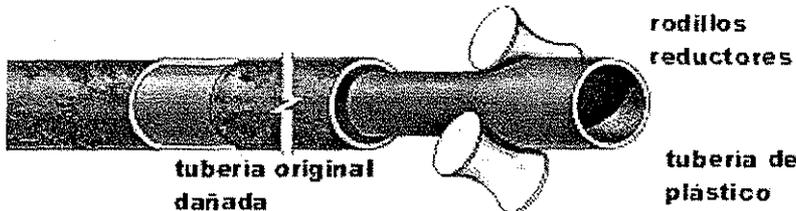


Foto 3.15. Reducción del diámetro nominal en tubería de plástico para ser insertada

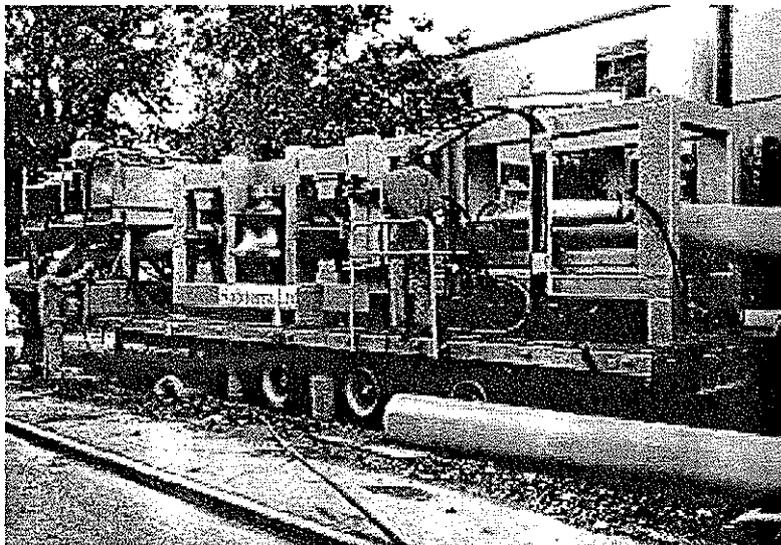


Foto 3.16. Máquina utilizada para reducir el diámetro e insertar la tubería

TESIS CON
PALA LE ORIGEN

➤ Encamisados o mangas no plásticas interiores

Al igual que en las mangas plásticas, consiste en empujar o jalar tubería nueva dentro de otra existente; sin embargo, en este método el espacio anular entre estas tuberías es rellenado con material inerte, literalmente cualquier tipo de material de tubería puede ser insertado, los más comunes son: fibra de vidrio, hierro colado y acero. Este método es a menudo el más común para líneas de conducción de diámetro grande y para aquellas aplicaciones en donde no se vea afectada de manera significativa la reducción en la capacidad de conducción.

La combinación más común entre tubería existente y encamisado interior es concreto y acero; un ejemplo es la rehabilitación de una línea de conducción de agua llevada a cabo por la comisión sanitaria de Washington (WSSC) en Laurel Maryland, en mayo de 1997^[4].

El acueducto fue construido a finales de los 70s y principios de los 80s con tubería de concreto preesforzado de 2.44 m (96 in) de diámetro y una longitud de 12500 m; después de haber evaluado la integridad estructural de la línea, a través de una prueba no destructiva (impacto sísmico), se decidió llevar a cabo su rehabilitación, la cual consistió en el encamisado interior con tubería de acero de 80" de diámetro y 9450 m de longitud. Además, también se reemplazaron o reforzaron ciertos segmentos de tubería de concreto utilizando tendones de acero. Las características iniciales de la línea existente y encamisado interior se presentan en la tabla 3.1.

	Línea de conducción original	Encamisado interior
tipo	tubería de concreto	acero
diámetro	2.4m (96 in)	2.0m (80 in)
espesor		12.7 mm (½ in)
longitud	12500 m	9450 m

Tabla 3.1, Encamisado interior de tubería de acero

Para el manejo y jalado de la tubería de acero dentro de la línea existente se desarrolló un vehículo que pudo maniobrar dentro de la tubería de concreto, con esto los trabajos de colocación de la tubería fueron más sencillos de ejecutar. El espacio anular entre ambas tuberías fue rellenado con concreto de baja resistencia a través de aberturas hechas en la pared de la tubería de acero. Para proteger la nueva línea de acero contra corrosión interior se llevó a cabo un recubrimiento interior con mortero de cemento con un espesor de 12.7 mm (½ in).

El reemplazo de tubería de concreto y refuerzo mediante tendones de acero fue realizado en aquellas secciones que presentaban riesgo estructural y que estaban aisladas. Este método se vuelve problemático para cuando existen demasiadas conexiones laterales.

Para la aplicación de estos métodos, se debe tener presente la necesidad de dar de baja el tramo de tubería a rehabilitar, el tiempo requerido para llevar a cabo los trabajos de inserción de tuberías, el llenado del espacio anular entre tuberías y, si se requiere, el recubrimiento interior y protección catódica de la línea.

3.3 Reemplazo de tuberías (tecnologías trenchless)

El reemplazo de tuberías a través del empleo de un método tradicional, es decir, excavando zanjas para retirar y alojar la nueva tubería, es un proceso difícil y costoso ya que ocasiona mucha interferencia en las actividades cotidianas de la zona y requiere de una gran cantidad de trabajos relacionados, como restauración de caminos y carreteras por donde pasa el trazo de la línea. En algunos casos la reparación de calles y restauración de superficies dañadas puede costar mas que la instalación de tubería nueva.

El empleo de nuevas tecnologías permite llevar a cabo la instalación o reemplazo de tuberías sin excavar; conocidas como tecnologías trenchless y definidas como la ciencia de

instalar, reparar o renovar líneas enterradas que minimizan o eliminan la necesidad de excavar.

Estas tecnologías reducen los daños al ambiente y minimizan el impacto social, pueden usarse para llevar a cabo la instalación de nuevas líneas, el reemplazo de tubería del mismo diámetro o mayor, a través del jalado o empujado fuera del subsuelo de la línea existente mientras se va insertando la nueva tubería.

Existen varios métodos para el reemplazo de tuberías, los cuales sólo se mencionan en este trabajo, ya que el objetivo principal es la rehabilitación.

- 1.- Instalación de tubería nueva a través del tronado, demolición y fragmentación de la línea existente.
- 2.- Instalación de tubería nueva usando la perforación dirigida o micro túneles.

Para la aplicación de éstas metodologías existen diversas empresas que han desarrollado sistemas de instalación de tuberías, principalmente de plástico, para lo cual hacen uso de maquinaria especializada. Por ejemplo, el sistema Grundoburst 1000G desarrollado por TT Technologies^[43], usado para trabajos de tronado, demolición y fragmentación de la línea existente, y el sistema Grundodrill, de la misma empresa, utilizado para perforación dirigida o micro túneles.

CAPITULO 4. PROGRAMA DE MANTENIMIENTO

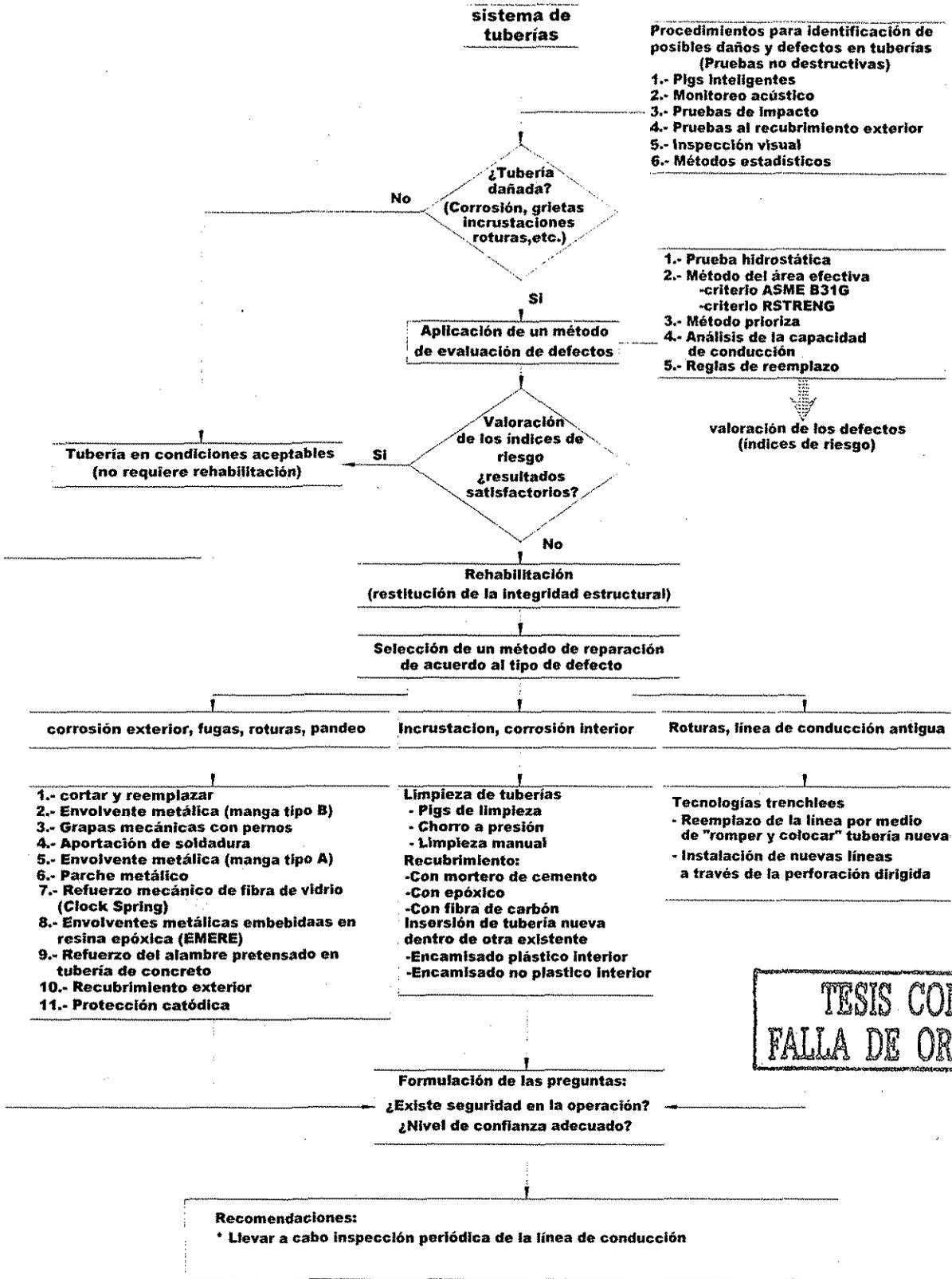
Conservar la operación de los sistemas de tuberías a niveles confiables de seguridad debe ser el propósito principal de los programas de mantenimiento. Un programa de mantenimiento es la combinación de las acciones técnicas y administrativas, incluyendo la supervisión para mantener las tuberías a niveles seguros de operación.

El conjunto de acciones técnicas necesarias para la ejecución de las tareas de mantenimiento pueden ser formuladas de la siguiente forma:

- ✓ Con base en la experiencia
- ✓ Con base en el análisis de datos, estudios, métodos y técnicas de reparación
- ✓ Por “reglas de dedo”

Por otra parte, la falta de coordinación entre las labores de mantenimiento y la operación normal de un acueducto es el principal obstáculo durante la ejecución de un programa de mantenimiento. Es por estas razones que la forma de seleccionar alguna técnica de rehabilitación a menudo no es muy clara; en este trabajo se propone un programa de mantenimiento a manera de guía, un criterio de decisión que pretende ser una herramienta de apoyo para la toma de decisiones con el fin de reducir la subjetividad en el proceso de selección del método de rehabilitación. El diagrama de flujo propuesto para la elaboración del programa de mantenimiento se presenta en la figura 4.1.

Programa de mantenimiento en los sistemas de tuberías



- Procedimientos para identificación de posibles daños y defectos en tuberías (Pruebas no destructivas)**
- 1.- Pligs inteligentes
 - 2.- Monitoreo acústico
 - 3.- Pruebas de Impacto
 - 4.- Pruebas al recubrimiento exterior
 - 5.- Inspección visual
 - 6.- Métodos estadísticos

- 1.- Prueba hidrostática
- 2.- Método del área efectiva -criterio ASME B31G -criterio RSTRENG
- 3.- Método prioriza
- 4.- Análisis de la capacidad de conducción
- 5.- Reglas de reemplazo

valoración de los defectos (índices de riesgo)

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 4.1. Programa de mantenimiento para sistemas de tuberías

La aplicación del plan o programa de mantenimiento permite localizar las secciones o segmentos de tubería más deterioradas, pone en evidencia sus carencias y defectos y, sugiere el orden de prioridad en la que se deben ejecutar las acciones preventivas y correctivas a través de la valoración de los resultados de los métodos de evaluación de defectos.

El punto clave del análisis consiste en la recolección de la base de datos para el proceso de toma de decisiones de rehabilitación, la cual tiene información relacionada con el diseño, protección catódica, sistema de recubrimientos y corrosión, inspecciones, pruebas de presión, reparaciones, condiciones ambientales, áreas pobladas, etc. a través de la evaluación del riesgo de falla en el sistema de tuberías, con lo que se puede identificar los puntos o áreas con riesgo más alto. Es importante señalar que todo el sistema de tuberías debe ser considerado como elementos que requieren recibir mantenimiento, ya sea en mayor o menor grado.

Estas evaluaciones proporcionarán una idea clara de las condiciones que pueden ser definidas como aceptables o no aceptables según la forma de evaluación de cada método.

Es importante hacer notar que el primer factor que debe ser considerado es la integridad estructural de las tuberías, ya que de nada sirve reparar el recubrimiento y proteger catódicamente la línea de conducción si se carece de la seguridad estructural en la línea.

Como se aprecia en el diagrama de flujo de la figura 4.1, una vez realizada la evaluación del sistema de tuberías y fijado el orden de atención de los segmentos de tubería a rehabilitar, los trabajos de reparación requeridos pueden ser muy variados. Por ejemplo, habrá segmentos de tubería en los que debido a las condiciones de agresividad del suelo, requieran de protección catódica, además de recubrimiento exterior. En algunos otros tramos podría ser que el tubo presente pérdida de metal debido a corrosión, si el resultado obtenido, después de aplicar el método del área efectiva, sugiere un alto riesgo al continuar operando la línea de conducción entonces podrá optarse por elegir algún método de reparación como se ilustra en la figura 4.1; por ejemplo: parche metálico, grapas mecánicas, envoltentes metálicas embebidas en resina epóxica, etc., los cuales fueron revisados en el capítulo 3 de este trabajo.

Probablemente la presencia de corrosión en tuberías no sea de mucha importancia, pero si la capacidad de conducción, por lo que la mejor opción para mitigar el problema es la limpieza interior y evacuación de aire atrapado en la línea de conducción. Sin embargo, también pueden adoptarse medidas más drásticas como llevar a cabo recubrimiento interior con mortero de cemento, epóxico o fibra de carbón. Una forma de eliminar por completo el problema de corrosión interior puede ser a través de la inserción de encamisados plásticos interiores dentro de la línea de conducción existente.

La mejor opción disponible para aquellas líneas de conducción que presentan fugas y roturas de tubería de manera continua, tanto a lo largo de su trayectoria como en el tiempo es el uso de tecnologías trenchless. El reemplazo de la línea de conducción a través del tronado, demolición y disgregación de la línea existente es un método muy usado.

Otro método es la instalación de línea de conducción nueva ubicada fuera del sitio de las tuberías existentes por medio del uso de la metodología de perforación dirigida.

Por otra parte, si una sección de tubería es reparada o rehabilitada, debe realizarse un seguimiento con el fin de determinar su eficacia y conveniencia en su empleo futuro. Diferentes autores y organismos operadores recomiendan ejecutar las acciones de monitoreo anualmente, e incluso, si no se encuentran problemas en la tubería durante la inspección, ésta puede esperar 5 o más años para una posterior inspección. Sin embargo, otros organismos como el Providence Water de Rhod Island^[4] prefieren inspeccionar 5 veces al año.

En la actualidad, la importancia que tienen los sistemas de tuberías ha crecido hasta el punto en que ya existe en Estados Unidos una iniciativa en el Congreso que probablemente imponga una ley para inspeccionar periódicamente (cada 5 o 6 años) las líneas de conducción a través de corridas con pigs inteligentes.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La revisión del estado del arte de las diversas técnicas de rehabilitación, así como la aplicación de algunas de éstas en grandes acueductos de México (Chapala – Guadalajara y Río Colorado – Tijuana, principalmente) permite establecer las siguientes conclusiones:

- ✓ El principal obstáculo durante la ejecución de un programa de mantenimiento es la falta de coordinación entre las labores de mantenimiento y la operación normal del acueducto. Por lo que la selección de la mejor opción dependerá de las condiciones operativas, disponibilidad de la línea o tramo de conducción, de la gravedad y tipo de falla, del nivel de seguridad requerido y del costo de la reparación.

- ✓ Como una opción enfocada a la coordinación de las labores de rehabilitación y operación normal del acueducto se han desarrollado nuevos métodos para reparar defectos de tuberías que no presenten fugas, los cuales son muy fáciles de instalar, además de no interrumpir la operación de la línea.

- ✓ Para aceptar un método de reparación, se requiere que la técnica de rehabilitación minimice el impacto ambiental y social, garantizando la seguridad estructural y operacional del acueducto.

- ✓ La aplicación del programa de mantenimiento propuesto permitirá llevar a cabo la revisión de las líneas de conducción de una manera simple y ordenada, establecer un estándar de la forma en que se evalúan las tuberías, así como contar con una base de datos confiable de los sistemas de tuberías.

- ✓ Es importante identificar el orden de prioridad en la que se deberán llevar a cabo los trabajos de reparación y rehabilitación de tuberías

- ✓ Se recomienda realizar inspecciones periódicas a las líneas de conducción a través de los programas de mantenimiento, con esta aplicación se podrá realizar la evaluación del estado actual que guardan las tuberías con el fin de determinar la conveniencia de llevar a cabo su rehabilitación. Estas inspecciones periódicas deberán realizarse a través del empleo de pruebas no destructivas, lo que permitirá, además de localizar las secciones o segmentos de tubería posiblemente dañadas, poner en evidencia las carencias y defectos del sistema de tuberías. El empleo de estas técnicas debe ser invariable ya que su uso asegura evitar el daño estructural y fatiga de las tuberías.

- ✓ Este trabajo ayudará a los operadores de acueductos a seleccionar la técnica de rehabilitación más adecuada, reduciendo la subjetividad en el proceso de toma de decisiones, a través del empleo de técnicas bien definidas y sustentados en su conocimiento y en sus ventajas y desventajas propias del método seleccionado.

BIBLIOGRAFIA

1. American Water Works Association, Manual of water supply practices
Concrete pressure pipe, AWWA No. M9
2. Richard Baron and Will Worthington, Pipeline Technologies, inc.
Nondestructive testing of buried concrete pipelines
3. Terry R. Shamblin, Pipeline & Gas Journal; Dallas, March 2000
Intelligent pig inspection of uncoated seamless pipelines
4. Brian Fortner, Civil Engineering; July 1999
Main line mending
5. Jhon F. Kiefner, Willard A. Maxey, Oil & Gas Journal; July 2000
Pressure ratios key to effectiveness
6. Gere - Timoshenko, Segunda edición
Mecánica de materiales
7. Réjean B., Nathalie C. and Bruce B., National Research Council of Canada
Material Selection & Design ; august 1997
Potential survey technique for prestressed concrete pipes
8. Luis Vera M., Tomas Lugo I. et al, Manual de Diseño de Agua Potable, Alcantarillado y
Saneamiento, CNA; junio 1994
Protección catódica y recubrimientos anticorrosivos
9. Norma Oficial Mexicana, NOM-008-SECRE-1999
Control de la corrosión externa en tuberías de acero enterradas y/o sumergidas
10. William F. Marshall, Materials Performance; Jan 1998
Creating a pipeline rehabilitation plan
11. Uri Shamir & Charles D.D. Howard, Journal AWWA; May 1979
An analitic approach to scheduling pipe replacement
12. Fed A Travers, Materials Engineering and Research Laboratory Bureau of Reclamation,
Denver Colorado; Construction and Building Materials, 1997
Acoustic monitoring of prestressed concrete pipe
13. Federico Gonzáles T., Instituto Mexicano del Petróleo; Revista Ductos de PEMEX,
1997
Modelo matemático para determinar la frecuencia de inspección a ductos con equipo
instrumentado

14. Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos, NRF-012 –PEMEX-2000
Tubería de resina reforzada con fibra de vidrio para recolección y transporte de hidrocarburos y fluidos corrosivos líquidos
15. Morris, R. E. Water Utilities Bd., Austin Texas, 1975
Manual of water utility operations
16. Kiefner JF, Vieth PH, Oil and Gas Journal, Aug 1990
New method corrects criterion for evaluating corroded pipe
17. Rafael Carmona P., Alejandro Sánchez H. XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, oct 1996
Incremento de pérdida de carga en acueductos
18. French Jonathan A, Journal of Environmental Engineering, ASCE; May 1995
Pigging submarine outfalls
19. Girard Industries Inc., Houston 1995
Catalogo de aqua-pigs
20. Sánchez Huerta A. Et al, Instituto de Ingeniería de la UNAM, diciembre 2000
Informe “mediciones después de la limpieza en el acueducto Chapala – Guadalajara”
21. Ramos Tapia S. Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería de la UNAM
Recuperación de la capacidad de conducción en un acueducto mediante limpieza de tuberías
22. Irene McSweeney W., Journal NEWWA, Dec. 1995
Rehabilitation of a 48 inch steel water main
23. Tracto Technik Company
Steerable boring systems with percussive hammer action
24. Andreas W. Momber, A.G. Nielsen. Materials Selection and Design, Feb 1998
Pipeline rehabilitation by water jetting
25. K. K. Tandon, Materials Selection and Design, Feb 1997
MFL tool hardware for pipeline inspection
26. PPSA Special Section, Pipeline and Gas Journal, Aug 1999
Unique pigging operation on liquids pipeline
27. 3P Services, <http://www.3P-services.com>
In line inspection of thick wall, small diameter pipelines

28. Peter A. J. Van der Veer, Sicco F. Jager; Pipeline and Gas Journal, Mar 2000
Measuring internal corrosion in small diameter, heavy wall pipelines
29. Randall W. Poston, Keith E. Kesner; Civil Engineering, June 1995
Impact echo strikes home
30. Larry D. Olson, Cliff Wrigth; Civil engineering, May 1990
Strides in nondestructive testing
31. Thomas M. Walski, Anthony Pelliccia; Journal AWWA, March 1982
Economic analysis of water main breaks
32. Ahmad Habibian; Journal AWWA, July 1992
Developing and utilizing data bases for water main rehabilitation
33. M.P.H. Brongers, J.A. Beavers, Et al; NACE International, Corrosion Engineering Section; Oct 2000
Effect of hydrostatic testing on ductile tearing of X-65 line pipe steel with stress corrosion cracks
34. M. Ahammed; International Journal of Pressure Vessels and piping; Jan 1998
Probabilistic estimation of remaining life of a pipeline in the presence of active corrosion defects
35. Rodríguez B. Enrique; Revista Ductos # 13 de PEMEX; Marzo – Abril 1998
Rehabilitación de ductos antes y ahora
36. Rodríguez B. Enrique; Revista Ductos # 15 de PEMEX; Mayo – Junio 1998
Nuevas tecnologías para rehabilitación de ductos
37. Revista Ductos # 24 de PEMEX; Noviembre – Diciembre 1998
Developments in criteria for repair or replacement decisions for pipeline corrosion defects
38. Alcerreca A. Hector; Revista Ductos # 4 de PEMEX; Enero – Febrero 1998
Limpieza efectiva de tuberías: arte o ciencia
39. Bruce B. may; Journal AWWA; Dec 1999
Rehabilitation of 1940s water Manis
40. Robert C. Blake, Joseph S. Kowalczyk; Public Works Journal Corporation; Jan 2000
Carbon fiber lining rehabilitates a ruptured water main
41. Sánchez G. José; Revista Ductos # 4 de PEMEX; Julio – Agosto 1999
Mangas plásticas internas

42. Kent Halloran, Ed Slattery; Public Works Journal Corporation: Sep 1999
Diverse trenchless technologies
43. TT Technologies, <http://www.tttechnologies.com>
Pipe bursting and directional drilling
44. Tom Van Hardeveld; Revista Ductos # 19 de PEMEX; Noviembre – Diciembre 1997
Pipelines and the maintenance revolution
45. Martínez J. Luis; Revista Ductos #22 de PEMEX; Marzo – Abril 1998
Implementación de la administración de riesgo en ductos
46. NKK Corporation, <http://www.nkk.co.jp>
Ultrashot tools
47. <http://www.catflap.net>
Spray lining
48. Samuel Aroni; ASCE Pipeline Division Specialty Conference; January 1979
Mortar lining of large steel pipeline – measurements, testing and observations
49. Efrén Calva Chavarría; Revista Ductos #4 de PEMEX; Septiembre – Octubre 1997
Evaluación de riesgos asociados a la operación de los ductos
50. Gabriel Echávez A.; Journal of Hydraulic Engineering, Feb 1997
Increase in losses coefficient with age for small diameter pipes

PRESIONES HIDROSTATICAS DE PRUEBA

A. P. I. 5L

DIAM. EXT. mm.	Espesor de pared		Peso Teórico		A.S.T.M.																					
	pulg.	mm.	pulg.	kg/m	A-53-A		A-53-B		B		X-42		X-46		X-52		X-56		X-60		X-65		X-70		X-80	
					Kg/Cm ²	PSI																				
168.3	0.156	4.01	16.21	10.78	60	850	70	990	70	990	104	1480	14	1620	129	1840	139	1980	149	2120	162	2300	174	2470	199	2830
					65	930	77	1090	77	1090	115	1640	26	1790	143	2030	153	2180	165	2340	178	2530	192	2730	211	3000
168.3	0.188	4.8	19.35	12.92	72	1020	84	1190	84	1190	126	1790	38	1960	155	2210	167	2380	179	2550	195	2770	210	2980	211	3000
					77	1100	91	1290	91	1290	136	1930	48	2110	168	2390	181	2570	194	2760	210	2990	211	3000	211	3000
168.3	0.219	5.6	22.47	14.98	84	1190	98	1390	98	1390	146	2080	60	2280	181	2580	195	2780	210	2980	211	3000	211	3000	211	3000
					96	1360	111	1580	111	1580	167	2380	83	2600	207	2940	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000
168.3	0.250	6.4	25.55	17.02	107	1520	125	1780	125	1780	187	2660	05	2920	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000
					107	1520	125	1780	125	1780	187	2660	05	2920	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000
168.3	0.280	7.1	28.22	18.97	120	1700	139	1980	139	1980	209	2970	11	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000
					120	1700	139	1980	139	1980	209	2970	11	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000
168.3	0.312	7.9	31.25	21.04	120	1700	139	1980	139	1980	209	2970	11	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000
					120	1700	139	1980	139	1980	209	2970	11	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

DIAM. EXT. mm.	Espesor de pared		Peso Teórico		PRESIONES HIDROSTATICAS DE PRUEBA																					
	mm.	pulg.	Kg/m	lb/ft	A. S. T. M.						A. P. I. 5L															
					A-53-A		A-53-B		B		X-42		X-46		X-52		X-56		X-60		X-65		X-70		X-80	
					Kg/ Cm ²	PSI	Kg/ Cm ²	PSI	Kg/ Cm ²	PSI	Kg/ Cm ²	PSI	Kg/ Cm ²	PSI	Kg/ Cm ²	PSI	Kg/ Cm ²	PSI	Kg/ Cm ²	PSI	Kg/ Cm ²	PSI	Kg/ Cm ²	PSI	Kg/ Cm ²	PSI
219.1	4.8	0.188	25.37	16.94	55	780	65	920	65	920	96	1370	105	1500	120	1700	129	1830	138	1960	150	2130	161	2290	184	2620
	5.2	0.203	27.43	18.26	60	850	70	990	70	990	104	1480	114	1620	129	1840	141	2000	149	2120	161	2290	174	2470	198	2820
	5.6	0.219	29.48	19.66	61	910	75	1070	75	1070	112	1600	123	1750	139	1980	150	2130	161	2290	174	2480	188	2670	211	3000
	6.4	0.250	33.57	22.36	73	1040	86	1220	86	1220	129	1830	141	2000	159	2260	171	2430	184	2610	199	2830	211	3000	211	3000
	7.0	0.277	36.61	24.70	82	1160	95	1350	95	1350	142	2020	156	2220	176	2510	190	2700	203	2890	211	3000	211	3000	211	3000
	7.9	0.312	41.14	27.70	91	1300	107	1520	107	1520	160	2280	176	2500	198	2820	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000
	8.2	0.322	42.65	28.55	94	1340	110	1570	110	1570	165	2350	181	2580	205	2910	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000
	8.7	0.344	45.14	30.42	101	1440	118	1680	118	1680	176	2510	193	2750	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000
	9.5	0.375	49.10	33.04	110	1570	129	1830	129	1830	193	2740	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

DIAM. EXT.		Espesor de pared		Peso Teórico		PRESIONES HIDROSTÁTICAS DE PRUEBA																									
		pulg.		Kg/m		Lb/ft		A.S.T.M.						A. P. I. 5L																	
		mm.		mm.		mm.		A-53-A		A-53-B		B		X-42		X-46		X-52		X-56		X-60		X-65		X-70		X-80			
								Kg/ Cm ²		PSI		Kg/ Cm ²		PSI		Kg/ Cm ²		PSI		Kg/ Cm ²		PSI		Kg/ Cm ²		PSI		Kg/ Cm ²		PSI	
273.1		4.8	0.188	31.76	21.21	44	630	51	730	51	730	51	730	88	1250	98	1370	109	1550	117	1660	125	1780	126	1930	146	2080	167	2380		
10 3/4		5.2	0.203	34.35	22.87	48	690	56	790	56	790	56	790	95	1350	104	1480	117	1670	127	1800	136	1930	147	2090	158	2250	181	2570		
		5.6	0.219	36.94	24.63	51	730	60	860	60	860	60	860	102	1450	112	1590	127	1800	136	1940	146	2080	158	2250	170	2420	195	2770		
		6.4	0.250	42.09	28.04	59	840	69	980	69	980	69	980	117	1660	128	1820	145	2060	155	2210	167	2370	181	2570	195	2770	211	3000		
		7.1	0.279	46.57	31.20	65	930	77	1090	77	1090	77	1090	130	1850	143	2030	161	2290	174	2470	186	2650	202	2870	211	3000	211	3000		
		7.8	0.307	51.03	34.24	72	1030	84	1200	84	1200	84	1200	143	2040	157	2230	177	2520	191	2720	205	2910	211	3000	211	3000	211	3000		
		8.7	0.344	56.72	38.23	81	1150	94	1340	94	1340	94	1340	160	2280	176	2500	199	2830	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000		
		9.3	0.365	60.50	40.48	86	1220	101	1430	101	1430	101	1430	170	2420	187	2660	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000		
		11.1	0.438	71.72	48.24	103	1470	120	1710	120	1710	120	1710	205	2910	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000		

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

DIAM. EXT.		Espesor de pared		Peso Teórico		PRESIONES HIDROSTATICAS DE PRUEBA																							
		mm.	pulg.	Kg/m	Lb/ft	A.S.T.M.						A. P. I. 5L																	
						A-53-A		A-53-B		B		X-42		X-46		X-52		X-56		X-60		X-65		X-70		X-80			
						Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI
323.9		4.8	0.188	37.77	25.22	37	530	44	620	44	620	74	1050	81	1150	91	1300	98	1400	105	1500	115	1630	123	1750	141	2010	141	2010
12 3/4		5.2	0.203	40.87	27.20	40	570	47	670	47	670	80	1140	88	1250	99	1410	107	1520	114	1620	124	1760	133	1890	153	2470	153	2470
		5.6	0.219	43.96	29.31	44	620	51	720	51	720	86	1230	94	1340	107	1520	115	1640	123	1750	134	1900	143	2040	165	2340	165	2340
		6.4	0.250	50.11	33.38	50	710	58	820	58	820	98	1400	108	1530	122	1730	131	1870	141	2000	153	2170	164	2330	186	2670	186	2670
		7.1	0.281	55.47	37.42	56	790	65	930	65	930	110	1570	121	1720	137	1950	148	2100	158	2000	172	2440	184	2620	211	3000	211	3000
		7.9	0.312	61.56	41.45	62	880	72	1030	72	1030	123	1750	134	1910	152	2160	164	2330	176	2250	190	2700	205	2910	211	3000	211	3000
		8.4	0.330	65.35	43.77	65	930	77	1090	77	1090	130	1850	142	2020	161	2290	173	2460	186	2500	201	2860	211	3000	211	3000	211	3000
		8.7	0.344	67.62	45.58	68	970	79	1130	79	1130	136	1930	148	2110	168	2390	181	2570	193	2640	210	2980	211	3000	211	3000	211	3000
		9.5	0.375	73.65	49.56	75	1060	87	1240	87	1240	148	2100	162	2300	183	2600	197	2800	211	2750	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000
		10.3	0.406	79.65	53.52	81	1150	94	1340	94	1340	160	2270	175	2490	198	2810	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000
		11.1	0.438	85.62	57.59	87	1240	101	1440	101	1440	172	2450	189	2690	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000
		12.7	0.500	97.46	65.42	99	1410	116	1650	116	1650	197	2800	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

DIAM. EXT.	Espesor de pared	Peso Técnico	PRESIONES HIDROSTÁTICAS DE PRUEBA																						
			A. S. T. M.								A. P. I. 5L														
			A-53-A		A-53-B		B		X-42		X-46		X-52		X-56		X-60		X-65		X-70		X-80		
mm.	pulg.	Kg/m	Lb/ft	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI				
mm.	pulg.	Kg/m	Lb/ft	A-53-A		A-53-B		B		X-42		X-46		X-52		X-56		X-60		X-65		X-70		X-80	
4.8	0.188	41.52	27.73	34	480	39	560	39	560	67	960	74	1050	84	1190	90	1280	96	1370	104	1480	112	1600	129	1830
5.2	0.203	44.93	29.91	37	520	43	610	43	610	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	139	1970
5.3	0.210	45.78	30.93	38	540	44	630	44	630	75	1070	82	1170	94	1330	101	1430	108	1530	117	1660	126	1790	143	2040
5.6	0.219	48.33	32.23	39	560	46	660	46	660	79	1120	86	1220	97	1380	105	1490	112	1600	122	1730	131	1860	150	2130
6.4	0.250	55.11	36.71	45	640	53	750	53	750	90	1280	98	1400	111	1580	120	1700	128	1820	139	1970	150	2130	171	2430
7.1	0.281	61.02	41.17	51	720	59	840	59	840	101	1430	110	1570	124	1770	134	1910	144	2050	156	2220	168	2390	192	2730
7.9	0.312	67.74	45.61	56	800	66	940	66	940	112	1590	122	1740	139	1970	149	2120	160	2270	173	2460	186	2650	211	3000
8.7	0.344	74.42	50.17	62	880	72	1030	72	1030	123	1750	135	1920	153	2170	165	2340	176	2510	191	2720	205	2920	211	3000
9.5	0.375	81.08	54.57	67	960	79	1120	79	1120	134	1910	147	2090	167	2370	179	2550	192	2730	208	2960	211	3000	211	3000
10.3	0.406	87.71	58.94	73	1040	86	1220	86	1220	146	2070	160	2270	180	2560	194	2760	208	2960	211	3000	211	3000	211	3000
11.1	0.438	94.30	63.44	79	1130	92	1310	92	1310	157	2223	172	2450	195	2770	210	2980	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000
11.9	0.469	100.86	67.78	85	1210	99	1410	99	1410	168	2390	184	2620	208	2990	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000
12.70	0.500	107.39	72.09	91	1290	105	1500	105	1500	179	2550	196	2790	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

DIAM. EXT. mm	Espesor de pared		Peso Teórico		PRESIONES HIDROSTATICAS DE PRUEBA																				
	mm.	pulg.	Kg/m	Lib/ft	A.S.T.M.						A. P. I. 5L														
					A-53-A		A-53-B		B		X-42		X-46		X-52		X-56		X-60		X-65		X-70		X-80
					Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	
4.8	0.188	47.54	31.75	30	420	34	490	34	490	59	840	65	920	73	1040	79	1120	84	1200	91	1300	98	1400	112	1600
5.2	0.203	51.45	34.25	32	460	37	530	37	530	64	910	70	990	79	1120	85	1210	91	1290	98	1400	106	1510	122	1730
5.6	0.219	55.35	36.91	34	490	40	570	40	570	69	980	75	1070	85	1210	91	1300	98	1400	106	1510	115	1630	131	1860
6.4	0.250	63.13	42.05	39	560	46	660	46	660	79	1120	86	1220	95	1380	105	1490	112	1560	122	1730	131	1860	150	2130
7.1	0.281	69.91	47.17	44	630	52	740	52	740	88	1250	96	1370	109	1550	117	1670	126	1790	136	1940	147	2090	168	2390
7.9	0.312	77.63	52.27	49	700	58	820	58	820	98	1390	107	1520	121	1720	131	1860	140	1990	151	2150	163	2320	186	2650
8.7	0.344	85.32	57.52	54	770	63	900	63	900	108	1540	118	1680	134	1900	144	2050	154	2190	167	2380	180	2560	205	2920
9.5	0.375	92.98	62.58	59	840	69	980	69	980	117	1670	129	1830	146	2070	157	2230	168	2390	182	2590	196	2790	211	3000
10.3	0.406	100.61	67.62	64	910	75	1070	75	1070	127	1810	139	1980	157	2240	170	2420	182	2590	197	2800	211	3000	211	3000
11.1	0.438	108.20	72.80	70	990	81	1150	81	1150	137	1950	150	2140	170	2420	184	2610	196	2790	211	3000	211	3000	211	3000
11.9	0.469	115.77	77.79	75	1060	86	1230	86	1230	147	2090	161	2290	182	2590	196	2790	210	2990	211	3000	211	3000	211	3000
12.70	0.500	123.30	82.77	79	1120	92	1310	92	1310	157	2230	172	2440	194	2760	210	2980	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

PRESIONES HIDROSTATICAS DE PRUEBA

A. P. I. 5L

DIAM. EXT.	Espesor de pared		Peso Teórico		A.S.T.M.																					
	mm.	pulg.	Kg/m	Lb/Ft	A-53-A		A-53-B		B		X-42		X-46		X-52		X-56		X-60		X-65		X-70		X-80	
					Kg/Cm ²	PSI																				
457.0	5.6	0.219	62.34	41.59	31	440	36	510	36	510	61	870	67	950	76	1080	82	1160	87	1240	94	1340	102	1450	116	1650
	6.4	0.250	71.12	47.39	35	500	41	580	41	580	70	990	77	1090	86	1230	93	1320	100	1420	106	1530	116	1650	133	1890
	7.1	0.281	78.77	53.18	39	560	46	660	46	660	78	1110	86	1220	97	1380	105	1490	112	1590	122	1730	131	1860	149	2120
	7.9	0.312	87.49	58.94	44	620	51	730	51	730	87	1240	96	1360	108	1530	116	1650	124	1770	135	1920	145	2060	166	2360
	8.7	0.344	96.18	64.87	49	690	56	800	56	800	96	1360	105	1490	119	1690	128	1820	137	1950	148	2110	160	2270	183	2600
	9.5	0.375	104.84	70.59	53	750	62	880	62	880	105	1490	115	1630	129	1840	139	1980	149	2120	162	2300	174	2480	199	2830
	10.3	0.406	113.46	76.29	57	810	67	950	67	950	113	1610	124	1760	140	1990	151	2150	162	2300	175	2490	188	2680	211	3000
	11.1	0.438	122.05	82.15	62	880	72	1020	72	1020	122	1740	134	1900	151	2150	163	2320	174	2480	189	2690	204	2900	211	3000
	11.9	0.469	130.62	87.61	66	940	77	1090	77	1090	131	1860	143	2040	162	2300	174	2480	187	2660	202	2880	211	3000	211	3000
	12.7	0.500	139.15	93.45	70	1000	82	1170	82	1170	139	1980	153	2170	173	2460	186	2640	199	2830	211	3000	211	3000	211	3000

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

PRESIONES HIDROSTATICAS DE PRUEBA

A. P. I. 5L

DIA. EXT.	Espesor de pared		Peso Teórico		A.S.T.M.																					
	mm.	pulg.	Kg/m	Lb/Ft	A-53-A		A-53-B		B		X-42		X-46		X-52		X-56		X-60		X-65		X-70		X-80	
					Kg/Cm ²	PSI																				
	5.6	0.219	69.38	46.27	27	390	32	460	32	460	58	830	64	910	72	1021	77	1100	83	1180	90	1280	97	1380	111	1580
	6.4	0.250	79.16	52.73	32	450	37	520	37	520	67	950	73	1040	82	1170	89	1260	95	1350	103	1460	111	1580	127	1800
	7.1	0.281	87.80	59.18	36	510	41	590	41	590	75	1060	82	1160	93	1320	100	1420	107	1520	115	1640	124	1770	142	2020
	7.9	0.312	97.43	65.60	39	560	46	660	46	660	83	1180	91	1290	103	1460	110	1570	118	1680	129	1830	139	1970	158	2250
	8.7	0.344	107.12	72.21	44	620	51	720	51	720	91	1300	100	1420	113	1610	122	1730	131	1860	141	2010	153	2170	174	2480
	9.5	0.375	116.78	78.60	48	680	56	790	56	790	100	1420	109	1550	124	1760	133	1890	143	2030	154	2190	166	2360	190	2700
	10.3	0.406	126.41	84.96	51	730	60	850	60	850	108	1530	118	1680	134	1900	144	2050	154	2190	167	3280	180	2560	205	2920
	11.1	0.438	130.01	91.51	56	790	65	920	65	920	117	1660	127	1810	144	2050	155	2210	167	2370	180	2560	194	2760	211	3000
	11.9	0.469	145.58	97.83	59	840	69	980	69	980	124	1770	138	1940	154	2190	166	2360	178	2530	193	2740	207	2950	211	3000
	12.7	0.500	156.12	104.13	63	900	74	1050	74	1050	133	1890	146	2070	165	2340	177	2520	190	2700	206	2930	211	3000	211	3000
	14.3	0.562	174.10	116.67	71	1010	83	1180	83	1180	149	2120	164	2330	186	2630	199	2830	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000
	15.9	0.625	192.95	129.33	79	1120	92	1310	92	1310	166	2660	182	2590	206	2930	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000
	17.5	0.688	211.88	141.90	87	1240	101	1440	101	1440	183	2600	200	2850	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000
	19.1	0.750	230.27	154.19	95	1350	111	1580	111	1580	200	2840	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

DIAM. EXT. mm.	Espesor de pared		Peso Teórico		PRESIONES HIDROSTÁTICAS DE PRUEBA																				
	mm.	pulg.	kg/m.	Lb/Ft.	A.S.T.M.				A. P. I. 5L				A. P. I. 5L												
					A-53-A		A-53-B		B		X-42		X-46		X-52		X-56		X-60		X-65		X-70		X-80
					Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	
5.6	0.219	76.42	50.94	25	360	30	420	30	420	53	750	58	820	65	930	70	1000	76	1080	82	1160	88	1250	101	1431
6.4	0.250	87.21	58.07	29	410	34	480	34	480	60	860	66	940	75	1060	81	1150	86	1230	94	1330	101	1430	115	1641
7.1	0.281	96.63	65.18	32	460	38	540	38	540	68	970	75	1060	84	1200	91	1290	97	1380	105	1490	113	1610	129	1841
7.9	0.312	107.36	72.27	36	510	42	600	42	600	75	1070	82	1170	94	1330	101	1430	108	1530	117	1660	126	1790	143	2041
8.7	0.344	118.06	79.56	39	560	46	660	46	660	83	1180	91	1290	103	1480	111	1580	119	1690	129	1830	139	1970	158	2251
9.5	0.375	128.73	86.61	43	610	51	720	51	720	91	1290	99	1410	112	1600	121	1720	129	1840	140	1990	151	2150	172	2451
10.3	0.406	139.37	93.63	46	660	55	780	55	780	98	1400	108	1530	122	1730	131	1860	140	1990	152	2160	164	2330	187	2661
11.1	0.438	149.97	100.86	51	720	59	840	59	840	106	1510	116	1650	131	1880	141	2010	151	2150	164	2330	176	2510	202	2871
11.9	0.469	160.55	107.85	54	770	63	900	63	900	113	1610	124	1770	141	2000	151	2150	162	2300	175	2490	189	2690	211	3001
12.70	0.500	171.09	114.81	58	820	67	950	67	950	121	1720	132	1880	150	2130	161	2290	172	2450	187	2660	201	2860	211	3001
14.3	0.562	192.08	128.67	65	920	75	1070	75	1070	136	1930	149	2120	168	2390	181	2570	194	2760	210	2990	211	3000	211	3001
15.9	0.625	212.95	142.68	72	1020	84	1190	84	1190	151	2150	165	2350	187	2660	201	2860	211	3000	211	3000	211	3000	211	3001

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

DIAM. EXT.	Espesor de pared		Peso Teórico		PRESIONES HIDROSTATICAS DE PRUEBA																					
	mm.	puig.	kg/m	Lb/Ft	A.S.T.M.				A. P. I. 5L				X													
					A-53-A		A-53-B		B		X-42		X-46		X-52		X-56		X-60		X-65		X-70		X-80	
					Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI
	6.4	0.250	95.26	63.41	27	380	31	440	31	440	56	790	60	860	68	980	74	1050	79	1130	86	1220	92	1310	106	1500
	7.1	0.281	105.56	71.16	30	420	34	490	34	490	63	890	68	970	77	1100	83	1180	89	1260	96	1370	104	1480	119	1690
	7.9	0.312	117.30	78.93	33	470	39	550	39	550	69	980	76	1080	86	1220	92	1310	98	1400	107	1520	115	1640	131	1870
	8.7	0.344	129.00	86.91	37	520	42	600	42	600	76	1080	84	1190	94	1340	101	1440	109	1550	118	1680	127	1810	145	2060
	9.5	0.375	140.88	94.62	39	560	46	660	46	660	83	1180	91	1290	103	1460	111	1580	119	1690	129	1830	139	1970	158	2250
	10.3	0.406	152.32	102.31	43	610	50	710	50	710	90	1280	98	1400	111	1580	120	1710	129	1830	139	1980	150	2130	172	2440
	11.1	0.438	163.93	110.22	46	660	54	770	54	770	97	1380	106	1510	120	1710	129	1840	139	1970	150	2140	162	2300	185	2630
	11.9	0.469	175.51	117.86	49	700	58	820	58	820	104	1480	114	1620	129	1830	139	1970	148	2110	161	2290	173	2460	198	2810
	12.7	0.500	187.06	125.49	53	750	62	880	62	880	111	1580	122	1730	137	1950	148	2100	158	2250	172	2440	185	2630	211	3000
	14.3	0.562	210.07	140.68	59	840	69	980	69	980	124	1770	136	1940	154	2190	166	2360	178	2530	193	2740	207	2950	211	3000
	15.9	0.625	232.94	156.03	66	940	77	1090	77	1090	139	1970	152	2160	172	2440	185	2630	198	2810	211	3000	211	3000	211	3000
	17.5	0.688	255.69	171.29	72	1030	84	1200	84	1200	153	2170	167	2370	188	2680	203	2890	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000
	19.1	0.750	278.32	186.23	79	1120	92	1310	92	1310	166	2360	182	2590	206	2930	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000
	20.6	0.812	299.41	201.09	86	1220	100	1420	100	1420	180	2560	197	2800	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000

TESIS CON
FALLA FE ORGEN

DIAM. EXT. mm.	Espesor de pared		Peso Teórico		PRESIONES HIDROSTATICAS DE PRUEBA																					
	mm.	pulg.	Kg/m ³	Lb./Ft	A.S.T.M.						A. P. I. 5L															
					A-53-A		A-53-B		B	X-42	X-46	X-52	X-56	X-60	X-65	X-70	X-80									
			Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI								
6.4	0.250		119.25	79.43	21	300	25	350	27	350	44	630	49	690	55	780	59	840	63	900	69	980	74	1050	84	1200
7.1	0.281		132.17	89.19	24	340	27	390	31	390	50	710	55	780	62	880	66	940	71	1010	77	1100	83	1180	95	1350
7.9	0.312		146.91	98.93	26	370	31	440	34	440	56	790	60	860	68	970	74	1050	79	1120	86	1220	92	1310	105	1500
8.7	0.344		161.61	108.95	29	410	34	480	37	480	61	870	67	950	75	1070	82	1160	87	1240	94	1340	101	1440	116	1650
9.5	0.375		176.29	118.65	32	450	37	520	41	520	66	940	73	1040	82	1170	89	1260	95	1350	103	1460	111	1580	127	1800
10.3	0.406		190.93	128.32	34	490	41	590	43	590	72	1020	79	1120	89	1270	96	1360	103	1460	111	1580	120	1710	137	1950
11.1	0.438		205.54	138.29	37	530	43	610	46	610	77	1100	85	1210	96	1370	103	1470	111	1580	120	1710	129	1840	148	2100
11.9	0.469		220.12	147.92	39	560	46	660	49	660	83	1180	91	1290	103	1460	111	1580	119	1690	129	1830	134	1970	158	2250
12.7	0.500		234.67	157.53	42	600	49	700	56	700	89	1260	97	1380	110	1560	118	1680	127	1800	137	1950	148	2100	169	2400
14.3	0.562		263.67	176.69	47	670	56	790	62	790	100	1420	109	1550	123	1750	133	1890	142	2020	154	2190	166	2360	190	2700
15.9	0.625		292.54	196.08	53	750	62	880	67	880	111	1580	121	1720	137	1950	148	2100	158	2250	172	2440	185	2630	211	3000
17.5	0.688		321.29	215.38	58	830	67	960	74	960	122	1730	134	1900	151	2150	162	2310	174	2480	188	2680	203	2890	211	3000
19.1	0.750		349.91	234.29	63	900	74	1050	80	1050	133	1890	146	2070	165	2340	177	2520	190	2700	205	2920	211	3000	211	3000
20.6	0.812		376.63	253.12	68	970	80	1140	86	1140	144	2050	157	2240	178	2530	192	2730	205	2920	211	3000	211	3000	211	3000
22.2	0.875		405.00	272.17	74	1050	86	1220	92	1220	155	2200	170	2420	192	2730	207	2940	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000
23.8	0.938		433.26	291.14	79	1130	92	1310	100	1310	166	2360	182	2590	206	2930	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

DIAM. EXT.	Espesor de pared		Peso Teórico		PRESIONES HIDROSTATICAS DE PRUEBA																					
	mm.	pulg.	Kg/m	lb/ft	A.S.T.M.						A. P. I. 5L															
					A-53-A		A-53-B		B		X-42		X-46		X-52		X-56		X-60		X-65		X-70		X-80	
					Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI
	6.04	0.250	127.3	84.77	20	280	23	330	23	330	41	590	46	650	51	730	56	790	59	840	64	910	69	980	79	1130
	7.1	0.281	141.1	95.19	23	320	26	370	26	370	46	660	51	730	58	820	63	890	67	950	72	1030	78	1110	89	1260
	7.9	0.312	156.84	105.59	25	350	29	410	29	410	52	740	57	810	64	910	69	980	74	1050	80	1140	86	1230	98	1400
	8.7	0.344	172.56	116.30	27	390	32	450	32	450	57	810	63	890	71	1010	76	1080	82	1160	89	1260	95	1350	109	1550
	9.5	0.375	188.24	126.66	30	420	34	490	34	490	63	890	68	970	77	1100	83	1180	89	1270	96	1370	104	1480	119	1690
	10.3	0.406	203.88	136.99	32	460	37	530	37	530	68	960	74	1050	84	1190	90	1280	96	1370	104	1480	113	1600	129	1830
	11.1	0.438	219.5	147.64	34	490	40	570	40	570	72	1030	79	1130	90	1280	97	1380	104	1480	113	1600	121	1720	139	1970
	11.9	0.469	235.09	157.94	37	530	44	620	44	620	78	1110	85	1210	96	1370	104	1480	111	1580	120	1710	130	1850	148	2110
	12.7	0.500	250.64	168.21	39	560	46	660	46	660	83	1180	91	1290	103	1460	111	1580	119	1690	129	1830	139	1970	158	2250
	14.3	0.562	281.65	188.70	44	63	52	740	52	740	94	1330	102	1450	115	1640	124	1770	134	1900	144	2050	155	2210	178	2530
	15.9	0.625	312.54	209.43	49	700	58	820	58	820	104	1480	114	1620	129	1830	139	1970	148	2110	161	2290	173	2460	198	2810

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

DIAM. EXT. mm.	Espesor de pared		Peso Teórico		PRESIONES HIDROSTATICAS DE PRUEBA																				
	mm.	pulg.	Kg/m	Lb./ft	A.S.T.M.				A. P. I. 5L																
					A-53-A		A-53-B		B		X-42	X-46	X-52	X-56	X-60	X-65	X-70	X-80							
					Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI							
7.1	0.281	158.79	107.20	20	280	23	330	23	330	41	590	46	650	51	730	56	790	59	840	64	910	69	980	79	1120
7.9	0.312	176.52	118.92	22	310	25	360	25	360	46	660	51	720	57	810	61	870	66	940	71	1010	77	1090	88	1250
8.7	0.344	194.22	131.00	24	340	28	400	28	400	51	720	56	790	63	890	67	960	72	1030	79	1120	84	1200	97	1380
9.5	0.375	211.90	142.68	27	380	31	440	31	440	56	790	60	860	69	980	74	1050	79	1120	86	1220	92	1310	105	1500
10.3	0.406	219.54	154.34	29	410	33	470	33	470	60	850	65	930	75	1060	80	1140	86	1220	93	1320	100	1420	114	1620
11.1	0.438	247.15	166.35	31	440	36	510	36	510	65	920	71	1010	80	1140	86	230	92	1310	100	1420	108	1530	123	1750
11.9	0.469	264.72	177.97	33	470	39	550	39	550	69	980	76	1080	86	1220	92	1310	99	1410	107	1520	115	1640	132	1880
12.7	0.500	282.27	189.57	35	500	41	580	41	580	74	1050	81	1150	92	1300	98	1400	105	1500	114	1620	123	1750	141	2000
14.3	0.562	317.27	212.70	39	560	46	660	46	660	83	1180	91	1290	103	1460	110	1570	119	1690	128	1820	139	1970	158	2250
15.9	0.625	352.14	236.13	44	620	51	730	51	730	92	1310	101	1440	114	1620	123	1750	132	1880	143	2030	154	2190	176	2500
17.5	0.688	386.38	259.47	49	690	56	800	56	800	101	1440	111	1580	126	1790	136	1930	145	2060	157	2240	169	2410	193	2750
19.1	0.750	421.50	282.35	53	750	62	880	62	880	111	1580	121	1720	137	1950	148	2100	158	2250	172	2440	185	2630	211	3000
20.6	0.812	453.84	305.16	57	810	67	950	67	950	120	1710	131	1870	148	2110	160	2270	172	2440	186	2640	200	2840	211	3000
22.2	0.875	488.22	328.24	62	880	72	1020	72	1020	129	1840	141	2010	160	2280	172	2450	184	2620	200	2840	211	3000	211	3000
23.8	0.938	522.47	351.25	66	940	77	1090	77	1090	139	1970	152	2160	172	2440	185	2630	198	2810	211	3000	211	3000	211	3000
25.4	1.000	556.59	373.80	70	1000	82	1170	82	1170	148	2100	162	2300	183	2600	197	2800	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000
27.0	1.062	590.58	396.27	75	1060	87	1240	87	1240	157	2230	172	2440	194	2760	209	2970	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000
28.6	1.125	624.45	419.02	79	1130	92	1310	92	1310	166	2360	182	2580	206	2930	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000	211	3000

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

PRESIONES HIDROSTATICAS DE PRUEBA

A. P. I. 5L

DIAM. EXT. mm.	Espesor de pared		Peso Teórico		A.S.T.M.																					
	mm.	pulg.	Kg/m	Lb/Ft	A-53-A		A-53-B		B		X-42		X-46		X-52		X-56		X-60		X-65		X-70		X-80	
					Kg/Cm ²	PSI																				
8.7	0.344	227.05	153.04	20	290	24	340	24	340	44	620	48	680	54	770	58	830	62	880	67	960	72	1030	83	1180	
9.5	0.375	247.74	166.71	22	320	27	380	27	380	48	680	52	740	59	840	63	900	67	960	73	1040	79	1130	91	1290	
10.3	0.406	268.40	180.35	25	350	29	410	29	410	51	730	56	800	63	900	68	970	73	1040	79	1130	86	1220	98	1390	
11.1	0.438	289.03	194.42	27	380	31	440	31	440	56	790	60	860	69	980	74	1050	79	1130	86	1220	92	1310	105	1500	
11.9	0.469	309.62	208.03	28	400	33	470	33	470	59	840	65	920	74	1050	79	1130	85	1210	92	1310	99	1410	113	1610	
12.7	0.500	330.19	221.61	30	430	35	500	35	500	63	900	70	990	78	1110	84	1200	91	1290	98	1390	105	1500	120	1710	
14.3	0.562	371.22	248.72	34	480	39	560	39	560	71	1010	78	1110	88	1250	95	1350	102	1450	110	1570	119	1690	136	1930	
15.9	0.625	412.13	276.18	38	540	44	620	44	620	79	1120	86	1230	98	1390	105	1500	113	1610	122	1740	132	1880	150	2140	
17.5	0.688	452.91	303.55	41	590	49	690	49	690	87	1240	96	1360	108	1530	116	1650	124	1770	135	1920	145	2060	166	2360	
19.1	0.750	493.57	330.41	45	640	53	750	53	750	95	1350	104	1480	117	1670	127	1800	136	1930	147	2090	158	2250	181	2570	
20.6	0.812	531.57	357.19	49	700	57	810	57	810	103	1460	112	1600	127	1810	137	1950	147	2090	159	2260	172	2440	195	2780	
22.2	0.875	571.98	384.31	53	750	62	880	62	880	111	1580	121	1720	137	1950	148	2100	158	2250	172	2440	185	2630	211	3000	
23.8	0.938	612.26	411.35	56	800	66	940	66	940	119	1680	130	1858	147	2090	158	2250	169	2410	184	2610	198	2810	211	3000	
25.4	1.000	652.42	437.88	60	860	70	1000	70	1000	127	1800	139	1970	157	2230	169	2400	181	2570	196	2790	211	3000	211	3000	
27.0	1.062	692.45	464.32	64	910	75	1060	75	1060	134	1910	147	2090	167	2370	179	2550	192	2730	208	2960	211	3000	211	3000	
28.6	1.125	732.36	491.11	67	960	79	1130	79	1130	143	2030	156	2220	176	2510	190	2700	203	2890	211	3000	211	3000	211	3000	

**TESIS CON
FALLA DE ORDEN**

DIAM. EXT.		Espesor de pared		Peso Teórico		PRESIONES HIDROSTATICAS DE PRUEBA																							
						A.S.T.M.						A. P. I. 5L																	
mm.	puílgadas	mm.	puílg.	Kg/m	Lb/Ft	A-53-A		A-53-B		B		X-42		X-46		X-52		X-56		X-60		X-65		X-70		X-80			
						Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI	Kg/Cm ²	PSI		
10.3	0.406	307.01	206.37	21	300	25	360	25	360	45	640	49	700	56	790	60	850	64	910	70	990	75	1070	86	1220				
11.1	0.438	330.63	222.49	23	330	27	380	27	380	49	690	53	760	60	850	65	920	70	990	75	1070	81	1150	92	1310				
11.9	0.469	354.23	238.08	25	350	29	410	29	410	52	740	57	810	64	910	69	980	74	1050	79	1120	86	1230	99	1410				
12.7	0.500	375.79	253.65	27	380	31	440	31	440	56	790	60	860	69	980	74	1050	79	1120	86	1220	92	1310	105	1500				
14.3	0.562	424.82	284.73	30	420	34	490	34	490	63	890	68	970	77	1100	83	1180	89	1260	96	1370	104	1480	119	1690				
15.9	0.625	471.73	316.23	33	470	39	550	39	550	69	980	76	1080	86	1220	92	1310	99	1410	107	1520	115	1640	132	1880				
17.5	0.688	518.51	347.64	37	520	42	600	42	600	76	1080	84	1190	94	1340	101	1440	109	1550	118	1680	127	1810	145	2060				
19.1	0.750	565.16	378.47	39	560	46	660	46	660	83	1180	91	1290	103	1460	111	1580	119	1690	129	1830	139	1970	158	2250				
20.6	0.812	608.76	409.22	43	610	50	710	50	710	90	1280	98	1400	111	1580	120	1710	129	1830	139	1980	150	2130	172	2440				
22.2	0.875	655.19	440.38	46	660	54	770	54	770	97	1380	106	1510	120	1710	129	1840	139	1970	150	2130	162	2300	185	2630				
23.8	0.938	701.47	471.46	49	700	58	820	58	820	104	1480	114	1620	129	1830	139	1970	148	2110	161	2290	173	2460	198	2810				
25.4	1.000	747.63	501.96	53	750	62	880	62	880	111	1580	121	1720	137	1950	148	2100	158	2250	172	2440	185	2630	211	3000				
27.0	1.062	793.66	532.38	56	800	65	930	65	930	117	1670	129	1830	146	2070	157	2230	168	2390	182	2590	196	2790	211	3000				
28.6	1.125	839.55	563.20	59	840	69	980	69	980	124	1770	136	1940	154	2190	165	2360	178	2530	193	2740	207	2950	211	3000				

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN