

## ANÁLISIS DE TÉCNICAS DE INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA EN TUBERÍA FLEXIBLE CON REFUERZO NO METÁLICO PARA EL TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS

*Javier Arciniegas Villamizar*<sup>1\*</sup>, *Luz Amparo Quintero*<sup>2</sup>, *Jaime Meneses Fonseca*<sup>3</sup>

1: Ingeniero Metalúrgico, Estudiante de Maestría en Ingeniería de Materiales, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

2: MSc. Profesora Universidad Industrial de Santander, Directora Grupo de Investigación en Desarrollo y Tecnología de Nuevos Materiales, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

3: PhD. Profesor Universidad Industrial de Santander, Director de grupo de óptica y tratamiento de señales, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

\* Contacto: javier6@gmail.com

### RESUMEN

La industria petrolera en su continuo avance hacia nuevas tecnologías para el transporte de fluidos de hidrocarburos, ha estado implementado la instalación de tuberías flexibles con refuerzo no metálico, gracias a la eliminación de los mecanismos corrosivos que afectan las tuberías metálicas. A pesar del buen rendimiento presentado por las tuberías en servicio, se han presentado fallas tempranas las cuales no se ha determinado su posible causa. Por lo anterior, en el presente artículo se realizara un estudio de las técnicas no destructivas utilizadas en materiales no metálicos y en tubería compuesta, como son ultrasonido, radiografía, haciendo énfasis en sistemas reconstrucción tridimensional por vía óptica. Con la información obtenida se puede definir una adecuada técnica no destructiva para la inspección de tubería flexible con refuerzo no metálico, que ayude a determinar la integridad mecánica de la tubería en estudio.

**Palabras Clave:** *Tubería flexible, Pruebas no destructivas, Ultrasonido, Sistemas ópticos*

### ABSTRACT

The oil industry in its continued progress toward new technologies for transporting hydrocarbon fluids has been implementing the installation of flexible pipes with non-metallic reinforcement, towards the elimination of corrosive mechanisms that affect metal pipes. Despite the good performance presented by the flexible pipelines in service, no current explanation has been found for some early failures that have occurred. Therefore, this paper examines non-destructive techniques such as ultrasonic and radiography, emphasizing on three-dimensional reconstruction systems by optical examination used in non-metallic materials and composite pipes. Using this information, it is possible to define a proper non-destructive technique for inspection of flexible

tubing with non-metallic reinforcement, which may help determining the mechanical integrity of the pipelines.

**Keywords:** *Flexible Pipe, Non-destructive testing, Ultrasonic, Optical systems*

## **1. INTRODUCCIÓN**

Las nuevas condiciones para el transporte de hidrocarburos, hacen que en la tubería convencional metálica se aceleren los mecanismos de falla y aumenten los daños que generan pérdidas económicas, afectaciones ambientales y costosas inversiones en recuperación de zonas afectadas [1]. Una nueva tecnología en tuberías de materiales no metálicos se ha venido convirtiendo en una alternativa para la industria, pues brinda características tales como una instalación fácil, ágil y económica, buena resistencia mecánica, resistencia a la corrosión interna/externa y menores pérdidas de presión [2].

A pesar de los buenos resultados presentados, se han encontrado rupturas tempranas de la tubería en servicio ocasionando fugas no controladas de producto transportado. Las distintas fallas pueden ser ocasionadas por errores de diseño, fallas en el material, la producción, instalación, almacenaje, transporte, condiciones de servicio y factores del ambiente incluyendo cargas mecánicas, efectos térmicos, agentes químicos y factores de vida útil [3]. Debido a lo nuevo de esta tecnología, el avance tecnológico para identificar fallas tempranas está en proceso de desarrollo y en manos de las empresas fabricantes. Comparado con las tuberías en acero, las técnicas no destructivas para detección de fallas están poco consolidadas en la literatura.

El presente artículo está enfocado, principalmente, en la extracción de información topográfica de la superficie externa de la tubería flexible, la técnica de reconstrucción 3D utilizada en la investigación se basa en la proyección de luz estructurada que se caracterizan por presentar gran variedad de diseños y principios, cada una de ellas también posee sus ventajas y desventajas, dependiendo del problema a solucionar. La exigencia metrológica puede estar orientada a requerir alta precisión, alta resolución, tiempo de cálculo apropiado y gran campo de observación. La información obtenida permitirá cuantificar las grietas y deformaciones presentes en la superficie externa de las tuberías flexibles multicapas. Por lo tanto el objetivo central de la investigación se centra en el desarrollo del dispositivo de medida 3D adaptado a la cuantificación de grietas y deformaciones en la capa externa de la tubería.

## **2 TUBERÍAS FLEXIBLES**

El comportamiento de las tuberías de plástico está fuertemente influenciado por los materiales plásticos y componentes poliméricos utilizados en la producción de los tubos [4], Los sistemas de tuberías flexibles han demostrado ser muy fiable para transporte de hidrocarburos. Las tuberías flexibles son ligeras, fáciles de conectar, resistente a la corrosión, flexible y fácil de manejar. Los

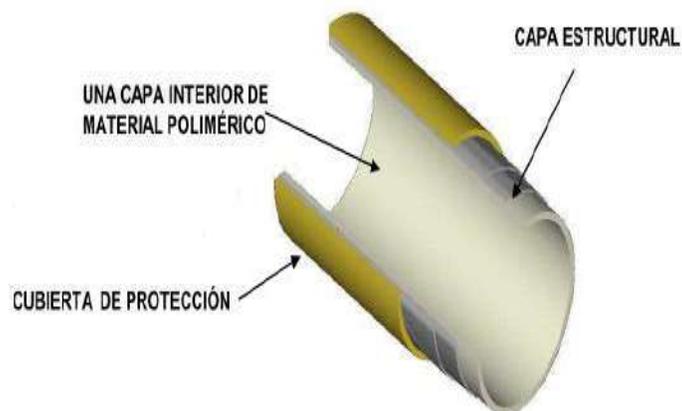
materiales plásticos, sin embargo, tienen sus propias características sobresalientes, que debe ser tomado en consideración en todas las cuestiones relacionadas con la seguridad, vida útil, suceso de falla y las estrategias de adaptación [5].

## 2.1 Tubería no metálica compuesta

La tubería flexible no metálica se encuentra conformada por tres capas, como se puede ver en la Figura 1, con diferentes propiedades una capa interior de material polimérico para contener el fluido transportado, una capa estructural o intermedia que envuelve la capa interior de contención que proporciona resistencia mecánica al conjunto para soportar las cargas aplicadas durante la instalación y operación, y por último una cubierta o capa externa de protección [6].

## 2.2 Fallas en tubería flexible con refuerzo no metálico.

El entorno activo puede incluir cargas mecánicas, efectos térmicos, radiación, influencias químicas y factores biológicos. Estas condiciones pueden causar individual o colectivamente, un modo de fallo en la tubería. La interacción de estos factores no es un evento lineal, pero puede ocurrir en una forma no lineal y puede causar aumentos no lineales y nuevas consecuencias cualitativas [5].



**Figura 1.** Estructura de una tubería flexible con refuerzo no metálico.

### 2.2.1 Tipos de falla

Esta es visión general de los diferentes modos de falla y sus mecanismos relacionados. En una clasificación general, los tipos de falla pueden ser divididos en las siguientes categorías: Pandeo, corrosión, abrasión, deterioro, obstrucción, agrietamiento, espacios vacíos, cambios de dirección, grietas, deformación excesiva, cambio de color, fuga de explosión.

### *2.2.1.1 Grietas*

Se pueden presentar en la parte externa, local o global, frágil o dúctil, de forma regular o irregular.

### *2.2.1.2 Poros y Ampollas*

Se presentan en la superficie afectando las propiedades mecánicas esta se presentan en forma poros y microporos, astillas, abolladuras, depresiones y agujeros.

### *2.2.1.3 Deformación excesiva*

Se presentan en el contorno de la tubería afectando su forma original esta pueden presentarse en forma de alabeo, circunferencial, ovulación, cambio de longitud, asentamiento, elevación, cambio de dimensión y flexión [5].

## **3 PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS EN MATERIALES COMPUESTOS**

La literatura sobre PND en compuestos de polímeros es voluminosa pero poco específica para tuberías flexibles, estos métodos evalúan el material mediante la detección de alguna señal de prueba, cuando la señal se utiliza específicamente para descifrar las propiedades del material este proceso algunas veces es denominado como PND, sin embargo, se pueden identificar las características dentro del material compuesto, tales como defectos, que también pueden ser identificados. Los materiales compuestos tienen una resolución pobre debido a la adición de una partícula a la matriz homogénea esto contribuye a la generación de ruido en las técnicas de inspección [7].

### **3.1 Inspección por ultrasonido.**

Las pruebas por ultrasonido es el método de inspección más usado para materiales compuestos y homogéneos utilizando un rango de frecuencia entre 20Khz a 20Mhz, para materiales compuestos las el rango de pruebas se reduce significativamente debido al aumento de la atenuación ya que se trabaja el límite de frecuencia de operación en 5Mhz o menos y esto reduce la capacidad de detección de defectos pequeños [8].

#### *3.1.1 Pulso-eco*

Esta técnica envía un pulso de energía ultrasónica en pocos microsegundos, transmitiéndose en la muestra en dirección normal a la superficie. Estas señales detectan la posición y tamaño del

defecto a partir del tiempo de viaje del pulso total y la amplitud detectada respectivamente. Esta técnica permite detectar defectos de cierto tamaño y en dirección del haz ultrasónico, aunque hay una región cercana al transductor donde los defectos no pueden ser detectados esto puede solucionarse utilizando un pulso más corto, doble transductor en ángulo o por inmersión [9].

### *3.1.2 Retrodispersión*

Esta técnica es una variación del pulso-eco en la que el transductor se inclina a un ángulo agudo sobre la superficie del material para recibir los ecos, se debe girar el transductor alrededor de un eje normal a la superficie siendo este ángulo constante, se utiliza para comprobar una secuencia de apilamiento, también puede detectar porosidad ya que la señal es superior al haber rotación alrededor del ángulo, aunque la rugosidad de la superficie produce efectos similares. El ángulo es crítico ya que debe ser mantenido con precisión por lo tanto la técnica exige una correcta configuración para mantener la alineación con la superficie [10].

### *3.1.3 Espectroscopia ultrasónica*

Es una forma de prueba de ultrasonido en la que el pulso que llega es detectado por el transductor y analizado armónicamente con la información del material y sus características, se deducen estos cambios por las variaciones en el espectro de frecuencias. Esta técnica se puede utilizar para determinar delaminaciones a diferentes profundidades. Puede ser mucho mejor que la técnica de pulso-eco para determinar espesores delgados ya que no presenta dificultad en la reflexión del frente de onda al regreso de la pared. La señal del espectro se verá afectada por la atenuación con el material por lo tanto la calibración del equipo se debe realizar con patrones de material bien conocido [10] [11].

## **3.2 Inspección radiográfica**

La radiografía Industrial es el despliegue de haces de iones para el ensayo no destructivo de estructuras, el principio básico es que las partes de la muestra tienen diferentes propiedades de absorción de radiación esto origina una imagen formada a través del haz transmitido.

### *3.2.1 Rayos X*

Esta técnica bombardea la muestra con un haz de rayos X generando una imagen de sombras de 2 dimensiones en diferentes tonalidades de grises. Los defectos que no tienen profundidad apreciable en dirección del haz no pueden ser detectados por el haz de radiación, las grietas no se detectan a menos que sean paralelas al haz de radiación, variaciones en las fibras son difíciles de detectar porque la matriz y el refuerzo tienen alto contenido de carbono y la absorción de radiación son similares [12].

### *3.2.2 Tomografía computada*

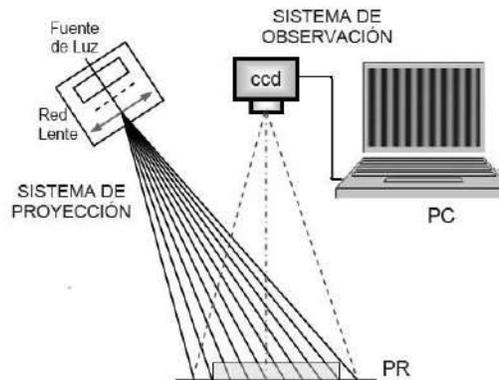
Esta técnica computarizada permite imágenes 3D de los componentes que conforman una muestra, una serie entre 360 a 720 radiografías son tomadas mediante la rotación alrededor de la muestra lo que resulta una nube de datos computarizados que producen una imagen 3D [12].

### 3.3 Reconstrucción digital óptica

La reconstrucción tridimensional consisten en la digitalización de la topografía de objetos a partir de un sistema coordenado y estableciendo las coordenadas de los puntos de la superficie en dicho sistema coordenado. Permiten la reconstrucción tridimensional de superficies y son una alternativa muy importante en la evaluación de integridad de las tuberías, análisis de superficies erosionadas, deformaciones y fallas generadas en la superficie externa de tuberías [13].

#### 3.3.1 Reconstrucción tridimensional mediante proyección de franjas

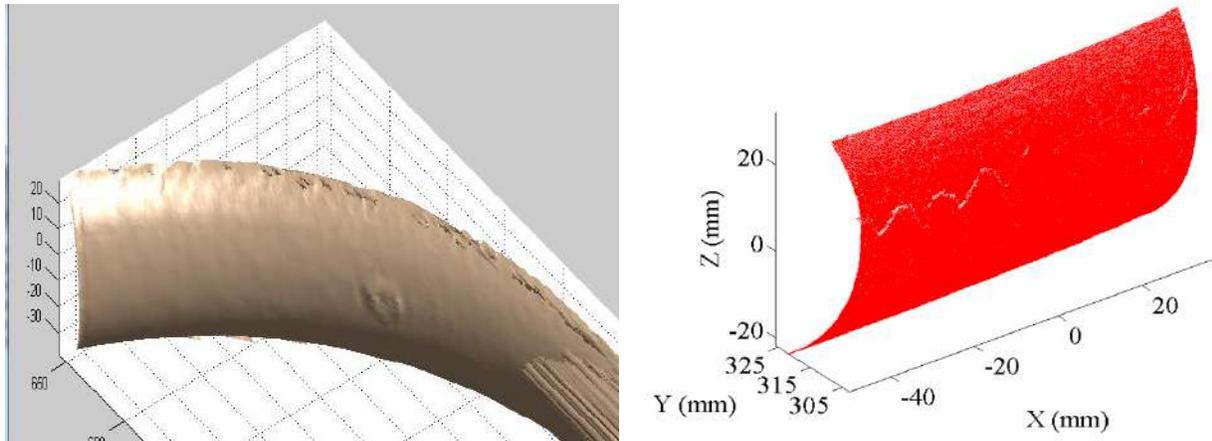
La técnica de proyección de franjas consiste en proyectar un patrón de franjas periódicas sobre la superficie del objeto y a partir de la imagen del objeto con las franjas proyectadas, se interpretan las deformaciones como variaciones de la topografía del objeto. Es decir, la deformación de las franjas codifica las variaciones de altura que posee el objeto [13], [14]. La Figura 2 muestra la descripción del sistema óptico utilizado en el método de proyección de franjas.



**Figura 2.** Sistema óptico de proyección de franjas

Este sistema consta de una cámara CCD (Charge-Coupled Device) que captura la imagen o imágenes de las franjas proyectadas sobre el objeto. La cámara CCD está formada por una matriz de  $m \times n$  microsensores sensibles a la radiación luminosa. Cada uno genera un valor de tensión que es discretizado y forma un pixel de la imagen final. Frente a la matriz fotosensible, se ubica un objetivo o lente que forma la imagen del objeto sobre el plano que contiene la matriz. El computador sincroniza la proyección y almacena las imágenes capturadas por la cámara CCD. Luego, por medio de algoritmos implementados en un software específico, se realiza el procesamiento de las imágenes para recuperar la información 3D del objeto.

La inspección de la superficie en la capa externa de las tuberías compuestas con refuerzo no metálico mediante captura digital y dimensionamiento en 3D por medio de la técnica de proyección de franjas, permitirá analizar la integridad estructural de la tubería cuantificando el tamaño de las grietas y deformaciones presentes en la superficie mediante una representación de una imagen en 3D. Como primera parte de la investigación se diseñó y construyó el montaje experimental del sistema de proyección de franjas, en la figura 3 se puede observar la reconstrucción digital 3D de una tubería flexible de 2 pulgadas y una afectación en la superficie.



**Figura3.** Reconstrucción digital tubería flexible 2”.

#### 4 CONCLUSIONES

Los sistemas ópticos permiten la reconstrucción tridimensional de las superficies externas de tuberías, por lo tanto son una alternativa con grandes expectativas para el dimensionamiento rápido y adecuado. A partir del tratamiento digital de imágenes se pueden detectar defectos que son imperceptibles a una inspección visual, por medio de una técnica de ultrasonido no podría ser detectada debido a la generación de ruido propia de los materiales compuestos, teniendo que complementar técnicas para una inspección aceptable y mediante técnicas radiográficas probablemente los defectos sean detectados pero la técnica necesita de equipos robustos lo que la hace poco practica para inspección de segmentos de gran longitud.

La reconstrucción tridimensional permite obtener registros de las zonas evaluadas para ser analizados por varios expertos y permite la inspección de segmentos de gran longitud.

#### 5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

##### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. [Página Web], Arroyave C.E., “Corrosión: primer consumidor de acero en el mundo.”, Colombia, 2013. <<http://www.ecopetrol.com.co/especiales/RevistaInnova7ed/entrevista.htm>>

2. Arciniegas J., “Instalación de tuberías no metálicas en líneas de superficie en los pozos del campo la cira-infantas.”, XI Congreso Nacional de Corrosión, Bucaramanga, 2011.
3. M. Farshad, “Plastic Pipe Systems: Failure investigation and diagnosis”, Elsevier Science Technology, United Kingdom, 2006.
4. Barluenga Gonzalo, “Materiales de construcción Curso 2009-2010”, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de Alcalá, 2009.
5. [Página Web], Nicola L., “SP Guide to Composites Book”, England, 2013. <http://www.gurit.com/files/documents/es-brochure-2013pdf.pdf>.
6. [Página Web], Fiberspar Corporation, “Line pipe engineering guide Fiberspar”, EEUU, 2012. [http://www.fiberspar.com/sites/default/files/FibersparPresentation\\_October2012-US.pdf](http://www.fiberspar.com/sites/default/files/FibersparPresentation_October2012-US.pdf).
7. Busse G., Kröplin B, Wittel F.K., “Damage and its Evolution in Fiber - Composite Materials: Simulation and Non-Destructive Evaluation”, Universität Stuttgart- October, 2006.
8. Chang J, Zheng C “The ultrasonic wave propagation in composite material and its characteristic evaluation”, Elsevier, Vol.75, No.1-4, p.451-456, 2006.
9. Kaiser H, Karbhari V. M.,” Non-destructive testing techniques for frp rehabilitated concrete. I. A critical review”, International Journal of Materials and Product Technology, Vol.21, No.5, p.349-384, 2004.
10. Neal, S. P., Cepel, R., Palmer, J. D., “Preliminary Study of Ultrasonic Detection of Cracks Through Thick Composite Doublers”, Reserch gate, Vol 25, p. 16, 2006.
11. Scarponi C., Valente M., “An application of a new ultrasonic technique to jute composite laminates subjected to low-velocity impact”, International Journal of Materials and Product Technology, Vol. 26, No.1-2, p.6-18, Italia, 2006.
12. Chu, T, Suchin P., “ NDE of RCC using digitome volumetric X-ray image system”, SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics, Saint Louis, MO, United States, 2006.
13. Gómez Tejada D.A., “Dispositivo óptico para la reconstrucción tridimensional de la piel humana por el método de proyección de franjas”, Universidad Del Cauca, Colombia, 2009.
14. E.N. Hogert, M.R. Landau, M.F. Ruiz Gale, R. Aparicio, and N.G. Gaggioli, “Un nuevo método óptico de END para analizar superficies erosionadas.”, Argentina, 2007.