

## Control de la Corrosión

*M.L. Berndt y A.J. Philippacopoulos*

Brookhaven National Laboratory, NY

**Resumen extenso del artículo original, publicado en el *Bulletin del Geothermal Resources Council (GRC)* Volumen 33, No. 1, Enero - Febrero de 2004, reproducido con permiso del editor. Resumen y traducción por José Luis Quijano León.**

---

El daño a las tuberías de acero por corrosión o erosión-corrosión en las instalaciones geotérmicas es un asunto común y, en ocasiones, costoso. En ambientes corrosivos severos la vida útil de las tuberías puede ser menor de cinco años e incluso de un año. Un programa general de prevención de la corrosión y mantenimiento incluye la selección de los materiales, detalles de diseño, uso de recubrimientos o inhibidores, modificación de la química de los fluidos, observación y uso de pruebas no destructivas. Este artículo trata sobre desarrollos recientes de pruebas no destructivas y técnicas de reparación que pudieran aplicarse a la industria geotérmica.

### **Pruebas no destructivas (PND)**

Mediante métodos de PND se puede detectar la corrosión en sus etapas tempranas. El método seleccionado debe ser congruente con el tipo de proceso corrosivo. Algunos métodos son más adecuados para corrosión uniforme, otros para corrosión localizada. Un ejemplo de esta última es la corrosión por picaduras (*pitting*) aisladas o en racimos, o las estrías y hendiduras por erosión-corrosión.

La probabilidad de detectar la corrosión por picaduras mediante la medición puntual ultrasónica de espesor de tuberías es escasa. Además, el método es poco práctico para inspeccionar grandes longitudes de tuberías. Se requiere, más bien, un método que permita barrer tramos largos de tubería desde una localización, que no sea necesario remover grandes cantidades de recubrimiento aislante y que cubra el 100% del volumen inspeccionado. El método de ondas guiadas de largo alcance cumple con estos requisitos.

Los sistemas comerciales disponibles consisten en un anillo de transductores piezoeléctricos múltiples acoplados en forma seca, abrazado a la superficie externa del tubo, o una banda sensora "magnetostrictiva" que se envuelve alrededor de tubo. En el primer caso, los sensores piezoeléctricos se fijan en la localización deseada y, desde ahí, envían ondas en ambas direcciones y se reciben las señales reflejadas. El recubrimiento aislante sólo se retira en donde se fija el dispositivo. Es posible utilizar múltiples modos de onda. La onda reflejada se analiza para detectar las picaduras que aparecen como pinchos en la gráfica de amplitud vs distancia.

El alcance del método depende de diversos factores. El rango ideal es del orden de 50 m en ambas direcciones, pero puede alcanzar hasta 175 m. En arreglos complejos el rango es de 10 a 20 m. El límite de detección del defecto es de 5 a 10% del grosor del tubo. La temperatura máxima de operación varía de 70 a 160°C, por lo que puede usarse en sistemas de reinyección o en vaporductos fuera de servicio. Se puede obtener más información sobre este método en los sitios: [www.guided-ultrasonics.com](http://www.guided-ultrasonics.com) y [www.plantintegrity.com](http://www.plantintegrity.com).

El dispositivo magnetostrictivo consiste en dos conjuntos de bobinas inductivas que envuelven al tubo. La bobina transmisora genera un campo magnético variable que, a su vez, da lugar a la propagación de una onda

elástica en las paredes del tubo debida al efecto magnetoestrictivo. Las ondas se propagan hasta 30 m en ambos sentidos. La segunda bobina se usa para detectar los cambios en la inducción magnética del tubo, debidos al efecto magnetoestrictivo inverso una vez que la onda ha pasado. Con ello se obtiene una gráfica de amplitud vs distancia en la que se pueden detectar los defectos. Este dispositivo puede trabajar a altas temperaturas, siendo el límite la temperatura de Curie del material del sensor. Puede consultarse alguna información sobre sistemas comerciales en el sitio: [www.mkckorea.com](http://www.mkckorea.com).

### Evaluación de la resistencia remanente



Una vez que se han detectado y cuantificado los defectos, es necesario estimar la resistencia remanente de la tubería y predecir su vida útil. Existen varios métodos determinísticos que se aplican a tuberías bajo presión y corroídas por la parte externa. Algunos de ellos son: ASME B31G, RSTRENG 0.85dL, RSTRENG Effective Area y DNV RP-F101. Estos métodos usan expresiones matemáticas que relacionan algunos parámetros geométricos de los defectos con las propiedades mecánicas de la tubería y con otros factores.

Los métodos de elementos finitos se usan para analizar la influencia de diferentes tamaños y formas de defectos en la presión de falla del tubo. Las predicciones de estos métodos han sido comparadas con pruebas experimentales, resultando bastante exactas.

Adicionalmente, el método de diferencias finitas se usó para validar los métodos determinísticos. Se encontró que estos últimos subestiman la resistencia remanente de la tubería, lo cual podría llevar a reemplazarla antes de que sea necesario.

Otro aspecto interesante es la comparación entre corrosión interna y externa. Es decir, ¿un tubo con defectos de corrosión internos falla a la misma presión que un tubo con defectos externos? A primera vista la respuesta parece ser positiva, si las geometrías de los defectos y las propiedades de los materiales son las mismas. Sin embargo, la respuesta puede ser diferente si la geometría de la corrosión y la distribución espacial varían de manera más amplia. Estos casos pueden ser estudiados con diferencias finitas.

### Métodos de reparación y su aplicabilidad

La tubería dañada puede ser reemplazada, reparada u operada a menor presión. La reparación en sitio ofrece grandes ventajas. El método tradicional, consistente en cortar el tramo dañado y soldar uno nuevo, puede ser sustituido por el uso de camisas externas rellenas de epoxi, abrazaderas y refuerzo compuesto.

Las tuberías geotérmicas se corroen en su interior, lo cual debe tenerse en cuenta al escoger el método de reparación. También debe considerarse que, una vez reparada la tubería, la corrosión puede continuar en el interior si no se modifica la química de los fluidos mediante alguna técnica como la inyección de inhibidores.

Las abrazaderas consisten, por lo común, de algún tipo de elastómero encasillado en camisas cilíndricas o en dos mitades de conchas. Las abrazaderas se sujetan con pernos a la tubería. Estas abrazaderas son adecuadas para reparaciones localizadas, no para tramos largos. La mayoría de los elastómeros comerciales no son capaces de soportar las temperaturas de los vaporductos. Existe un fluoro-elastómero, conocido como "Aflas" que puede soportar hasta 230°C durante tres meses. Otro elastómero para altas temperaturas es el "Paraflúor".

Las camisas rellenas de epoxi también se usan para reforzar tuberías con corrosión interna. El sistema consiste de dos mitades de concha de acero que se sueldan longitudinalmente y, posteriormente, se ligan con epoxi a la superficie externa del tubo. La lechada de epoxi sirve para transferir los esfuerzos del tubo a la camisa.

Las envolturas compuestas se están usando cada vez más en la reparación de tuberías. Estos materiales consisten de fibra de vidrio o carbón en una matriz de resina epóxica, poliéster o viniléster. Las fibras se entretajan con una fábrica direccional o al azar, lo que permite restablecer la resistencia axial y la tangencial. Esta tecnología puede aplicarse a tramos relativamente largos y a tuberías de grandes diámetros. El grosor de la envoltura es del orden de 1,5 cm. También pueden usarse en recipientes, venteos y otras estructuras.

Los métodos de aplicación de las envolturas pueden agruparse en dos: envoltura húmeda o vendaje previamente fraguado. En el primer caso, el refuerzo de entramado de fibra se impregna con resina y se envuelve alrededor del tubo, tensionando. La cara externa del tubo se prepara antes de la instalación. En el segundo caso, se tiene un rollo de vendaje previamente tratado con resina. Un extremo de la venda se fija al tubo con adhesivo y se continúa envolviendo el tubo, aplicando adhesivo entre cada capa de vendaje. Este método puede ofrecer un resultado más confiable que el método húmedo.

Las presiones máximas de operación son de 100 bar aproximadamente para las camisas rellenas de epoxi y de 50 bar para las envolturas compuestas. Sin embargo, las temperaturas máximas de operación de los sistemas comerciales son de alrededor de 150°C, lo cual limita su aplicación en vaporductos.

Otra alternativa son los recubrimientos internos. Estos han sido usados con éxito en tuberías de agua y de gas. En geotermia se deben tener en cuenta las temperaturas altas y las elevadas tasas de erosión. Un buen recubrimiento interno tendría la ventaja adicional de evitar o, al menos mitigar, la corrosión por un tiempo prolongado.

La decisión de reparar una tubería depende, en primer lugar, de una detallada evaluación del daño por corrosión, mediante pruebas no destructivas, en la que se determine la localización y geometría de los daños. También se debe estimar la probabilidad de aumento de los daños e identificar el mecanismo de corrosión. Con esta información se puede evaluar el método más adecuado, considerando las presiones y temperaturas de trabajo de las tuberías. Igualmente, debe evaluarse la capacidad de la tubería reparada de soportar los esfuerzos, especialmente si la corrosión continúa. Por último, se debe evaluar la viabilidad económica de la reparación, en función de la vida útil que se espera de la tubería reparada.