

ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS COMO HERRAMIENTA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE DISCONTINUIDADES EN LA SUPERFICIE EXTERNA DE TUBERÍAS

EDWARD YESITH MENDOZA GONZÁLEZ

*MSc. (c) Maestría en Ingeniería Electrónica
Grupo de Investigación en Control, Electrónica, Modelado y Simulación – CEMOS.
mae3t3@uis.edu.co*

LUZ AMPARO QUINTERO ORTIZ

*MSc. Ingeniero Metalúrgico
Directora Grupo de Investigación en Desarrollo y Tecnología de Nuevos Materiales – GIMAT.
luzquint@uis.edu.co*

GERARDO SANTOS CASTAÑEDA

*MSc. Ingeniería Metalúrgico
Ecopetrol ICP-VIT, hoy en Coserinco S.A.S
gerardosantos@coserinco.com.co*

*Fecha de recibido: 29/03/2010
Fecha de aprobación: 15/12/2010*

RESUMEN

En la industria petroquímica se tiene la necesidad de utilizar una técnica no destructiva que permita, de forma rápida y adecuada, la cuantificación de la corrosión presente en la superficie externa de tuberías en servicio en los oleoductos y gasoductos, ya que en la actualidad este proceso se realiza de forma manual, haciendo lenta y tediosa la obtención del resultado y de este modo se encuentra sujeta a error humano. Por lo anterior, en el presente artículo se realiza el estudio de las principales técnicas no destructivas con el fin de seleccionar la más adecuada, de tal forma que permita extraer información de las zonas corroídas, como son: la máxima profundidad del área corroída y la proyección de ésta sobre el eje longitudinal de la tubería, las cuales son necesarias en el análisis de integridad y la determinación de la máxima presión de operación de la misma, según las normas establecidas para el transporte y distribución de los hidrocarburos, en particular el código ASME B31 G.

PALABRAS CLAVE: Corrientes Eddy, ensayos no destructivos, inspección visual, radiografía, sistemas ópticos, ultrasonido.

ABSTRACT

In petrochemical industry, it is necessary to use a Non-destructive testing that allows, in a fast and suitable way, the quantification of the present corrosion on the external surface of the pipes used by oil pipelines and gas pipelines. Currently, this process is executed manually, making it slow and tedious to obtain the results and subject to human error. Therefore, in this paper the study of the main Non-destructive testing is done to choose the most suitable one, so that it allows extracting information from the corroded zones, such as: the maximum depth of the corroded area and the projection of this on the longitudinal axis of the pipelines. This information is required for the analysis of the integrity and determination of the maximum pressure of the pipelines operation, according to the regulations established for transport and distribution of the hydrocarbon, in particular the ASME B31G code.

KEYWORDS: Eddy currents, Non-destructive testing, visual inspection, radiography, optical systems, ultrasound.

1. INTRODUCCIÓN

La corrosión externa de tuberías es una de las problemáticas más frecuentes en oleoductos y gasoductos y si no se realizan evaluaciones periódicas a los mismos, pueden ocurrir accidentes que afectarían el medio ambiente y la vida humana [1], [2].

La determinación de los parámetros, según el código ASME B31G, para obtener la resistencia remanente y la máxima presión de operación de las tuberías corroídas, comúnmente se realiza de forma manual, aplicando inspección visual con la ayuda de galgas de profundidad, pie de rey digital y la técnica de ultrasonido por contacto con palpadores focalizados; este procedimiento es dispendioso, necesita de tiempo para la adquisición de toda la información del área evaluada, mediante la realización de lecturas punto a punto y además está sujeto a error humano. Por lo anterior, se tiene la necesidad de buscar una técnica no destructiva que permita de forma rápida y adecuada la cuantificación de la corrosión presente en la superficie externa de tuberías en servicio en los oleoductos y gasoductos.

En el presente estudio se hace una revisión y comparación en cuanto a la sensibilidad, capacidad de inspección y facilidad de aplicación en campo, de las principales técnicas no destructivas que permiten identificar y dimensionar las zonas corroídas en las tuberías, tales como la radiografía industrial, corrientes Eddy, ultrasonido y sistemas ópticos de visión remota.

2. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA REMANENTE EN TUBERÍA CORROÍDA

La corrosión en tuberías de transporte de hidrocarburos, generalmente ocurre en la parte externa, debido a que la mayoría de estas tuberías se encuentran enterradas y factores como la humedad y el pH del suelo, entre otros, reaccionan con el material de la tubería ocasionando la corrosión superficial de la misma.

La localización de las zonas corroídas se puede realizar aplicando el estándar NACE RP O502, con base en el instructivo para la valoración directa de la corrosión externa (ECDA, *External Corrosion Direct Assessment*) y alguna de las técnicas comúnmente utilizadas ya sea inspección en línea usando marranos inteligentes [3] o técnicas indirectas como la DCVG (*Direct Current Voltage Gradient*) [4] o la CIPS (*Close*

Interval Potential Survey) [5], las cuales identifican los sitios en donde pueden estar ocurriendo procesos corrosivos y clasifican la severidad de dichos procesos [6]. Dependiendo de la severidad de la corrosión se procede a desenterrar la tubería para realizar una valoración directa de la zona corroída así como su dimensionamiento con mayor precisión.

Una de las principales variables a considerar en las tuberías de transporte de hidrocarburos, es la presión interna máxima a la que podrían ser sometidas durante la operación (MAOP, *Maximum Allowable Operating Pressure*), con el fin de lograr un funcionamiento seguro de las tuberías y evitar daños a particulares y al medio ambiente.

En la práctica recomendada DNV-RP-F101 [7] y en los códigos ASME B31 G [8] y ASME B31.8 [9], se relacionan los parámetros necesarios que se deben extraer de las zonas corroídas, para determinar la resistencia remanente de la tubería corroída y su máxima presión de operación permisible. Los parámetros a cuantificar de la zona corroída, para calcular la máxima presión de operación de la tubería, son: La máxima profundidad de la corrosión (d) y la proyección del área corroída sobre el eje longitudinal de la tubería (L_M). Ver Figura 1.

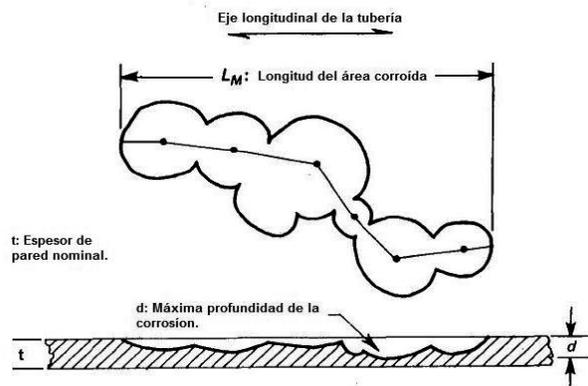


Figura 1. Parámetros usados para el análisis de la corrosión. Fuente: [8].

En la mayoría de los casos, para la obtención de estos parámetros se dibuja una grilla sobre el área corroída de la tubería y se mide manualmente la máxima profundidad de la corrosión, empleando galgas de profundidad o ultrasonido con transductor puntual. Este procedimiento requiere de tiempo y además es tedioso para el inspector, debido a que se encuentra expuesto al sol, humedad y otros factores del medio ambiente donde se desarrolla el trabajo, por lo tanto la información obtenida del área corroída está sujeta a errores humanos. Ver Figura 2.

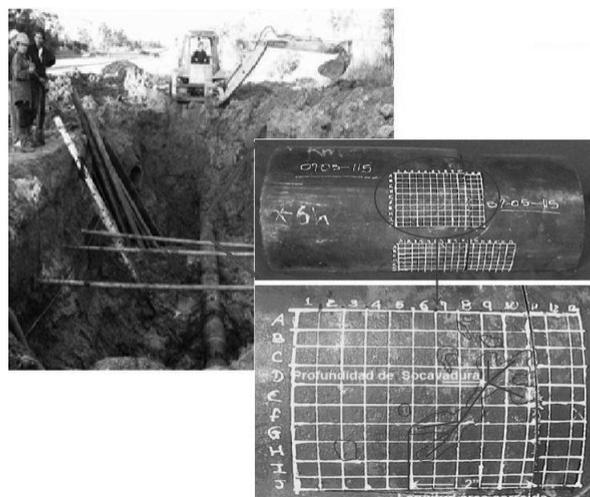


Figura 2. Extracción de parámetros de la tubería corroída, método manual.

3. TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN LA SUPERFICIE EXTERNA DE TUBERÍAS

Con miras a minimizar los errores causados por la subjetividad en la medición empleando galgas de picado o ultrasonido con transductor puntual, se han realizado aplicaciones de otras técnicas no destructivas, para adquisición de datos de las zonas corroídas y la evaluación de la corrosión superficial en las tuberías de transporte de hidrocarburos, algunas de las cuales se presentan a continuación.

3.1 CORRIENTES EDDY

El principio de esta técnica se basa en la excitación de una bobina (sensor) con una corriente alterna. El paso de esta corriente a través de la bobina produce un campo magnético alternante con la misma frecuencia de la corriente de excitación. Al colocar el sensor sobre un material eléctricamente conductor se induce una corriente, la cual fluye por el material y produce un campo magnético secundario opuesto al generado en la bobina [10]. El resultado de la interacción de los dos campos magnéticos es el que permite obtener información de las características del material inspeccionado [11].

Uno de los principales trabajos, utilizando corrientes Eddy, para la medición de defectos causados por la corrosión externa en tuberías, se desarrolló en San Antonio (Texas) por Alfred Crouch y Tood Goyen. Estos ingenieros desarrollaron un arreglo de micro bobinas como se observa en la Figura 3.

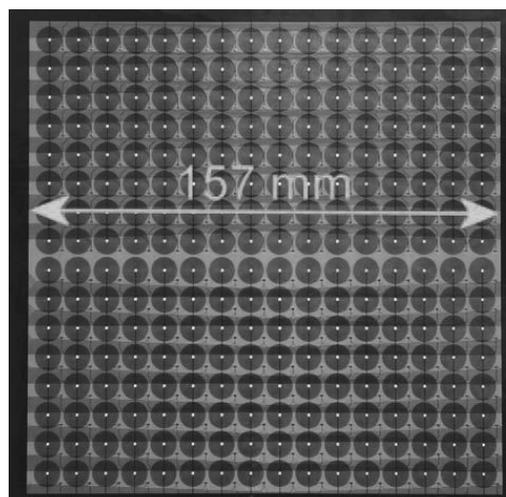


Figura 3. Arreglo de 256 micro-bobinas. Fuente: [6].

Este arreglo cubre un área de 15 x 15 [cm²], lo cual permite obtener un mapa de la corrosión en la tubería de estas dimensiones o mayores por integración de varias áreas consecutivas. La adquisición de datos se realizó, utilizando una tarjeta (DAQ) de National Instrument, con interfaz USB. En la Figura 4 se observa el arreglo de las micro-bobinas sobre la tubería a inspeccionar.



Figura 4. Ubicación del arreglo de micro-bobinas sobre la tubería. Fuente: [12].

Los datos adquiridos se analizan en una interfaz desarrollada en LabView, utilizando los códigos ASME B31.G y el ASME B31.G modificado [12].

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, presentándose como desventajas la potencia necesaria para alimentar el dispositivo y su alto costo para ser desarrollado en serie. El mapa de corrosión obtenido se muestra en la Figura 5.

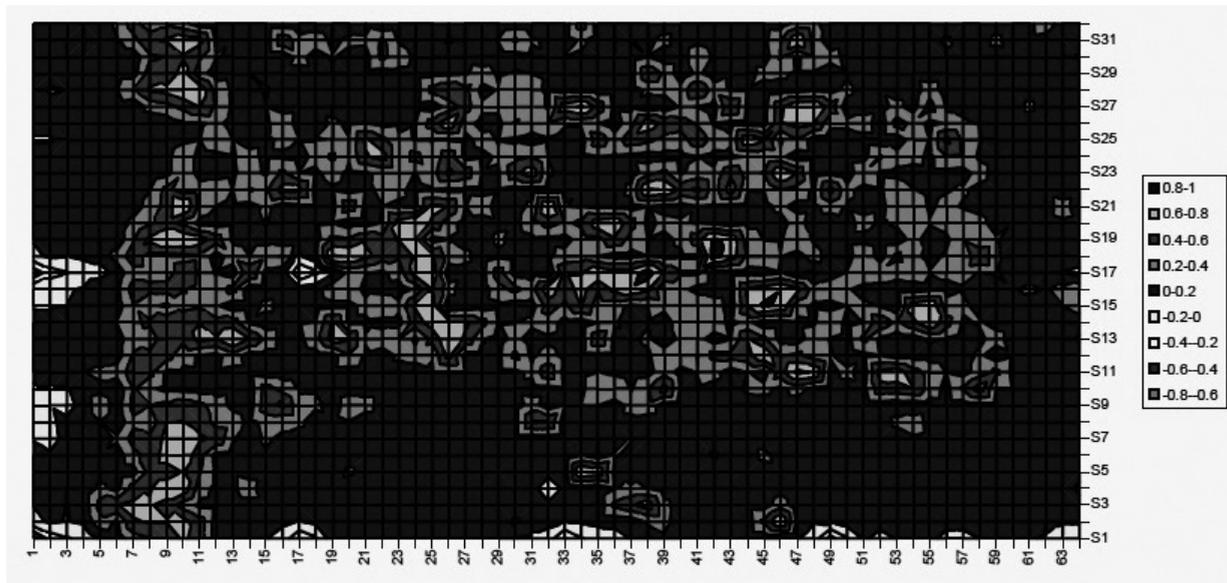


Figura 5. Mapa de profundidades de corrosión obtenido con el arreglo de micro-bobinas. Las unidades se presentan en cm. Fuente [12].

En el mapa de corrosión presentado, se aprecia una resolución de 2 milímetros en la variación de la profundidad de la corrosión. Sin embargo los autores no reportan información de la misma.

Adicional a este trabajo, se han reportado otras investigaciones relacionadas con la construcción de arreglos de sensores flexibles [13] y el empleo de imanes permanentes para inducción de las corrientes empleadas en la inspección de tuberías [14].

Otra técnica que permite la detección de discontinuidades generadas por la corrosión en tuberías de acero al carbono y de aceros de baja aleación, es la técnica de Corrientes de Eddy Pulsante (PEC, por sus siglas en inglés), la cual mide la velocidad de decaimiento de las corrientes Eddy para determinar el espesor de pared de la tubería. La principal ventaja de la técnica PEC, respecto a las corrientes Eddy tradicionales, es su capacidad de penetración en la pieza, mayor a 8mm [15].

3.2 ULTRASONIDO

El principio básico de este método consiste en excitar un transductor piezo-eléctrico el cual convierte la energía eléctrica en energía mecánica. Al energizar el transductor se producen vibraciones a muy altas frecuencias (mayores a 20 kHz) llamadas frecuencias ultrasónicas [16], [17], [18].

La realización de este método consiste en colocar el transductor (palpador) sobre la superficie del material

y desplazarlo sobre el material a evaluar. Cuando la técnica es por contacto, se utiliza un acoplante acústico (glicerina, aceite u otro) para evitar la presencia de aire entre el palpador y la superficie del material y también facilitar el movimiento del transductor sobre la superficie de ensayo. De esta manera las ondas producidas por el transductor entran al material y viajan a través de él hasta encontrar un cambio de medio.

El cambio de medio se puede presentar por la presencia de discontinuidades en el material o simplemente al encontrar la superficie externa del material inspeccionado en contacto con el aire u otro medio. Cuando las ondas ultrasónicas chocan con las discontinuidades presentes en el material, se refleja y son detectadas por el palpador. La ubicación de las discontinuidades se calcula en relación a la velocidad del sonido en el material y el tiempo transcurrido desde la emisión de la onda hasta su recepción [16], [17].

La detección y evaluación de la corrosión en la superficie externa de tuberías se puede realizar aplicando las técnicas de ondas guiadas y ultrasonido por inmersión. Para análisis de defectos en tres dimensiones se aplica los arreglos de fase [19] y ultrasonido multiplexado [20] para inspección automática de grandes superficies.

3.2.1 Ondas Guiadas: La técnica de Ondas Guiadas se desarrollo con el fin de detectar defectos en tuberías enterradas con o sin recubrimientos [21], [22]. Un anillo de transductores, que puede ser rígido o flexible según el diámetro de la tubería, genera pulsos de ondas que recorren

la pared de la misma en ambas direcciones; el equipo capta y analiza cualquier eco de las ondas para detectar defectos que afecten la continuidad de la línea. La sensibilidad para detectar corrosión localizada depende de la fracción de pérdida de pared y la extensión circunferencial del defecto. “El límite de detección de pérdida de pared es por lo general del 9% de la sección transversal de la tubería” [23]. En la Figura 6 se observa el anillo de transductores instalado en la tubería a inspeccionar.

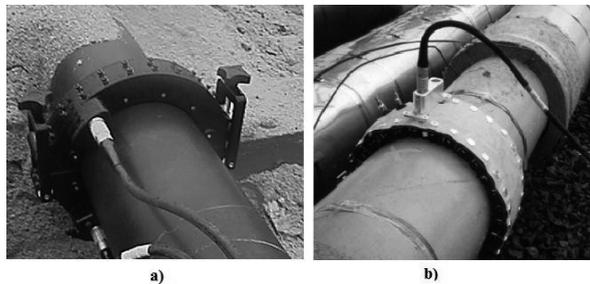


Figura 6. Anillo de transductores. a) Rígido b) Inflable. Fuente: [24]

3.2.2 Ultrasonido por Inmersión: En este modo de operación a diferencia de la técnica tradicional de ultrasonido por contacto, el transductor y la pieza están sumergidos parcial o totalmente en un recipiente con agua u otro medio de acople, de tal manera que no hay contacto entre ellos (manteniendo un acoplamiento continuo), evitándose así el desgaste por fricción del palpador.

Adicionalmente esta técnica tiene la ventaja de poder utilizar altas frecuencias para la inspección y por lo tanto se obtiene una mayor resolución.

Estudios de esta técnica en laboratorio han permitido confirmar su aplicación en la determinación de pérdidas de espesor en la superficie de piezas tubulares, encontrándose menor error en la determinación de pérdidas de espesor mayores al 20% del espesor nominal de la tubería [25].

La aplicación de esta técnica en campo, para la evaluación de la corrosión externa en tubería se puede realizar como se observa en la Figura 7.

En la Figura 7, se puede apreciar que la aplicación de esta técnica en campo tiene algunas limitaciones en cuanto al montaje del sistema sobre la tubería, el espacio libre que se debe tener al rededor de la misma, el control del sistema de desplazamiento del palpador y asegurar la perpendicularidad de este último con la superficie de la tubería.



Figura 7. Sistema de Ultrasonido por inmersión. Fuente: [26].

La complejidad de aplicación en campo y la sensibilidad del palpador a cambios de temperatura, entre otras, hace que esta técnica no sea la más idónea para la evaluación de la corrosión en la superficie externa de tuberías en servicio.

3.3 RADIOGRAFÍA

Esta es una técnica de gran aplicación en la evaluación no destructiva de materiales, la cual utiliza radiaciones penetrantes, rayos x ó rayos gamma, para atravesar los cuerpos permitiendo evaluar su interior. La radiación que pasa a través del cuerpo parcialmente es absorbida (dependiendo del espesor, naturaleza atómica y densidad del material ensayado) y la radiación emergente se puede registrar en imágenes visuales permanentes, como radiografías o en indicaciones de otro tipo [27].

Las grandes diferencias en la radiación emergente son más fáciles de detectar que las pequeñas. En general la radiografía puede detectar solamente aquellas características que tienen espesor apreciable en una dirección paralela al haz de radiación. Esto significa que el alcance de la técnica para la detección de discontinuidades planares, como las grietas, o despegues depende de una orientación adecuada de la pieza durante la inspección. Discontinuidades de tipo volumétrico como poros y huecos, se pueden detectar más fácilmente, pues tienen espesores posibles de medir en todas las direcciones; sin embargo, su tamaño no deber ser tan pequeño en comparación con el espesor de la pieza.

De manera general, se puede decir que es necesario que las discontinuidades a evaluar tengan una diferencia en la absorción de la radiación del orden del 1% ó mayor, comparada con el material circundante para ser detectadas [27].

La radiografía con película como medio de registro, crea inicialmente en ella una imagen latente a causa de la radiación emergente de la pieza, la cual debe ser sometida a un procesamiento químico ó revelado, para generar una imagen permanente en negativo. Las zonas más oscuras de la película revelada corresponden a las partes más delgadas, donde hay mayor radiación emergente y las zonas más claras corresponden a las partes más gruesas donde la radiación saliente es menor [27], [28], [29].

La técnica de radiografía convencional se emplea con éxito en la evaluación de ductos y tanques en la inspección de soldaduras. Adicionalmente esta técnica se ha utilizado en aplicaciones no convencionales como es la determinación del espesor de pared en tuberías con y sin recubrimiento [30], [31], en tanques y accesorios tanto en la industria química como petroquímica, así como en el monitoreo de la corrosión en tuberías [32]. Para estas aplicaciones, se han utilizado algunos métodos de inspección básicos entre los cuales se

encuentran: El método de radiografía tangencial TRT y el de doble pared (TDW) [33].

3.3.1 Radiografía Tangencial (TRT): La técnica radiográfica de proyección tangencial para la inspección de ductos y medición directa del espesor de pared, tiene un cierto arreglo geométrico como el mostrado en la Figura 8 [33]. En este caso solo se analiza la zona de la radiografía en la cual se presenta la proyección del espesor de la tubería. Para obtener una densidad adecuada se necesita más energía que la utilizada para una toma de doble pared, debido a que el espesor del tubo atravesado es mayor.

La aplicación más importante de este método es la medida del espesor de pared de los tubos. Esto es debido a que el espesor de pared es visto en perfil en la radiografía tangencial. Sin embargo se debe tener especial cuidado en esta determinación para incluir solo el tramo tubería a inspeccionar.

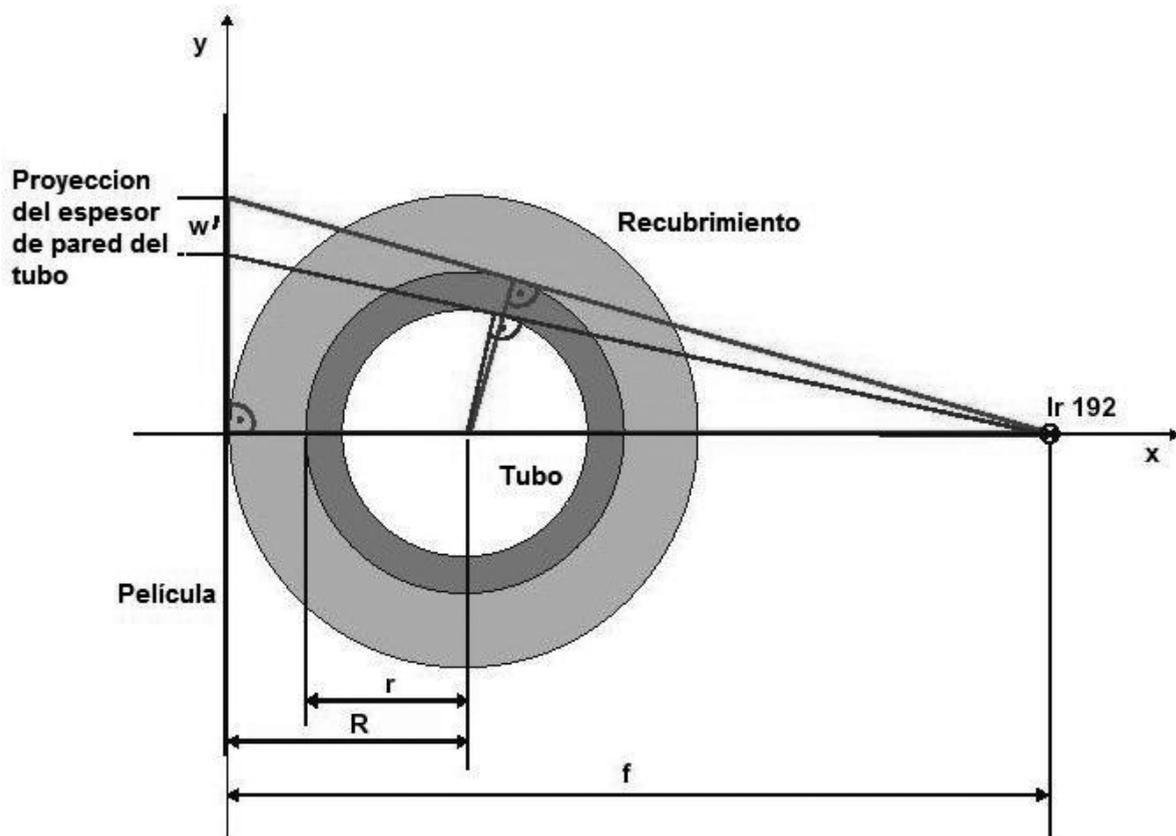


Figura 8. Técnica de radiografía tangencial.

Fuente: [33].

3.3.2 Técnica de Doble Pared (TDW): Para esta técnica se utiliza un arreglo geométrico como el presentado en la Figura 9, donde la fuente se mantiene perpendicular

con respecto al eje axial del tubo. Usualmente se toman dos exposiciones a 90° para una inspección total en los 360° de la tubería.

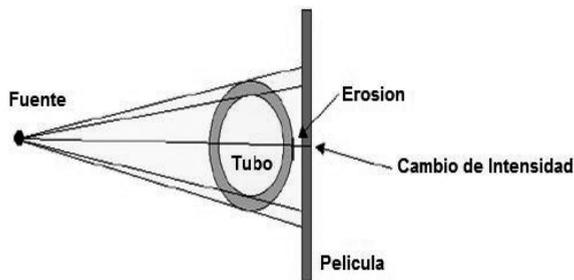


Figura 9. Técnica radiográfica de doble pared. Fuente: [33].

Por este método se pueden analizar los ductos ya sea por la técnica de doble pared doble imagen cuando los diámetros son menores de 3.5 pulgadas ó por doble pared simple imagen cuando el diámetro de la tubería es mayor al anteriormente mencionado [34].

La principal ventaja de estas técnicas radiográficas en la evaluación de corrosión, es que se pueden aplicar sobre las tuberías sin necesidad de retirar el recubrimiento. La caracterización del picado se puede llevar a cabo por la técnica tangencial siempre y cuando el picado esté dentro de la zona analizada. Por la técnica de doble pared se puede ubicar y caracterizar más fácilmente el picado y además el área de evaluación es mayor respecto a la técnica tangencial.

Algunas de las limitaciones encontradas respecto a la técnica radiográfica son: La necesidad de disponer de espacio libre alrededor de la tubería para el montaje del sistema y además presenta riesgos al personal por exposición radiológica.

Entre otros estudios relacionados con radiografía se tienen la radiografía en tiempo real y también la digitalización de imágenes radiográficas [35], [36], [37] con el fin de lograr que la evaluación de la corrosión y la inspección de defectos en soldaduras sea objetiva y rápida [38], [39], [40].

3.4 INSPECCIÓN VISUAL

La técnica de inspección visual consiste en observar directamente la superficie del material a evaluar, con o sin la ayuda de instrumentación auxiliar. Para aplicar este método, el inspector, debe tener una capacitación previa y experiencia en la aplicación del mismo, para dar cumplimiento con lo establecido en códigos, normas y especificaciones tales como el ASME, sección V artículo 9 [41], [42].

La inspección visual directa es uno de los métodos más económicos y rápidos en la detección de

discontinuidades, su principal desventaja es que los resultados son subjetivos y no se pueden cuantificar las discontinuidades ni almacenar los resultados para posterior verificación o análisis [42].

En recientes estudios se ha utilizado tratamiento digital de imágenes y patrones de reconocimiento para automatizar la técnica de inspección visual y de esta forma determinar eficientemente la aceptación o rechazo de la pieza según la especificaciones de las normas. Ya se han realizado algunas aplicaciones específicas en cuanto a la reconstrucción tridimensional de piezas, aún no se ha logrado una generalización del procedimiento a seguir en cuanto a la adquisición de la información y el procesamiento de las imágenes [43].

En el grupo de óptica y tratamiento de señales (GOTS) de la Universidad Industrial de Santander, se desarrollo un trabajo para la reconstrucción tridimensional de la superficie de placas con el fin de detectar ampollas en recubrimientos [44]. En este trabajo el sistema óptico implementado explora una región de $4 \times 3 \text{ mm}^2$, con una resolución de 10 micras, usando la técnica de proyección de franjas, la cual codifica la altura del objeto con base en la deformación de las franjas proyectas sobre el mismo [45], [46], [47], [48]. Ver Figura 10.

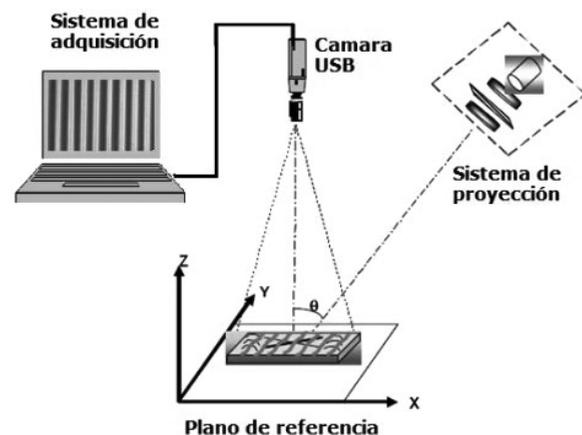


Figura 10. Sistema Óptico para reconstrucción tridimensional de superficies. Fuente: [44].

Otra técnica para la reconstrucción tridimensional de la superficie externa de tuberías, es mediante el método de proyección láser, el cual utiliza un patrón puntual o lineal. Su principio básico es la triangulación, donde la altura para cada punto se codifica en el corrimiento del patrón con respecto a una referencia debido a la topografía de la tubería [44]. En la Figura 11 se observa la reconstrucción tridimensional de una parte de la superficie externa, de una muestra de tubería corroída.

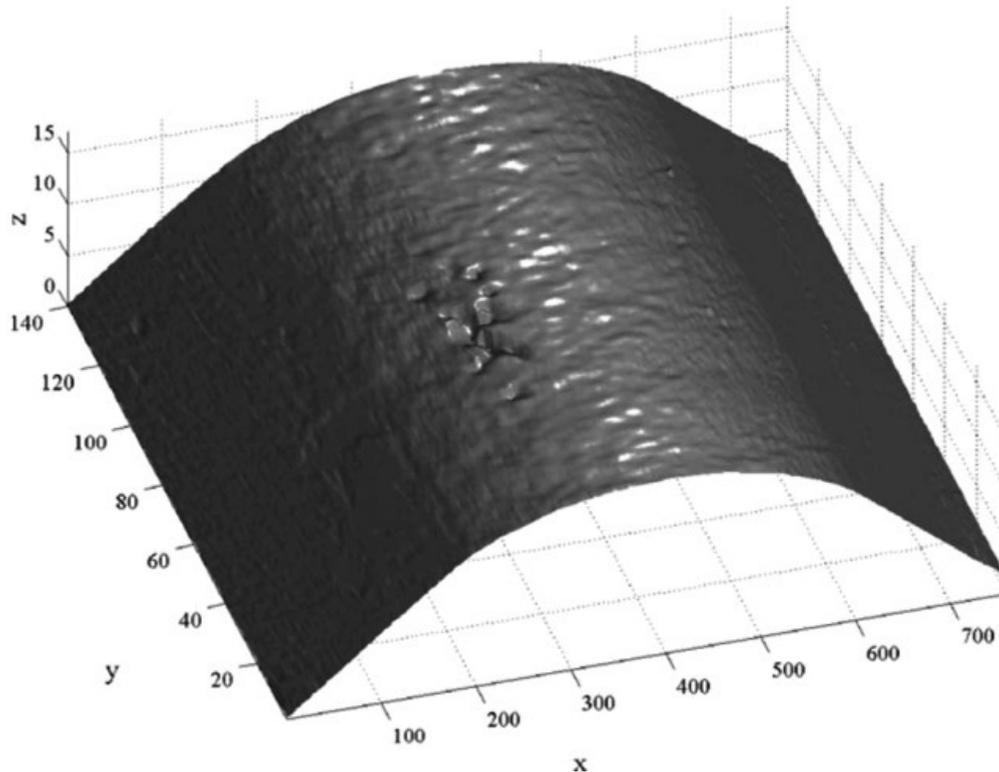


Figura 11. Reconstrucción tridimensional de la superficie de una tubería. Fuente: [49].

Por todo lo anterior, con la aplicación de sistemas ópticos para la reconstrucción en tres dimensiones de zonas corroídas en tubería de oleoductos se espera dar solución al problema de subjetividad, presente en las pruebas de inspección visual directa, y también obtener los parámetros necesarios en el análisis de integridad de las tuberías de forma automática.

4. ANÁLISIS DE LAS TÉCNICAS

Aunque se reportan una gran cantidad de técnicas no destructivas para la detección de discontinuidades en la superficie externa de tuberías [12], [17], [50], el objetivo del presente estudio es identificar las técnicas que permitan no solamente la localización sino el dimensionamiento (cuantificación) de las mismas.

Las principales técnicas no destructivas que permiten la extracción y el dimensionamiento de los parámetros establecidos en el código ASME B31G, para la determinación de las condiciones de operación de tuberías corroídas en la superficie externa son: Las corrientes Eddy, el ultrasonido, la radiografía industrial y los sistemas ópticos.

Las técnicas de corrientes Eddy y Radiografía Industrial permiten la inspección de tuberías con y sin recubrimiento, sin embargo tienen alto costo de aplicación, presentando dificultades para la interpretación de resultados, además de problemas de seguridad industrial en el caso de la radiografía.

Las técnicas ultrasónicas son las más utilizadas debido a la obtención rápida de resultados, para la determinación de las pérdidas de espesor y evaluación de discontinuidades, pero cuando se utiliza el modo de contacto se presentan inconvenientes como la necesidad de alto grado de limpieza de la superficie y los resultados se ven afectados por la temperatura de la tubería. Cuando se utiliza la técnica por inmersión, se tiene como limitante el alto grado de complejidad del montaje en campo.

De las técnicas analizadas, los sistemas ópticos para la reconstrucción en 3D de la superficie externa de las tuberías, presentan la mayor capacidad de resolución, 10 micras en áreas pequeñas ($3 \times 4 \text{ mm}^2$) y hasta 100 micras en áreas de mayor tamaño ($10 \times 10 \text{ cm}^2$). Además no presentan problemas para la salud del operario, su costo de aplicación es bajo y la obtención de resultados es rápida; sin embargo presenta limitaciones en cuanto a

la no detección del picado, influencia de las condiciones de iluminación del ambiente y necesidad de una buena limpieza superficial de la tubería.

5. CONCLUSIONES

Los sistemas ópticos permiten la reconstrucción tridimensional de las superficies externas de tuberías corroídas, por lo tanto son una alternativa con grandes expectativas para el dimensionamiento rápido y adecuado de las zonas corridas a partir del tratamiento digital de imágenes. A diferencia de la inspección visual directa permiten obtener registros de las zonas evaluadas para ser analizados por varios expertos.

Todas las técnicas de ensayos no destructivos analizadas presentan ventajas y limitaciones en cuanto a la detección y dimensionamiento de las discontinuidades superficiales presentes en la tubería, por lo que se concluye que es necesario el uso de más de una técnica no destructiva para la evaluación completa de las mismas.

6. REFERENCIAS

- [1] T. A. Netto, U.S. Ferraz and S. F. Estefen, "The effect of corrosion defects on the burst pressure of pipelines." *Journal of Constructional Steel Research*, Vol 61 No. 8, August 2005, pp 1185-1204.
- [2] T. A. Netto, U.S. Ferraz and A. Botto, "On the effect of corrosion defects on the collapse pressure of pipelines." *International Journal of Solids and Structures*, Vol 44 No. 22-23, November 2007, pp 7597-7614.
- [3] J. Okamoto Jr, J. C. Adamowski, and others, "Autonomous system for oil pipelines inspection." *Mechatronics*, Vol 9 No 7, October 1999, pp 731-743.
- [4] D. Norman and C. Argent, "Pipeline coatings, external corrosion and direct assessment." *NACE Corrosion 2007*, Paper No 07154.
- [5] R. Forbes, D. L. Oostendorp and R. N. Earle, "Gas distribution transmission pipelines external corrosion direct assessment – a case study." *NACE Corrosion 2007*, Paper No. 07699.
- [6] NACE, "Pipeline External Corrosion Direct Assessment Methodology". NACE Standard RP0502-2002, NACE International, Houston Texas, 2002, pp 1-57.
- [7] DNV, "Corroded Pipelines", Recommended Practice, DNV-RP-F101, Det Norske Veritas, Hovik, Norway, October 2004, pp 1-42.
- [8] The American Society of Mechanical Engineers, "Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines", ASME B31-G, New York, 1991. pp 1-64.
- [9] The American Society of Mechanical Engineers, "Gas Transmission and Distribution Piping Systems", ASME B31.8, New York, 1991, Appendices L, p 154.
- [10] J. Hansen and B. Ronald, "Using Eddy Current Testing to Solve Industrial Problems," *Materials Evaluation*, vol 64, Num 6, pp 543-546, Jun 2006.
- [11] R. J. Quintero, "Curso Corrientes Inducidas (Nivel I)", Instituto Colombiano del Petróleo, Bucaramanga, Septiembre 1996.
- [12] A. E. Crouch and T. H. Goyen, "Defect Assessment Using Conformable Array Data," Southwest Research Institute, San Antonio, TX, Dec 2003.
- [13] X. Chen and T. Ding, "Flexible eddy current sensor array for proximity sensing." *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol 135 No. 1 March 2007, pp 126-130.
- [14] J. B. Nestleroth and R. J. Davis, "Application of eddy currents induced by permanent magnets for pipeline inspection." *NDT & E International*, Vol 40 No 1, January 2007, pp 77-84.
- [15] M. Zergoug, N. Boucherrou, A. Hammouda and G. Kamel, "Characterization of Multilayer Corrosion by Pulsed Eddy Current." *Université Houari Boumediene*, 2005.
- [16] Servicios Integrales en Ensayos No Destructivos, Disponible: <http://www.sieend.com.mx/pnd.htm> [Citado septiembre 3 de 2008]
- [17] The Japanese Society For Non-Destructive Inspection, "Non-Destructive Testing", 2006, pp 30-32
- [18] F. G. Edwin, "Diseño de un Prototipo para la Medición de Espesores Usando Ultrasonido", Tesis de Maestría, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2005.

- [19] M. Figueredo, J. Bosco, “Dimensionamiento de altura de discontinuidades con ultra-som phased array,” Conferencia Internacional sobre Evaluación de Integridad y Extensión de Vida de Equipos Industriales, Sao Paulo, 2008.
- [20] F. B. Lee, B. S. Tavares, J. Alexandre, R. O. Carneval, J. Marcos, A. Rebello y A. V. Chaves, “Sistema automático de inspección de grandes superficies metálicas por ultrasonido multiplexado,” Conferencia Internacional sob Institute, Tenth of Ramadam city, Egypt, 2003.
- [21] R. S. Sharghi, K. Samani, P. Ramos and D. Keck, “The application of guide waves for the detection of corrosion under insulation.” *Materials Evaluation*, Vol 67 No 9, September, 2009, pp 1043-1047
- [22] J. L. Rose, J. Mu, J. Hua, R. Royer and S. Kenefick, “Guided wave testing of buried pipe.” *Materials Evaluation*, Vol 67 No. 12, December, 2009, pp 1387-1391.
- [23] M. M. Edwardo, “Métodos de Inspección para la corrosión por Debajo del Aislamiento,” *Oceaneering International*, México D.F.
- [24] M. Fernando, “Servicio de Inspección y Reparaciones ElectroMecánicas (SIREM),” Disponible en Línea: www.sirem.es/Presentaciones/PPS/CUI.pps. [Citado 23 agosto de 2008]
- [25] A. C. Moros and E. Y. Figueroa, “Aplicación de la técnica de ultrasonido para la estimación de la pérdida de espesor en la superficie externa de una pieza tubular” Trabajo de grado, Escuela de Metalúrgica, Universidad Industrial de Santander, 2009.
- [26] Southwest Research Institute, “Conformable Array for Mapping Corrosion Profiles”, 2002, Disponible en línea: <http://www.netl.doe.gov/kmd/cds/disk29/4-1.pdf> [Citado noviembre 18 de 2008]
- [27] American Society for Metals, “Nondestructive Evaluation and Quality Control. Guide to Nondestructive Evaluation Techniques”, *Metal Handbook*, Vol. 17 . 5 ed. December 1999.
- [28] G. A. Duarte y J. A. Pérez, “Elaboración de una página web como apoyo a la educación virtual en el área de radiografía industrial.” Trabajo de grado, Escuela de Metalúrgica, Universidad Industrial de Santander, 2004.
- [29] R. A. Santamaría, “Diseño, desarrollo e implementación de una herramienta informática que simula el proceso radiográfico de uniones soldadas.” Trabajo de grado, Escuela de Metalúrgica, Universidad Industrial de Santander, 2007
- [30] S. S. Lee, B. G. Jang, “Thickness evaluation of pipes using density profile on radiographs”, 10th Asia-Pacific Conference on Non-Destructive Testing . Brisbane, Australia. Septiembre 2001.
- [31] Llogsa, “Medición de espesores de pared y mapeo de corrosión utilizando sistemas de radiografía computarizada en aplicaciones de campo”. Mexico. Disponible: www.llogsa.com. [Citado 15 febrero de 2009]
- [32] K. Edalati, N. Rastkhan, et al, “The use of radiography for thickness measurement and corrosion monitoring in pipes.” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol 83 No. 10, October 2006, pp 736-741.
- [33] Z. Uwe, E. Uwe and I. Silvia, “ Radiographic Evaluation of Corrosion and Deposits in Pipelines: Results of an IAEA Co-ordinated Research Programme”, ECNDT 2006.
- [34] Z. John, E. Isaac and I. Silvia, “Radiographic Evaluation of Corrosion and Deposits: An IAEA Co-ordinated Research Project”, Rio de Janeiro, junio 2003, Brasil.
- [35] L. C. Olarte and D. A. Vanegas, “Digitalización de imágenes radiográficas para la identificación y caracterización de discontinuidades superficiales presentes en tuberías de acero.” Trabajo de grado, Escuela de Metalúrgica, Universidad Industrial de Santander, 2009.
- [36] R. Pincu and O. Kleinberger, “Digital Imaging. The transition from conventional radiography to digital radiography.” *Materials Evaluation*, Vol 67 No. 5, May 2009, pp 499-506.
- [37] L. Pick and O. Kleinberger, “Going Digital. Technical highlights of digital radiography for NDT.” *Materials Evaluation*, Vol 67 No. 10, October 2009, pp 1111- 1116.

- [38] G. Wang, T. W. Liao, "Automatic identification of different types of welding defects in radiographic images," Department of industrial and manufacturing systems engineering, Louisiana State University, USA, 2002.
- [39] L. Fournier, L. Châtellier, B. Charbonnier and B. Chassignole, "3D reconstruction from narrow-angle radiographs," Electricite de France.
- [40] H. I. Shafeek, E. S. Gadelmawla, A. A. Abdel-Shafy and I. M. Elewa, "Assessment of welding defects for gas pipeline radiographs using computer vision," Mechanical Engineering Department, Higher Technological Institute, Tenth of Ramadam city, Egypt, 2003.
- [41] The American Society of Mechanical Engineers, "Visual Examination" ASME Sección V, Artículo 9, New York, 1998, pp 181-182
- [42] T. Armit, "The Requirement for Training of Visual Test Personnel", Disponible en línea: www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn006/idn006.htm [Citado 10 febrero de 2009]
- [43] D. Mery, "Inspección Visual Automática," Disponible: www.diinf.usach.cl/~dmery/papers/mecatronic02a.pdf [Citado 23 marzo de 2009]
- [44] Z. M. Pérez, and L. Romero, "Sistema Óptico de Reconstrucción Tridimensional para la Detección de Ampollas en Recubrimientos," Trabajo de Grado, Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, 2004.
- [45] D. Tulsiani, "A Fringe Projection System for Measurement of Condensing Fluid Films in Reduced Gravity," Thesis, Worcester Polytechnic Institute, November 22, 2005.
- [46] Z. M. Pérez, "Aproximación Espacio-Temporal para la Medida Absoluta de la Forma 3D de un Objeto por Proyección de Franjas," Tesis, Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, 2006.
- [47] D. A. Gómez, "Dispositivo Óptico para la Reconstrucción Tridimensional de la Piel Humana por el Método de Proyección de Franjas," Trabajo de grado, Departamento de física, Universidad del Cauca, 2009.
- [48] D. M. Quintero, R. Villamizar and E. Mendoza, "Reconstrucción de defectos tridimensionales mediante proyección de franjas, en platinas metálicas con deformaciones mecánicas superficiales." Trabajo de grado, Escuela de Electrónica, Universidad Industrial de Santander, 2010.
- [49] F. Pernkopf, P. O'Leary, "Image acquisition techniques for automatic visual inspection of metallic surfaces", Institute of Communications and Wave Propagation, Austria, 2003.
- [50] A. Cosham, P. Hopkins and K. A. Macdonald, "Best practice for the assessment of defects in pipelines – Corrosion." Engineering Failure Analysis, Vol 14 No. 7, October 2007, pp 1245-1265.