

**EXPLORACIÓN SUPERFICIAL DE GRIETAS Y DEFORMACIONES EN  
TUBERÍA FLEXIBLE CON REFUERZO NO METÁLICO PARA EL  
TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS A PARTIR DE LA METODOLOGÍA DE  
PROYECCIÓN DE FRANJAS**

**ING. JAVIER ARCINIEGAS VILLAMIZAR**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2014**

**EXPLORACIÓN SUPERFICIAL DE GRIETAS Y DEFORMACIONES EN  
TUBERÍA FLEXIBLE CON REFUERZO NO METÁLICO PARA EL  
TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS A PARTIR DE LA METODOLOGÍA DE  
PROYECCIÓN DE FRANJAS**

**ING. JAVIER ARCINIEGAS VILLAMIZAR**

**Trabajo de Grado para optar al título de  
Magíster en Ingeniería de Materiales**

**Director:**

**DR. JAIME ENRIQUE MENESES FONSECA**

**Co-Directores:**

**MSC. LUZ AMPARO QUINTERO**

**DRA. GLORIA ISABEL DUARTE**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2014**

## DEDICATORIA

A Dios, por haberme permitido llegar hasta este punto y terminar esta etapa de mi vida, además de su infinita bondad y amor.

A mi esposa Ximena, por siempre estar a mi lado, brindándome todo su amor, entrega, dedicación y sobre todo mucha comprensión y paciencia, Ella quien ha sido una pieza clave en mi desarrollo personal y profesional, mil gracias porque siempre estas a mi lado sin condiciones.

A mi hijo Martin, que es la razón de ser de mi vida.

A mis padres Martha y Miguel Angel por su amor e incondicional apoyo, por todo lo que me han enseñado para crecer como persona y toda la ayuda que desde su corazón me han dado.

A mi familia, mis hermanos Carolina y Julian, mis sobrinos Camilita y Santi y a toda mi nueva familia por ofrecerme siempre esa mano desinteresada y ser parte fundamental para lograr esta meta.

## **AGRADECIMIENTOS**

Expreso mis más sinceros agradecimientos a:

LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, por brindarme la oportunidad de desarrollarme académicamente.

LOS DOCENTES, de postgrado de la escuela de ingeniería metalúrgica, por sus excelentes enseñanzas y orientaciones.

Dr JAIME MENESES, director del proyecto, por permitirme hacer parte de sus investigaciones y orientarme a través de la investigación.

MSc LUZ AMPARO QUINTERO, Co-directora de la investigación, gracias por su colaboración, apoyo y enseñanzas.

Dr GLORIA DUARTE, Co-directora de la investigación, funcionaria de Ecopetrol S.A.

RICARDO CONTRERAS Y ANDRES GONZALES, compañeros del grupo GOTS que fueron gran apoyo para todo el desarrollo y finalización de la investigación.

Y A LOS BUENOS AMIGOS, siempre en todo momento.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCION .....	17
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO .....	19
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	19
1.2 OBJETIVOS .....	22
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	22
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	22
2. MARCO TEÓRICO.....	24
2.1 TUBERÍAS FLEXIBLES NO METÁLICAS.....	24
2.1.1 TUBERÍAS FLEXIBLES CON REFUERZO NO METÁLICO .....	24
2.1.1.1 MODOS DE FALLA.....	26
2.1.1.2 CAUSA DE FALLAS PRESENTES EN TUBERÍA FLEXIBLE CON REFUERZO NO METÁLICO.....	27
2.1.1.3 LA CAPA EXTERNA Y LAS CAUSAS DE FALLA. ....	29
2.1.1.4 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES POLIMÉRICOS Y DE REFUERZO. ....	30
2.1.2 PRUEBAS FÍSICOMECAÑICAS Y CARACTERIZACIÓN DE TUBERÍA COMPUESTA FLEXIBLE .....	30
2.1.2.1 PROPIEDADES MECÁNICAS .....	31
2.1.2.2 NORMAS TÉCNICAS. ....	31
2.2 RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL POR VÍA ÓPTICA .....	34
2.2.1 RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL MEDIANTE PROYECCIÓN DE FRANJAS .....	37
2.2.1.1 SISTEMA DE ADQUISICIÓN.....	38
2.2.1.2 SISTEMA DE PROCESAMIENTO Y CONTROL. ....	38
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....	44

3.1	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.....	44
3.1.1	SISTEMA ÓPTICO DE PROYECCIÓN DE FRANJAS.....	45
3.1.2	PROCESOS PARA LA RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL.....	46
3.2	CARACTERIZACIÓN DEL DISPOSITIVO DE MEDIDA 3D .....	47
3.3	CARACTERIZACIÓN DE GRIETAS Y DEFORMACIONES.....	47
3.4	INFORME FINAL.....	48
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	49
4.1	SELECCIÓN DE LA TÉCNICA NO DESTRUCTIVA .....	49
4.2	RECONSTRUCCIÓN 3D MEDIANTE LA TÉCNICA DE PROYECCIÓN DE FRANJAS .....	52
4.2.1	MONTAJE DEL SISTEMA DE RECONSTRUCCIÓN 3D .....	52
4.2.2	CALIBRACIÓN DE UN SISTEMA DE RECONSTRUCCIÓN 3D POR PROYECCIÓN DE FRANJAS.....	54
4.2.2.1	CALIBRACIÓN EXPERIMENTAL DE LA CÁMARA CCD.....	55
4.2.3	RECONSTRUCCIÓN 3D DE LA SUPERFICIE DE LA TUBERÍA FLEXIBLE	69
4.3	CARACTERIZACIÓN DE GRIETAS Y DEFORMACIONES.....	74
4.3.1	ENSAYOS EXPERIMENTALES.....	74
4.3.2	PREPARACIÓN DE MUESTRAS DE TUBERÍA FLEXIBLE .....	75
4.3.2.1	PREPARACIÓN DE MUESTRAS CON DAÑO SUPERFICIAL SIMULADO	76
4.3.3	ANÁLISIS DE MUESTRAS POR MICROSCOPIA COFOCAL .....	77
4.3.3.1	CARACTERIZACIÓN DE TUBERÍA AFECTADA POR MICROSCOPIA COFOCAL.....	79
4.4	ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS FISICOMECAÑICAS EN MUESTRAS DE TUBERIA FLEXIBLE CON REFUERZO NO METALICO .....	80
4.4.1	DETERMINACIÓN DE DIMENSIONES .....	80
4.4.2	ENSAYO DE DUREZA.....	82
4.4.3	ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN POR ANILLO MUESCADO ...	83

4.4.3.1 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN PARA SISTEMA I DE TUBERÍA FLEXIBLE.....	85
4.4.3.2 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN PARA SISTEMA II DE TUBERÍA FLEXIBLE.....	89
4.5 RECONSTRUCCIÓN 3D DE TUBERÍA FLEXIBLE A 360° GRADOS DE OBSERVACIÓN.....	92
4.5.1 VALIDACIÓN METROLÓGICA DEL PROCESO DE CALIBRACIÓN DE UNA UNIDAD DE PROYECCIÓN-ADQUISICIÓN. ....	100
BIBLIOGRAFÍA.....	106
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	111
ANEXOS.....	118

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Propiedades principales de las capas en tubería flexible.....	25
Tabla 2. Resumen de posibles causas de falla en tubería flexible no metálica. ....	28
Tabla 3. Propiedades de materiales y refuerzos relacionados en la presente investigación .....	30
Tabla 4. Principales propiedades mecánicas de los materiales compuestos reforzados con fibras .....	32
Tabla 5. Pruebas fisicomecánicas para la evaluación de tubería compuesta flexible .....	33
Tabla 6. Precisión de algunos métodos ópticos.....	36
Tabla 7. Análisis comparativo de pruebas no destructivas para materiales compuestos.....	50
Tabla 8. Características de la cámara EDMUND OPTICS 813M.....	52
Tabla 9. Puntos con coordenadas $(X_c, Y_c, Z_c)$ recuperadas de las 7 imágenes de calibración.....	69
Tabla 10. Características de los sistemas de tubería seleccionados.....	70
Tabla 11. Pruebas fisicomecánicas seleccionadas para la presente investigación ...	74
Tabla 12. Parámetros utilizados en el rayado de la capa externa de la tubería flexible.....	76
Tabla 13. Imágenes de la sección transversal de un anillo muescado .....	78
Tabla 14. Características generales de las rayas inducidas en la superficie .....	79
Tabla 15. Diámetro exterior por sistema de tubería .....	81
Tabla 16. Diámetro interior por sistema de tubería .....	82
Tabla 17. Valores de dureza Shore D.....	82
Tabla 18. Propiedades mecánicas promedio obtenidas para sistema de tubería no afectada .....	84
Tabla 19. Propiedades mecánicas promedio obtenidas para sistema de tubería I, afectado a 2.0 mm de espaciamiento .....	86

Tabla 20. Propiedades mecánicas promedio obtenidas para sistema de tubería I, afectado a 3.0 mm de espaciamiento .....87

Tabla 21. Propiedades mecánicas promedio obtenidas para sistema de tubería II, afectado a 2.0 mm de espaciamiento .....89

Tabla 22. Propiedades mecánicas promedio obtenidas para sistema de tubería II, afectado a 3.0 mm de espaciamiento .....90

Tabla 23. Propiedades mecánicas para los sistemas analizados. ....92

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Resolución e incertidumbre de diversos dispositivos de reconstrucción 3D .....	21
Figura 2. Esquema de una tubería flexible con refuerzo no metálica .....	25
Figura 3. Modos de falla en los sistemas de tuberías flexibles no metálicas .....	27
Figura 4. Etapas del proceso de reconstrucción 3D .....	35
Figura 5. Sistema óptico de proyección de franjas .....	37
Figura 6. Patrón de franjas proyectado sobre: a) un plano y b) una mano humana .....	39
Figura 7. Patrón de franjas con corrimiento de fase $\varphi = \pi/2$ . .....	40
Figura 8. (a) Fase discontinua, (b) Perfil transversal de la fase discontinua .....	42
Figura 9. (a) Fase continua, (b) Perfil transversal de la fase continua .....	42
Figura 10 Metodología Experimental .....	44
Figura 11. Montaje experimental para la técnica de proyección de franjas. Vista superior. ....	46
Figura 12. Unidad Proyección-Adquisición .....	53
Figura 13. Coordenadas del sistema implementado.....	54
Figura 14. Geometría de la cámara según el modelo Pinhole .....	56
Figura 15. Transformación Euclidiana entre el sistema coordenado de un objeto y el de la cámara .....	57
Figura 16. Patrón de calibración de cámara CCD.....	59
Figura 17. Imágenes de calibración de la cámara .....	59
Figura 18. Procesamiento de la Imagen 1 mediante la CCT. (a) Sub-área seleccionada por el usuario, (b) Esquinas calculadas .....	60
Figura 19. Error de re-proyección en píxel.....	63
Figura 20. Posiciones de los planos adquiridos respecto al sistema coordenado de la cámara .....	63

Figura 21. Calibración del sistema proyección-adquisición para reconstrucción 3D. .....	64
Figura 22. Imagen proyectada, Patrón de puntos. ....	66
Figura 23. Imágenes de calibración. Puntos y cuadros .....	67
Figura 24. Proyección de planos vertical y horizontal sobre plano $m \times n$ .....	67
Figura 25. Figuras Geométricas para unión de dos imágenes adquiridas .....	70
Figura 26. Sistema de franjas proyectado sobre un objeto con un desfase de, (a) $0$ , (b) $\pi/2$ , (c) $\pi$ , y (d) $3\pi/2$ .....	71
Figura 27. (a) Fase discontinua de las franjas proyectadas sobre la tubería, (b) Fase continúa de las franjas proyectadas sobre la tubería .....	72
Figura 28. Reconstrucción 3D de la tubería flexible.....	73
Figura 29. Probetas para prueba ASTM D2290-12.....	75
Figura 30. Figuras de Control sobre superficie de tubería flexible .....	94
Figura 31. (a) Translación y (b) Rotación de los planos.....	95
Figura 32. Reconstrucción 3D del objeto de control en único plano coordenado ..	96
Figura 33. Reconstrucción 3D del objeto de control aplicando matriz de rotación y vector de translación.....	96
Figura 34. Adquisición de imágenes por técnica de proyección de franjas.....	97
Figura 35. Reconstrucción 3D de la tubería flexible.....	98
Figura 36. Reconstrucción 3D de la superficie con grieta en la capa externa .....	98
Figura 37. Superficie de tubería flexible, después de eliminar la curvatura .....	99
Figura 38. Reconstrucción de grieta presente en superficie de la tubería flexible .....	100
Figura 39. Unidad de desplazamiento y objeto plano .....	101
Figura 40. Desplazamiento del plano en el eje $Z$ a intervalos $\Delta Z = 100\mu m$ .....	101
Figura 41. Desplazamientos experimentales contra desplazamientos teóricos ...	102

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Secuencia de la estricción de un anillo sin rayas y afectado de sistema de tubería I, antes y después del ensayo de tensión. ....	118
Anexo B. Secuencia de la estricción de un anillo sin rayas y afectado de sistema de tubería II, antes y después del ensayo de tensión. ....	120
Anexo C. Publicaciones en revistas indexadas.....	121
Anexo D. Participación en eventos .....	124

## RESUMEN

**TITULO:** EXPLORACIÓN SUPERFICIAL DE GRIETAS Y DEFORMACIONES EN TUBERÍA FLEXIBLE CON REFUERZO NO METÁLICO PARA EL TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS A PARTIR DE LA METODOLOGÍA DE PROYECCIÓN DE FRANJAS

**AUTOR:** JAVIER RICARDO ARCINIEGAS VILLAMIZAR\*\*

**PALABRAS CLAVES:** TUBERÍA FLEXIBLE, PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS, PROYECCION DE FRANJAS, RECONSTRUCCION 3D,

### DESCRIPCIÓN:

La industria petrolera en su continuo avance hacia nuevas tecnologías para el transporte de fluidos de hidrocarburos, ha implementado para su servicio la instalación de tuberías flexibles con refuerzo no metálico, esta tecnología elimina los mecanismos corrosivos que afectan las tuberías metálicas. En la presente investigación se realizó un estudio de las técnicas no destructivas utilizadas en materiales no metálicos, haciendo énfasis en sistemas de reconstrucción tridimensional por vía óptica. La reconstrucción tridimensional (3D) implementada en esta investigación es la técnica de proyección de franjas que permite reconstruir y explorar la superficie de la tubería flexible mediante la obtención de imágenes tridimensionales. Conociendo esto sobre la técnica donde la información digitaliza es de la capa externa de la tubería, se realizó un estudio de la importancia que tiene la capa externa de la tubería flexible en la estructura total; se implementó un análisis rayas simuladas sobre la superficie donde se comprobó con esta información la variación de algunas de las propiedades mecánicas al ser afectada la tubería; esta rayas están dentro del rango de resolución para la digitalización de imágenes que permite el sistema implementado. La información obtenida de la reconstrucción 3D permitió cuantificar el tamaño de las grietas y deformaciones, mediante el dispositivo de reconstrucción 3D formado por una cámara CCD, un video proyector portable y un computador portátil, esta adquisición de imágenes se logra con alta precisión, alta resolución y a 360 grados de observación.

En este trabajo se presenta el desarrollo de una técnica y un dispositivo que pueda ayudar en la detección de fallas externas de las tuberías flexibles no metálicas mediante la reconstrucción 3D de la superficie de la tubería flexible, técnica implementada en la investigación.

---

<sup>\*</sup> Trabajo de grado

<sup>\*\*</sup> Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Director: Dr. Jaime Enrique Meneses Fonseca. Codirectoras: MSc. Luz Amparo Quintero, Dra. Gloria Duarte.

## ABSTRACT

**TITLE:** SURFACE EXPLORATION OF CRACKS AND STRAINS IN FLEXIBLE PIPE WITH NO-METALLIC REINFORCED FOR TRANSPORTATION OF OIL USING THE PROJECTION METHOD OF FRINGES.\*

**AUTHOR:** JAVIER RICARDO ARCINIEGAS VILLAMIZAR\*\*

**KEYWORDS:** FLEXIBLE PIPE, NO DESTRUCTIVE TESTING, FRINGE PROJECTION, 3D RECONSTRUCTION,

### DESCRIPTION:

The oil industry in its continued progress toward new technologies for transporting hydrocarbon fluids, has implemented for its service the installation of flexible pipes with no metal reinforcement, this technology eliminates the corrosive mechanisms affecting metal pipes. In the present research a study was performed of non-destructive techniques in non-metallic materials, emphasizing in three-dimensional reconstruction systems by optical technology. The three-dimensional (3D) reconstruction implemented in this research is the fringe projection technique that allows rebuilding and exploring the surface of the flexible pipe by obtaining three-dimensional images. Knowing this on the technique where the digitized information is in the outer layer of the pipe, a study of the importance of the outer layer of the flexible pipe in the whole structure, one simulated analysis of stripes on the surface where this information was checked the variation of some mechanical properties when the pipe is affected; the stripes are in the range of resolution for digital imaging that allows the system implemented. The information obtained from the 3D reconstruction allowed quantifying the size of the cracks and deformations using 3D reconstruction device consists of a CCD camera, a portable video projector and a laptop, this imaging is achieved with high accuracy, high resolution and 360 degrees of observation.

In this paper the development of a technique and a device that can assist in the detection of external faults of flexible pipes, not-metallic by 3D reconstruction of the surface of the flexible pipe, technique implemented in the research.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of engineering physicochemical. School of Metallurgical Engineering. Head Teacher: Jaime Enrique Meneses Fonseca. Cohead: MSc. Luz Amparo Quintero, Dra. Gloria Duarte.

## INTRODUCCION

Las nuevas condiciones para el transporte de hidrocarburos, donde los fluidos transportados tiene velocidades de corrosión bastantes altas, 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 convertido en alternativa para la industria, pues brinda características tales como 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, producción, instalación, almacenamiento, transporte, condiciones de servicio y factores del ambiente incluyendo cargas mecánicas, efectos térmicos, agentes químicos y factores de vida útil [3]. En comparación con las tuberías en acero, las técnicas no destructivas para detección de fallas están poco consolidadas en la literatura.

La presente investigación está enfocada, principalmente, en la extracción de información topográfica de la superficie externa de la tubería flexible, a partir del método de proyección de franjas, que consiste en proyectar franjas paralelas de paso constante sobre el objeto a reconstruir y con una cámara registrar en imágenes las deformaciones que sufren las franjas debido a la topografía superficial del objeto. 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.

## **1. GENERALIDADES DEL PROYECTO**

### **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La industria del petróleo en Colombia está en constante cambio para mejorar la seguridad ambiental y el desempeño en los sistemas de transporte de hidrocarburos. La tubería convencional metálica utilizada en la industria petrolera para el transporte de hidrocarburos ha evidenciado un incremento en el número de fallas debidas entre otras causas a las más altas velocidades de corrosión como consecuencia de las tecnologías de recobro secundario utilizadas.

La tecnología de tuberías en materiales no metálicos se ha venido convirtiendo en una alternativa potencial, pues brinda características tales como instalación fácil, ágil y económica, resistencia mecánica, resistencia a la corrosión interna/externa y menores pérdidas de presión [4]. En los últimos 70 años, mundialmente, el plástico ha sido el material más utilizado para la fabricación de tuberías en diferentes usos [5]. Esta tecnología ha sido introducida hace aproximadamente 5 años por la industria petrolera en Colombia, dando una pronta solución a las exigentes normativas ambientales a las cuales la industria se enfrenta actualmente, lográndose así una significativa reducción de costos en mantenimiento.

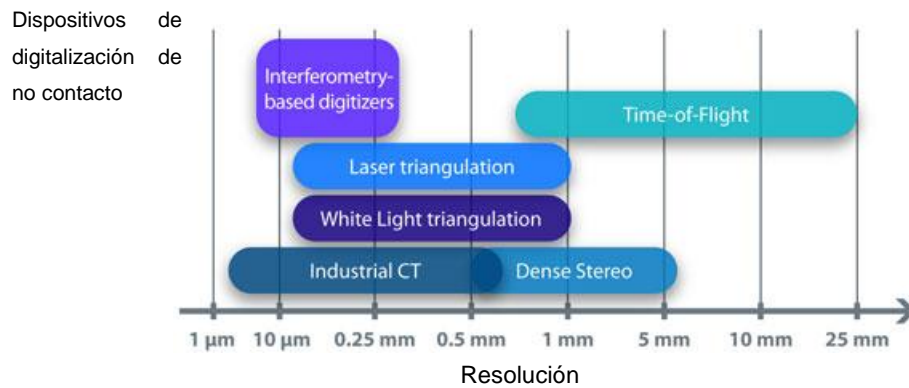
A pesar de los buenos resultados presentados en esta tecnología, se han encontrado rupturas tempranas de la tubería en servicio ocasionando fugas no controladas de producto transportado. Las distintas fallas pueden ser ocasionadas por errores de diseño, fallas en el material, producción, instalación, almacenamiento, transporte, condiciones de servicio y factores del ambiente incluyendo cargas mecánicas, efectos térmicos, agentes químicos y factores de vida útil [3].

El avance en técnicas o metodologías de inspección para identificar fallas tempranas en esta tecnología está en proceso de desarrollo y en liderazgo de las empresas fabricantes de la misma. Comparando con las tuberías en acero, las técnicas no destructivas para detección de fallas no están ampliamente consolidadas y referenciadas al detalle en la literatura. Esta coyuntura permite proyectar investigaciones y/o desarrollos en técnicas y/o metodologías que ayuden a determinar el comportamiento por ejemplo de la capa externa de las tuberías flexibles no metálicas para la identificación de grietas y deformaciones que se generen durante los años en que la tubería esté en servicio y sea sometida a los diferentes tipos de ambientes y esfuerzos.

Debido a la naturaleza flexible del material, las alteraciones en la superficie de la capa externa como fisuras, grietas y deformaciones se manifiestan por la influencia de agentes externos a la tubería como presiones fuera del rango de diseño, vibraciones, impactos, etc. Induciendo a un debilitamiento de la tubería flexible, que con el tiempo llega a producir rupturas y pérdidas no controladas de fluido.

Así, el presente trabajo de investigación está enfocado, principalmente, en el análisis de la información topográfica de la superficie externa de la tubería flexible, con el fin de identificar y medir anomalías presentes como fisuras, grietas y deformaciones. Este análisis se realiza mediante técnicas de reconstrucción tridimensionales (3D) basadas en la proyección de luz estructurada, la cual se caracteriza por presentar gran variedad de diseños y principios como se puede observar en la figura 1.

Figura 1. Resolución e incertidumbre de diversos dispositivos de reconstrucción 3D



Fuente. Innovmetric [6]

Estas técnicas presentan ventajas y desventajas, dependiendo del problema a solucionar. La técnica escogida para solucionar el problema por medio de reconstrucción 3D debe tener una mejora significativa en sus variables, como alta precisión, alta resolución, tiempo de cálculo apropiado y gran campo de observación, entre otras. Sin embargo, existen relaciones de carácter inverso entre algunas de estas variables al momento de diseñar un dispositivo de reconstrucción 3D. El campo de observación tiene una resolución inversa a la resolución final del dispositivo de medida. Detalles de pocas micras se pueden resolver en objetos con dimensiones transversales pequeñas, de igual forma, la profundidad de campo del dispositivo varía de forma inversa con la resolución. Detalles de pocas micras pueden resolverse pero con profundidades de campo muy pequeñas.

De esta manera extraer información 3D de un objeto grande con alta resolución implica realizar adaptaciones especiales a la metodología de reconstrucción 3D. Tradicionalmente un objeto de dimensiones transversales de 50\*50 cm se puede reconstruir tridimensionalmente con una resolución del orden de 200µm.

Otra de las dificultades en la técnica, son las zonas ocultas, es inevitable cuando se quiere mantener una alta resolución del sistema de reconstrucción 3D y al mismo tiempo, tener acceso a información sobre un campo visual extenso y con gran profundidad de trabajo, la cual excede las limitaciones propias de un sistema de reconstrucción 3D [7].

En esta investigación se presenta el desarrollo de una técnica de inspección no destructiva que se basa en la captura digital y el dimensionamiento tridimensional (3D) de discontinuidades de la capa externa de tuberías flexibles no metálicas, por medio de la técnica de proyección de franjas, a partir de la cual es posible cuantificar las grietas y deformaciones presentes en la superficie externa de las tuberías flexibles. Por medio de la exploración superficial con la técnica de proyección de franjas, dimensionando el tamaño y profundidad de las grietas y la pérdida del contorno circular que debe mantener la tubería. Por lo tanto el objetivo central del trabajo de investigación está en el desarrollo de una técnica de inspección no destructiva y del dispositivo de medida 3D adaptado a la cuantificación de grietas y deformaciones en la capa externa de la tubería.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo general**

Dimensionar las grietas y deformaciones presentes en la superficie de una tubería, flexible con refuerzo no metálico a través de la metodología de proyección de franjas desarrollada para materiales compuestos.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Diseñar y construir el montaje experimental para el sistema de proyección de franjas acorde a las condiciones metrológicas, para digitalizar con alta

resolución la superficie externa de una tubería flexible con refuerzo no metálico.

- Caracterizar metrológicamente el dispositivo de medida tridimensional (3D).
- Caracterizar las grietas y deformaciones a partir de las imágenes 3D obtenidas del dispositivo de medida con una resolución de 100  $\mu\text{m}$ .

## 2. MARCO TEÓRICO

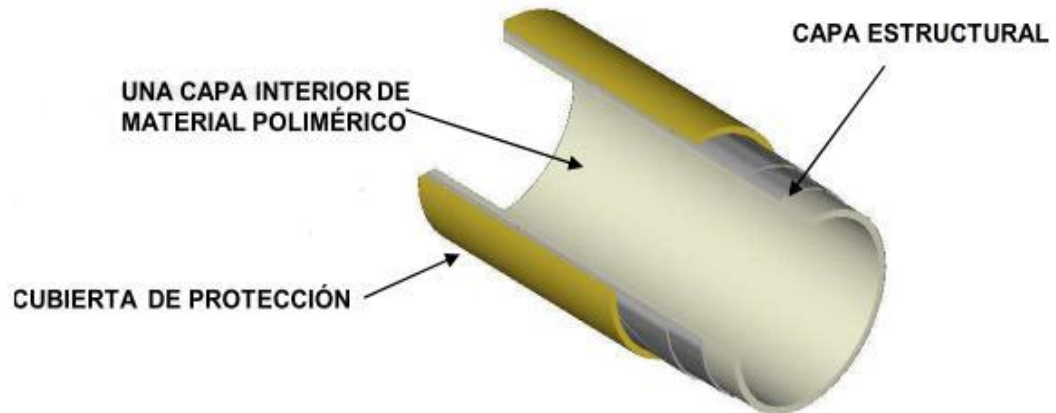
Para el desarrollo de esta investigación fue necesario identificar y definir ciertos conceptos que dan a la investigación un sistema coherente y coordinado que permiten abordar el problema y solución. Este capítulo presenta los conceptos básicos para tener una idea más clara de la técnica no destructiva usada en la investigación y la necesidad de conocer las características propias de la tubería flexible a la cual se le aplica la técnica.

### 2.1 TUBERÍAS FLEXIBLES NO METÁLICAS

El comportamiento de las tuberías flexibles no metálicas está fuertemente influenciado por los materiales y componentes poliméricos utilizados en su producción. Los materiales poliméricos tienen ciertas características sobresalientes que los distinguen de otros materiales tales como los metales y los cerámicos. Una de las características principales de los materiales poliméricos y de los materiales compuestos a base de polímero, es que sus propiedades físicas, mecánicas, térmicas y químicas son fuertemente dependientes del tiempo y de la temperatura [8]. Las tuberías flexibles contrarias a las tuberías metálicas son ligeras, durables, fáciles de instalar, resistentes a la corrosión, y de fácil conexión.

**2.1.1 Tuberías flexibles con refuerzo no metálico.** Actualmente las tuberías utilizadas para la industria del petróleo utilizan sistemas multicapas. Este tipo de tubería tiene un refuerzo no metálico y componentes poliméricos en las demás capas constituyentes. Generalmente están conformadas por tres capas como se muestra en la figura 2, cuyas propiedades influyen en el comportamiento y aplicabilidad final.

Figura 2. Esquema de una tubería flexible con refuerzo no metálica



Fuente. Autor

Cada capa tiene una función particular. La capa interna de material polimérico contiene el fluido transportado, la capa intermedia o estructural, que envuelve la capa interna de contención proporciona la resistencia mecánica requerida para soportar las cargas aplicadas durante la instalación y operación, y una capa externa o cubierta que protege el refuerzo estructural o capa intermedia. En la tabla 1 se muestra las características de cada capa en la tubería flexible.

Tabla 1. Propiedades principales de las capas en tubería flexible

<b>Capa interna</b>	<b>Capa intermedia</b>	<b>Capa externa</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Contiene el fluido transportado.</li> <li>▪ Resistente a la corrosión.</li> <li>▪ Resistente a los hidrocarburos.</li> <li>▪ Baja permeabilidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Envuelve la capa interior de contención que proporciona resistencia mecánica al conjunto.</li> <li>▪ Refuerzo en fibras.</li> <li>▪ Fibras trenzadas, resistencia a la presión.</li> <li>▪ Fibras longitudinales para capacidad de tensión.</li> <li>▪ Fibras de baja elongación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cubierta de protección.</li> <li>▪ Protege las fibras contra la abrasión.</li> <li>▪ Resistencia y protección a los medios.</li> </ul>

Fuente. Dalmolen B. [9]

De los varios tipos de materiales no metálicos, la eficiencia del refuerzo es mayor cuando se utiliza principalmente fibras. En estos materiales, la carga aplicada se

trasmite a las fibras y se distribuye entre ellas a través de la matriz, mejorando las propiedades de la estructura [10].

Este tipo de tubería presenta las siguientes ventajas:

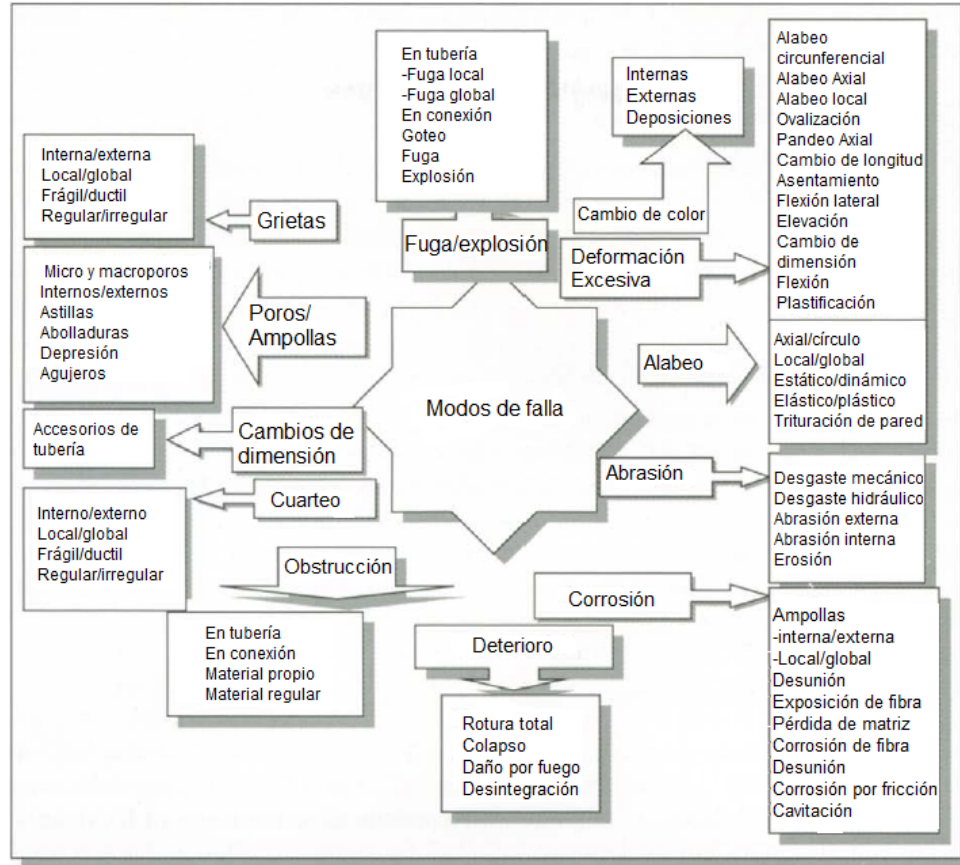
- Fabricada a partir de materiales poliméricos y compuestos, livianos de gran resistencia a fluidos corrosivos.
- Presión máxima de operación desde 275 hasta 2.500 psi.
- Resistente a la corrosión interna y externa.
- Resistente al H<sub>2</sub>S y CO<sub>2</sub>.
- No permite la adhesión de parafinas, por su bajo coeficiente de fricción.
- Mínimo mantenimiento.
- Menores pérdidas de presión en comparación con la tubería de acero.
- Instalación fácil, ágil y económica
- Menor costo en comparación con la tubería de acero
- Sistema de conexión mecánica de fácil instalación [11].

A pesar de estas ventajas, también se presentan desventajas tales como: limitación en la temperatura máxima del fluido (250 °F), que pueden afectar la integridad durante el tiempo de servicio, adicionalmente, a la fecha no se dispone de una técnica de inspección que pueda ayudar a predecir el comportamiento en servicio o si se presenta una reducción del tiempo de vida útil.

2.1.1.1 Modos de falla. El evento de falla en sí puede manifestarse en diversos modos conocidos como tipos de falla. La figura 3, muestra una 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, y cambio de color. La

presente investigación se centra en evaluar cuantitativamente la presencia y dimensionamiento de grietas y deformaciones de contorno.

Figura 3. Modos de falla en los sistemas de tuberías flexibles no metálicas



Fuente. Farshad M. [3]

**2.1.1.2 Causa de fallas presentes en tubería flexible con refuerzo no metálico.** El entorno activo al que son expuestas las tuberías puede incluir cargas mecánicas, efectos térmicos, radiación, influencias químicas y factores biológicos. Estas condiciones pueden causar individual o colectivamente, un modo de falla en la tubería. La interacción de estos factores puede causar aumentos y nuevas consecuencias de falla. Los efectos hidrotérmicos en los materiales compuestos son un ejemplo de interacción con el entorno térmico y húmedo. El agrietamiento por estrés ambiental, es otro ejemplo en el que la interacción de las tensiones mecánicas con factores químicos puede conducir al agrietamiento [12]. Este tipo

de factores que afectan las tuberías flexibles no metálicas y que son causales de posibles deterioros se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Resumen de posibles causas de falla en tubería flexible no metálica.

<p><b>Acciones mecánicas</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presión interna y externa</li> <li>• Presión negativa (vacío interno)</li> <li>• Presión de la Tierra</li> <li>• Cargas de tráfico y de superficie</li> <li>• Sobrecarga</li> <li>• Presión del agua</li> <li>• Efectos de longitud (tensión axial, compresión y flexión)</li> <li>• Cargas puntuales</li> <li>• Fuerzas de impacto</li> <li>• Fuerzas debidas al cambio de dirección y puntos fijos</li> <li>• Efectos dinámicos (vibraciones, fatiga)</li> <li>• Fuerzas hidrodinámicas</li> <li>• Fuerzas de flotabilidad</li> <li>• Tensiones residuales, tensión inicial</li> <li>• Fuerzas durante la producción</li> <li>• Acciones durante el almacenamiento y el transporte</li> <li>• Casos de carga durante la instalación</li> <li>• Deslizamientos de tierra, movimientos de fallas</li> <li>• Terremoto</li> <li>• Licuefacción del suelo con desplazamiento lateral</li> <li>• Derrumbes</li> <li>• Cargas imprevisibles (daño bomba, los impactos, las nuevas acciones ambientales)</li> <li>• Fuerzas resultantes de la interacción con bases, apoyos y otras instalaciones</li> <li>• Solución parcial, del hundimiento de la tierra</li> <li>• Efectos debidos a las reparaciones, cheques, acciones de intervención</li> </ul>
<p><b>Efectos térmicos</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efectos térmicos, gradientes de temperatura</li> <li>• Fuerzas longitudinales provocadas por los cambios de temperatura</li> <li>• Envejecimiento térmico del material</li> <li>• Temperatura debido a la hidratación efectos en los tubos de hormigón incorporados</li> </ul>
<p><b>Efectos químicos</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua</li> <li>• Medio alcalino</li> <li>• Ácidos</li> <li>• Solventes</li> <li>• Aceite</li> <li>• Oxígeno</li> </ul>
<p><b>Factores biológicos</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Microbios y bacterias</li> <li>• Animales</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>Efectos a largo plazo (factores de envejecimiento)</b></p>	

Fuente. Farshad M. [3]

**2.1.1.3 La capa externa y las causas de falla.** La capa externa protege la tubería contra el desgaste generado en ambientes difíciles de instalación con alto grado de vibración, o de elementos abrasivos como rocas o gravilla presentes en el derecho de vía. Sin embargo, es posible encontrar en el suelo condiciones adversas que desafían la durabilidad de la capa externa de estas tuberías. En una instalación particular, es probable que se presente más de una condición adversa. Cuando esto ocurre, el grado de deterioro de la tubería puede ser mayor. [13]

Los daños causados a este tipo de tubería puede en la mayoría de los casos, detectarse durante las pruebas preliminares de presión hidrostática [14]. Sin embargo, es posible que algunos daños requieran más tiempo para desarrollarse y originar una falla durante la operación. Entre los daños que pueden tomar más tiempo para llevar a falla la tubería están la abrasión, causada por elementos afilados tales como rocas o elementos presentes en las zanjas de instalación y durante el transporte o almacenamiento. Esto conlleva a que se generen rayas en la capa exterior de la tubería en forma de marcas someras sin orientación preferencial [15].

Dependiendo de la profundidad y forma de las rayas, puede dar lugar a crecimientos de grietas, disminución de la resistencia y vida útil de la tubería.

Es de interés para la presente investigación hacer énfasis en los daños causados por las rayas, debido a que gran número de fallas de las tuberías compuestas flexibles pueden estar relacionado con la frecuencia de este daño en las tuberías, asociadas con los procesos de almacenamiento, transporte e instalación [3].

#### 2.1.1.4 Propiedades mecánicas de los materiales poliméricos y de refuerzo.

Las propiedades mecánicas son aquellas características que implican el reordenamiento físico de sus componentes moleculares o distorsión de su morfología inicial en respuesta a una fuerza aplicada. [16]

Las propiedades físicas y mecánicas de los materiales utilizados en esta investigación se presentan en la tabla 3, dependen del tipo, forma y orientación del material de refuerzo, de la longitud de las fibras y de la fracción volumétrica (porcentaje). El refuerzo de fibra también afecta otras propiedades de los compuestos, como propiedades de resistencia a la fatiga y al desgaste, las cuales dependen del tipo y porcentaje del refuerzo.

Tabla 3. Propiedades de materiales y refuerzos relacionados en la presente investigación

Material	Módulo de Elasticidad (E) (psi)	Esfuerzo Último a la Tracción (UTS) (psi)	% Elongación
Poliétileno de Alta Densidad (PEAD)	180000	5500	130
Poliéster (PET) (Fibra de Poliestireno)	600000	10500	300
Poliamida (PA) (nylon)	500000	12000	300
Sulfuro de polifenileno (PPS) (Polipropileno Fortron)	480000	9500	2
Polipropileno (PP)	220000	6000	700
Fibra de Aramida (Kevlar)	$18 * 10^6$	650000	2.5

Fuente. Jiménez C. R., Vallen A. V. [18]

Un factor crítico en los materiales poliméricos y de refuerzo es la resistencia a la tracción final de la unión entre la fibra y la matriz de polímero, dado que la carga se transmite a través de la interfaz fibra/matriz [17].

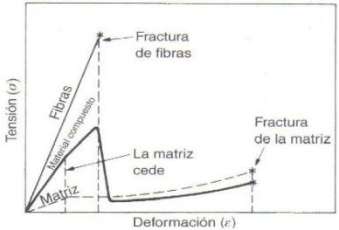
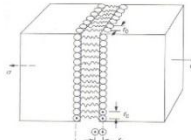
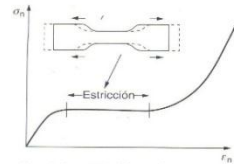
**2.1.2 Pruebas físicomecánicas y caracterización de tubería compuesta flexible.** Para el desarrollo de esta investigación, es necesario conocer qué tipo de pruebas son las más comúnmente utilizadas en la industria.

**2.1.2.1 Propiedades mecánicas.** En la tabla 4 se detallan las propiedades mecánicas más importantes de los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados.

**2.1.2.2 Normas técnicas.** Estas pruebas realizadas a las tuberías de materiales compuestos están basadas en las normas ASTM y sus equivalentes, a través de las cuales se analiza el comportamiento físico y mecánico de las tuberías en general. En la tabla 5 se presenta algunas de las principales normas técnicas utilizadas en la evaluación de las tuberías, teniendo en cuenta criterios técnicos y económicos, así como de disponibilidad para efectuar las pruebas.

**Microscopía confocal.** La microscopía confocal es una tecnología de observación innovadora basada en un algoritmo original Hirox. Este sistema óptico reconstruye modelos 3D mediante el apilado vertical de imágenes, esto reproduce un rango dinámico con una imagen visual de alta resolución y calidad. Esta función proporciona una fácil observación y análisis mediante la extracción y producción de datos de imágenes; al capturar 10 planos de imágenes en sólo 4 segundos paso a paso con un escaneo rápido, suave y preciso con 0,05  $\mu\text{m}$ /pulso y 30 mm de recorrido automatizado para visualizar un modelo en 3D de alta calidad.[19]

Tabla 4. Principales propiedades mecánicas de los materiales compuestos reforzados con fibras

Ensayo	Resumen	Propiedades mecánicas a obtener	Definición	Cuantificación
Tensión	<p>El ensayo de tensión es la forma básica de obtener información sobre el comportamiento mecánico de los materiales. Mediante una máquina de ensayos se deforma una probeta del material a estudiar, aplicando una fuerza uniaxial en el sentido del eje de la muestra y a una velocidad constante. A medida que se va deformando la muestra, se va registrando la fuerza (carga (P)) en función de la elongación (<math>\Delta l</math>) hasta alcanzar la fractura de la probeta. El resultado del ensayo sería la curva de esfuerzo (<math>\sigma</math>) vs deformación ingenieril (<math>\epsilon</math>), de la que se pueden extraer distintos parámetros que definen el comportamiento mecánico del material.</p>  <p><b>Curva esfuerzo – deformación de una matriz polimérica reforzada con fibras.</b></p>	<p><b>Módulo de elasticidad (E)</b></p>	<p>Esta propiedad mecánica permite determinar la naturaleza elástica o el grado de rigidez de un material que se está ensayando.</p> <p>Los materiales con un módulo de elasticidad alto son relativamente rígidos y no se deforman fácilmente. Por otro lado, el módulo de elasticidad no cambia con el incremento de esfuerzo.</p>  <p><b>Recuperación elástica de un material a nivel molecular ante esfuerzos aplicados.</b></p>	<p>En general, los materiales muestran una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación en la región elástica del diagrama esfuerzo-deformación, que está descrita por la ley de Hooke: <math>\sigma = \epsilon E \Leftrightarrow \epsilon = \frac{\sigma}{E}</math> (ecuación 3). Cuando la carga se aplica perpendicularmente a las fibras, el esfuerzo aplicado es igual sobre todas las capas (condición de isoesfuerzo (2)). Con base en esta condición, y reemplazando la ecuación (3) en (1), se obtiene:</p> $\frac{\sigma}{E_c} = V_m \left( \frac{\sigma}{E_m} \right) + V_f \left( \frac{\sigma}{E_f} \right) \Leftrightarrow \frac{1}{E_c} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_f}{E_f}$ <p>Así, el módulo de elasticidad de un material compuesto (<math>E_c</math>) reforzado con fibras continuas y orientadas es igual a:</p> $E_c = \frac{E_m E_f}{E_f V_m + V_f E_m}$ <p>Donde:  <math>E_f</math> = módulo de elasticidad de la fibra  <math>E_m</math> = módulo de elasticidad de la matriz.</p>
	<p>Si el material vuelve a sus dimensiones originales cuando la fuerza cesa, el material ha experimentado una <i>deformación elástica</i>. Si el material es deformado hasta el extremo de que no puede recuperarse por completo sus dimensiones originales, se dice que ha experimentado una <i>deformación plástica</i>. Por definición, la <i>deformación ingenieril</i>, sea en la zona elástica o en la zona plástica de un material, es el cociente del cambio de longitud de la muestra en la dirección de la fuerza dividido entre la longitud original considerada. Se calcula como:</p> $\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$ <p>Donde:  <math>l_0</math> = longitud inicial de la muestra.  <math>l</math> = nueva longitud de la muestra después de haber sido alargada por una fuerza tensora uniaxial.</p> <p>Las unidades de deformación ingenieril son adimensionales.</p> <p>El <b>esfuerzo ingenieril</b> es igual al cociente entre la fuerza de tensión uniaxial media <math>F</math> y la sección transversal original <math>A_0</math> de la muestra, así que.</p> $\sigma = \frac{P}{A_0}$ <p>Las unidades tradicionales en el sistema internacional son pascates (Pa) y en el sistema inglés son libras por pulgada cuadrada (psi: pounds per square inch; ksi=1000 psi).</p> <p>En general, el análisis de este ensayo debe incluir el comportamiento general, la forma de las curvas resultantes, el aspecto de la fractura y el cálculo de los resultados.</p>		<p>Es el máximo esfuerzo alcanzado en la curva esfuerzo-deformación ingenieril. Esta propiedad disminuye conforme existan defectos macroscópicos en la muestra.</p> <p>Cuando el material alcanza su esfuerzo máximo, se forma en la parte central de la probeta una estricción o reducción de su sección transversal, denominada "cuello de botella", lo cual indica que la deformación aumenta mientras el esfuerzo disminuye hasta llegar a la fractura.</p>  <p><b>Formación de la estricción en la curva esfuerzo – deformación.</b></p>	<p>La resistencia máxima a la tensión de un compuesto con fibras depende de la unión entre las fibras y la matriz. Sin embargo, a veces se utiliza la regla de las mezclas para tener una estimación de la resistencia a la tensión de un compuesto con fibras continuas:</p> $\sigma_{máxc} = V_m \sigma_m + V_f \sigma_f$ <p>Donde:  <math>\sigma_f</math> = resistencia a la tensión de la fibra  <math>\sigma_m</math> = esfuerzo que actúa sobre la matriz, cuando el compuesto está deformado hasta el punto donde se fracture la fibra.</p>
	<p>El <b>esfuerzo ingenieril</b> es igual al cociente entre la fuerza de tensión uniaxial media <math>F</math> y la sección transversal original <math>A_0</math> de la muestra, así que.</p> $\sigma = \frac{P}{A_0}$ <p>Las unidades tradicionales en el sistema internacional son pascates (Pa) y en el sistema inglés son libras por pulgada cuadrada (psi: pounds per square inch; ksi=1000 psi).</p> <p>En general, el análisis de este ensayo debe incluir el comportamiento general, la forma de las curvas resultantes, el aspecto de la fractura y el cálculo de los resultados.</p>		<p><b>Esfuerzo Último a la Tensión (UTS)</b></p>	<p>La cantidad de elongación que una muestra experimenta, muestra claramente su valor de ductilidad. Esta propiedad es importante para el control de calidad de las muestras ensayadas, puesto que es dependiente de la presencia de imperfecciones en las probetas.</p>
Dureza	<p>Se define como dureza a la resistencia de un material de ser penetrado (deformación plástica permanente) o rayado.</p>	<b>Dureza Shore</b>	<p>Mide la dureza elástica, o al rebote de un material. Se deja caer en la superficie de ensayo desde una altura determinada, un pequeño cilindro de acero con punta de diamante y la altura alcanzada al primer rebote determina la dureza Shore.</p>	<p>Según lo que indique la lectura del durómetro.</p>

Fuente. Jiménez C. R., Vallen A. V [18]

Tabla 5. Pruebas fisicomecánicas para la evaluación de tubería compuesta flexible

Ensayo	Designación y nombre de la norma	Resumen	Criterios técnicos / económicos	Disponibilidad para efectuar el ensayo
Determinación de dimensiones	<b>ASTM D3567 – 97 (Reapproved 2011)</b> Standard Practice for Determining Dimensions of "Fiberglass" (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting Resin) Pipe and Fittings. <sup>[32]</sup>	Esta prueba determina las dimensiones físicas de tuberías termoplásticas reforzadas destinadas para el transporte de fluidos. Se incluyen procedimientos y cálculos pertinentes para medir las dimensiones y posterior cuantificación de las mismas.	Bajo costo. Fácil y rápido manejo de los instrumentos de medición (cinta pl, calibrador).	<b>DISPONIBLE</b>
Dureza	<b>ASTM D2240-05 (Reapproved 2010)</b> . Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness. <sup>[36]</sup>	Esta prueba permite determinar la dureza por penetración de materiales termoplásticos. Así mismo, permite la medida de la dureza inicial, así como la dureza después de un periodo de tiempo especificado.	Este ensayo debe realizarse mediante durómetro tipo D. Bajo costo Fácil manipulación del durómetro.	<b>DISPONIBLE</b>
Impacto por gravedad	<b>ASTM D2444-99 (Reapproved 2005)</b> . Standard Test Method for Determination of the Impact Resistance of Thermoplastic Pipe and Fittings by Means of a Tap (Falling Weight). <sup>[33]</sup>	Se utiliza la caída de un peso para realizar esta prueba de impacto, en tubería termoplástica. Las probetas son sometidas por medio de la caída de una masa específica, desde una altura determinada y con una posición designada sobre la circunferencia de la pieza a ser probada. Se estima con la tasa de impacto real producido por un lote de probetas.	Determina la resistencia al impacto de las tuberías termoplásticas y accesorios en condiciones especificadas de impacto por medio de una maza (caída de peso). Muy costoso.	<b>NO DISPONIBLE</b>
Resistencia a la presión sostenida	<b>ASTM D1598-02 (Reapproved 2011)</b> . Standard Test Method for Resistance to Short-Time Hydraulic Pressure of Plastic Pipe, Tubing, and Fittings. <sup>[34]</sup>	Este ensayo determinación el tiempo de falla de tubería termoplástica, exponiendo especímenes de tubo a una presión interna constante, en un ambiente controlado. Los datos obtenidos por este método de ensayo son útiles para determinar cómo los plásticos se comportan como tubería.	Insuficiencia de disponibilidad en número de probetas requeridas para efectuar el ensayo. Alto costo de accesorios y largo tiempo para realización de ensayo.	<b>NO DISPONIBLE</b>
Presión hidrostática de rotura a corto plazo	<b>ASTM D1599-99 (Reapproved 2011)</b> . Standard Test Method for Resistance to Short-Time Hydraulic Pressure of Plastic Pipe, Tubing, and Fittings. (Procedimiento A) <sup>[35]</sup>	Este ensayo determina la resistencia a la presión hidráulica a corto plazo de tuberías flexibles o accesorios de resina termoplástica reforzada. Consiste en aplicar carga a una muestra hasta que ocurra la falla, en un intervalo corto de tiempo, por medio de un aumento continuo de presión hidráulica interna, mientras la muestra se encuentra inmersa en un ambiente con temperatura controlada.	Es indispensable implementar los accesorios propios del sistema. Establece la falla por presión hidráulica en un periodo corto de tiempo. Muy costoso.	<b>NO DISPONIBLE</b>
Resistencia a la compresión	<b>ASTM D695-10</b> . Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. <sup>[32]</sup>	Este ensayo cubre la determinación de las propiedades mecánicas de tuberías plásticas reforzada y no reforzada, incluyendo materiales compuestos de alto módulo, cuando se cargan bajo tasas de compresión relativamente bajas.	Costoso	<b>NO DISPONIBLE</b>
Resistencia a la flexión	<b>ASTM D790-10</b> . Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. <sup>[33]</sup>	Este ensayo determina las propiedades de flexión de plásticos reforzados y no reforzados, incluyendo materiales compuestos de alto módulo y materiales con aislamiento eléctrico.	No aplica para tuberías de materiales compuestos flexibles.	<b>NO DISPONIBLE</b>
Resistencia a la tracción	<b>ASTM D638-10</b> . Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. <sup>[31]</sup>	Este ensayo cubre la determinación de las propiedades de tracción de plásticos no reforzados y reforzados en forma de muestras de ensayo estandarizadas.	No aplica para tuberías de materiales compuestos flexibles.	<b>NO DISPONIBLE</b>
Resistencia a la tensión por anillo muecado	<b>ASTM D2290-12</b> . Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe. (Procedimiento A) <sup>[37]</sup>	Este ensayo determina la resistencia aparente a la tensión de la mayoría de los productos plásticos tubulares que utilizan un montaje de ensayo por anillo partido. Es aplicable a muchos tipos de probetas tubulares en forma de anillo, ya sean con refuerzo paralelo de fibra, extruidos, o moldeados.	Este ensayo debe realizarse bajo el procedimiento A, utilizado para tuberías termoplásticas reforzadas.	<b>DISPONIBLE</b>

Fuente. Jiménez C. R., Vallen A. V. [18]

Las ventajas generales de la microscopia confocal son: alta sensibilidad en la observación, mayor resolución y tridimensionalidad de las imágenes.

## **2.2 RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL POR VÍA ÓPTICA**

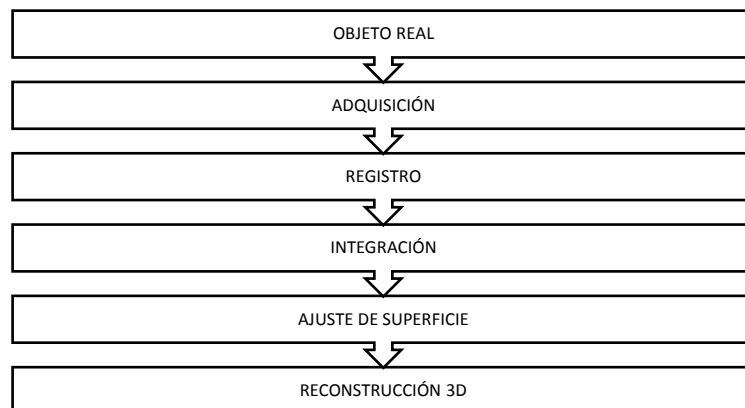
La reconstrucción tridimensional (3D) es un proceso que permite digitalizar las coordenadas de la superficie de un objeto de estudio para su posterior análisis cualitativo o cuantitativo. Un sistema de reconstrucción 3D está formado por un hardware y un software. El hardware adquiere un conjunto de datos, generalmente llamado nube de puntos, usando mecanismos o fenómenos establecidos por medio de la interacción con la superficie o volumen del objeto de interés. El software procesa el conjunto de datos adquiridos y los transfiere a una representación virtual del objeto [20].

El proceso de reconstrucción 3D consta de una serie de etapas, de las que depende la precisión y fidelidad de la representación final del objeto. La primera etapa constituye la obtención de las imágenes desde el mundo real, sobre dichas imágenes se basan las estimaciones pertinentes para la representación tridimensional, se conoce como la etapa de adquisición. Normalmente de la etapa de adquisición resultan un tipo de imágenes especiales denominadas imágenes de rango, que a diferencia de las imágenes convencionales incorporan la posición espacial de un conjunto discreto de puntos de la superficie del objeto. [21]

Teniendo en cuenta que se pueden manejar diferentes sistemas coordenados para cada una de las imágenes adquiridas, es necesario llevar cada una de las imágenes a un único sistema de referencia, esta es la etapa de registro. La siguiente etapa, la de Integración, comprende el proceso de corrección de anomalías en los datos y el manejo de la presencia de redundancia causada por segmentos de superficie solapados en la adquisición; la compleja topología de los

objetos reales impide en algunas ocasiones la completa adquisición de la información, principalmente por problemas de zonas ocultas [21]. Para terminar, se evalúa una o varias funciones matemáticas utilizando el conjunto de datos registrados e integrados lo cual proporciona el modelo digital 3D completo del objeto, esta es la etapa de ajuste de la superficie. Algunos autores incluyen etapas adicionales que dependen de las técnicas empleadas y no del proceso general de reconstrucción 3D. Cada una de las etapas corresponde a un campo activo de investigación, en el que se han desarrollado diversos algoritmos y técnicas [21]. La figura 4 muestra el diagrama de bloques de las diferentes etapas del proceso de Reconstrucción 3D.

Figura 4. Etapas del proceso de reconstrucción 3D



Fuente. Autor

Los sistemas ópticos permiten la reconstrucción tridimensional de superficies y son una alternativa en la evaluación de las tuberías, análisis de superficies erosionadas, deformaciones y fallas generadas en la superficie externa de las tuberías.

La implementación de un sistema óptico para la reconstrucción tridimensional depende fundamentalmente del tipo de iluminación a utilizar, campo de observación, tamaño de la superficie que se desea reconstruir y la precisión que

se desea obtener. Los elementos principales a tener en cuenta en su implementación son: los sistemas de iluminación y adquisición, la unidad de control y tratamiento digital de las imágenes [22].

Los tipos de métodos empleados en los sistemas de reconstrucción tridimensional se pueden clasificar generalmente como métodos activos y pasivos. Dentro de los métodos activos más comunes se encuentra triangulación láser, código de gris, la proyección de franjas, Moire, entre otros. En los métodos pasivos se encuentra la visión estéreo y el sombreado “*Shape from Shading*”, entre otros. En los métodos activos se usa un patrón de radiación, el cual simplifica la obtención de la topografía de la superficie analizada. En los métodos pasivos no se necesita controlar la fuente de iluminación pero requiere de un alto esfuerzo computacional para extraer la información topográfica [23].

La precisión de los sistemas ópticos de reconstrucción tridimensional depende principalmente del método utilizado para la codificación de la información, el cual se selecciona según las condiciones metrológicas exigidas en la reconstrucción y la dimensión transversal del objeto a reconstruir. En la Tabla 6, se presenta la precisión que se puede obtener con algunos métodos de reconstrucción según el rango de medida y la dimensión transversal del objeto.

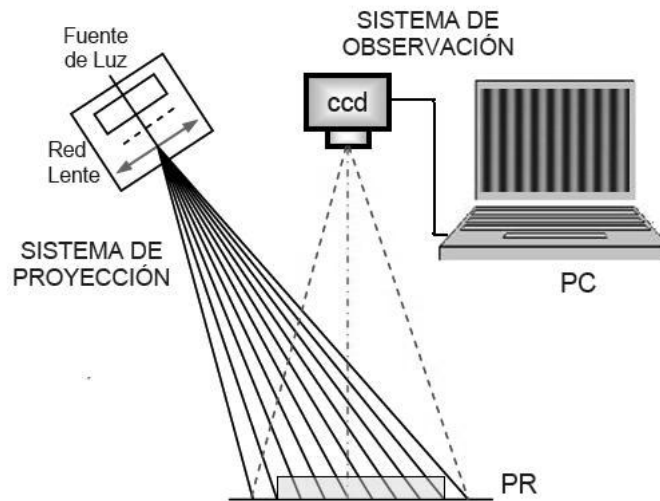
Tabla 6. Precisión de algunos métodos ópticos

MÉTODO	RANGO DE MEDIDA	DIMENSIÓN TRANSVERSAL DE OBJETO	PRECISIÓN $\pm \Delta Z$
Proyección de franjas	1mm : 300mm	1000mm x 1000mm	0.5 mm
	0.1mm : 50mm	100mm x 100mm	0.05mm
	0.05mm : 1mm	50mm x 50mm	0.01mm
Microscopia Cofocal	0.001mm : 0.056mm	1mm x 1mm	50nm
Interferometría con luz blanca	2nm : 400 $\mu$ m	5mm x 5mm	2nm
Láser	0.02mm : 0.15 mm	4mm x 3mm	0.01mm

Fuente. Pérez Z.M., Romero L.A., [24]

**2.2.1 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. La Figura 5 muestra la descripción del sistema óptico utilizado en el método de proyección de franjas.

Figura 5. Sistema óptico de proyección de franjas



Fuente. Pérez Z.M., Romero L.A. [24]

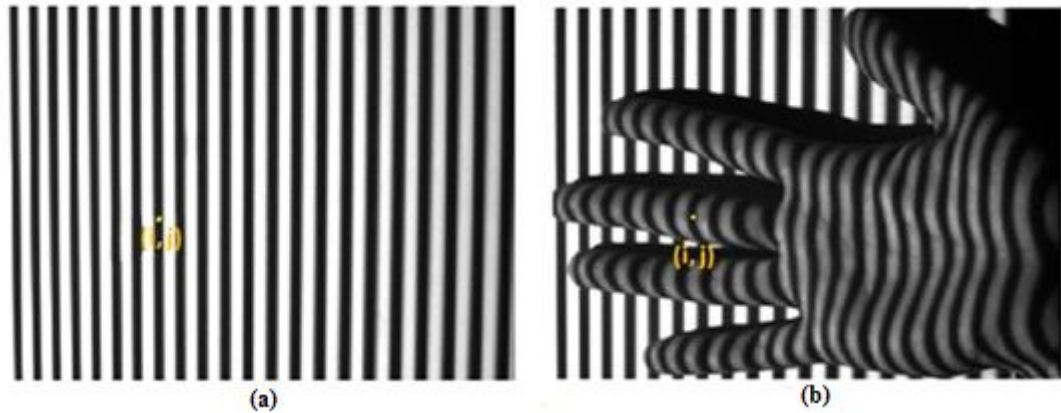
Existen diferentes técnicas para proyectar franjas sobre la superficie de un cuerpo. Algunos métodos utilizan principios ópticos como por ejemplo, proyección por red de difracción, efecto Talbot e interferometría monocromática. El sistema mostrado en la Figura 5, consta simplemente de un dispositivo proyector de pantalla de cristal líquido o LCD (Liquid Crystal Display), el cual está interfazado con la tarjeta gráfica del computador. Por medio de la opción de doble pantalla del computador, siendo el monitor 1 la pantalla del computador, y el monitor 2 el video proyector. El computador genera la imagen de franjas en el monitor 2, y el video proyector las proyecta sobre la superficie del objeto [24].

**2.2.1.1 Sistema de Adquisición.** 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 microsensores  $m \times n$  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 [25].

**2.2.1.2 Sistema de Procesamiento y Control.** 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 [26].

De la Figura 5 se puede observar que el sistema óptico de proyección de franjas consta de un sistema de proyección, el cual es el encargado de proyectar el patrón de franjas sobre la superficie del objeto a reconstruir y un sistema de observación, que permite registrar la imagen del objeto con las franjas proyectadas. El computador es el encargado de generar el patrón de franjas y almacenar las imágenes del objeto para posteriormente ser procesadas. Si las franjas se proyectan sobre una superficie plana, la imagen que se obtiene es de franjas paralelas entre sí y con paso constante. El proceso físico de codificación de la información topográfica se realiza al proyectar las franjas sobre un objeto, las irregularidades de la superficie (relacionadas directamente con la topografía superficial del objeto) quedan evidenciadas con la deformación de las franjas, como se puede observar en la figura 6 [27], [28].

Figura 6. Patrón de franjas proyectado sobre: a) un plano y b) una mano humana



Fuente. Pérez Z.M., Meneses J. [22]

Considerando un sistema formador de imágenes no telecéntrico, la ecuación 1 modela la distribución en intensidad al proyectar las franjas sobre un objeto no plano, las franjas se deformarán debido a la topografía del mismo y del ángulo entre el eje óptico y el eje de proyección.

$$I(x_o, y_o) = I_o(x_o, y_o) + A(x_o, y_o) \cos(2\pi f_o x_o + \phi_o) \quad (1)$$

Donde  $I_o$  y  $A$  corresponden a la intensidad del fondo continuo y el contraste de las franjas, respectivamente. El término  $f_o$  es la frecuencia espacial media de las franjas y  $\phi_o$  es la fase inicial de las franjas, que corresponde a la deformación inicial sufrida por las franjas. Al proyectar las franjas sobre un objeto diferente a un plano, La distorsión de las franjas es codificada en la fase del perfil sinusoidal, según la ecuación 2.

$$I(x_o, y_o) = I'_o(x_o, y_o) + A'(x_o, y_o) \cos(2\pi f_o x_o + \phi_o + \Delta\phi) \quad (2)$$

El término  $\Delta\phi$  representa la fase introducida por la topografía del objeto. La ecuación 2 se puede reducir como se muestra en la ecuación 3, siendo  $\phi$  la fase del sistema de franjas.

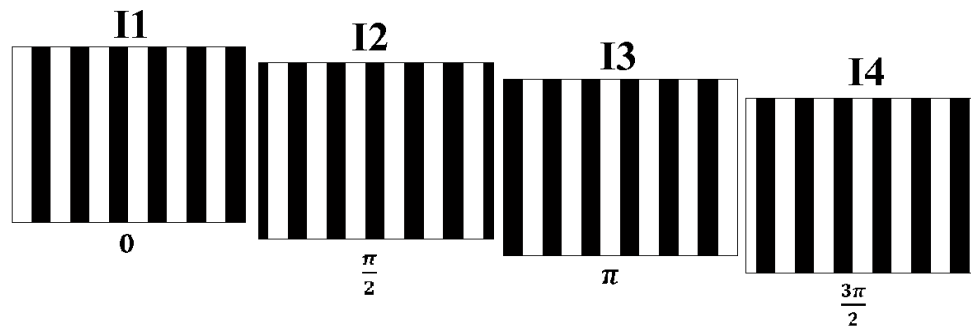
$$I(x_o, y_o) = I'_o(x_o, y_o) + A'(x_o, y_o) \cos(\phi) \quad (3)$$

Para encontrar la fase de un patrón de franjas se han desarrollado diversos métodos; el más referenciado es el método de Corrimiento de Fase (Phase Shifting) [29]. Para este método se determina la fase del objeto a partir de la intensidad luminosa de  $n$  imágenes digitalizadas, con su respectiva fase modificada en valores  $\varphi_i$  conocidos dentro de un intervalo de  $2\pi$  [27], ecuación 4.

$$I_i(x_o, y_o) = I_o(x_o, y_o) + A(x_o, y_o) \cos[\phi + \varphi_i] \quad (4)$$

El procedimiento es comúnmente utilizado con  $n = 4$  imágenes [29], para el cual, la diferencia de fase entre imágenes consecutivas está dada por  $\varphi = \pi/2$ . Se tiene entonces para este caso las imágenes:  $I_1$  con un desplazamiento de fase  $\varphi_1 = 0$ ,  $I_2$  con  $\varphi_2 = \pi/2$ ,  $I_3$  con  $\varphi_3 = \pi$ , e  $I_4$  con  $\varphi_4 = 3\pi/2$ . Un ejemplo de estas imágenes se puede observar en la figura 7.

Figura 7. Patrón de franjas con corrimiento de fase  $\varphi = \pi/2$ .



Fuente. Larkin, K., Hibino, K., Oreb, B., & Farrant, I. [29]

La ecuación 4, con base en las propiedades ortogonales de las funciones sinusoidales, se puede expresar para cada imagen como se muestra en las ecuaciones 5, 6, 7, 8.

$$I_1(x_o, y_o) = I_o(x_o, y_o) + A(x_o, y_o) \cos[\phi] \quad (5)$$

$$I_2(x_o, y_o) = I_o(x_o, y_o) + A(x_o, y_o) \cos[\phi + \pi/2]= \quad (6)$$

$$I_2(x_o, y_o) = I_o(x_o, y_o) - A(x_o, y_o) \sin[\phi]$$

$$I_3(x_o, y_o) = I_o(x_o, y_o) + A(x_o, y_o) \cos[\phi + \pi]= \quad (7)$$

$$I_3(x_o, y_o) = I_o(x_o, y_o) - A(x_o, y_o) \cos[\phi]$$

$$I_4(x_o, y_o) = I_o(x_o, y_o) + A(x_o, y_o) \cos[\phi + 3\pi/2]= \quad (8)$$

$$I_4(x_o, y_o) = I_o(x_o, y_o) + A(x_o, y_o) \sin[\phi]$$

Con estas ecuaciones se puede deducir la ecuación 9, y así calcular la fase.

$$I_4 - I_2 = 2A(x, y) \sin[\phi]$$

$$I_1 - I_3 = 2A(x, y) \cos[\phi]$$

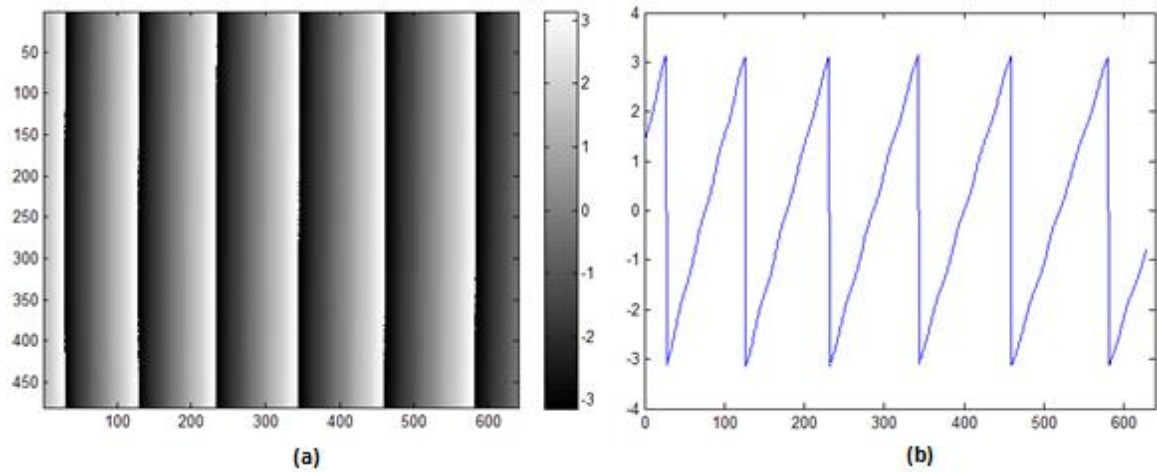
$$\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} = \frac{\sin[\phi]}{\cos[\phi]} = \tan[\phi]$$

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right) \quad (9)$$

Usar la función arco-tangente para calcular la fase genera puntos de discontinuidad entre  $-\pi$  y  $\pi$ , ver figura 8. Por esta razón es necesario convertir la fase hallada con la ecuación 9, que es una fase discontinua, en una fase continua.

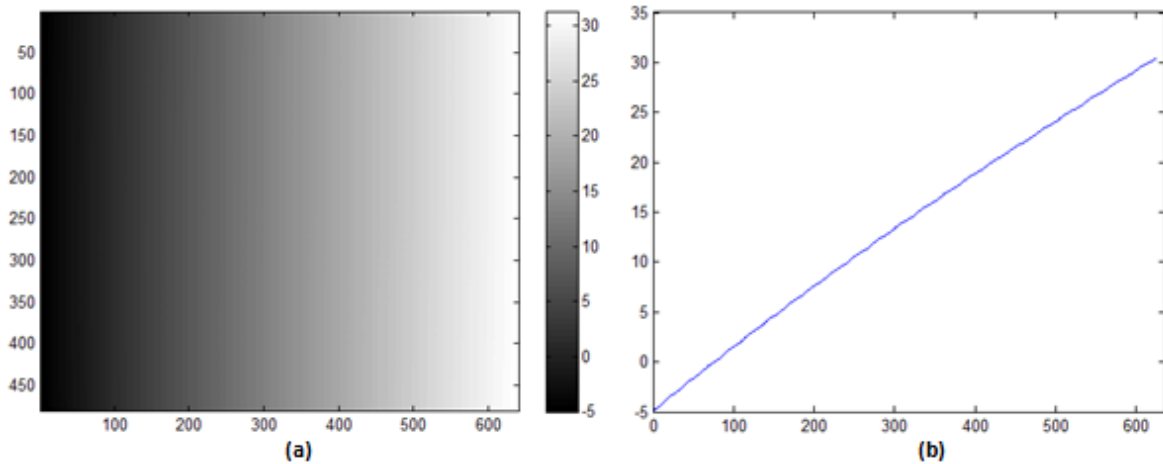
Para hallar la fase continúa es necesario identificar las discontinuidades y adicionar valores de  $\pm 2\pi N$ , siendo  $N$  una función escalón entera dada por el intervalo en las discontinuidades. Este procedimiento se conoce como “*Unwrapping*” y se usa para obtener la fase continua de un patrón de franjas proyectado sobre un plano o sobre un objeto [28]. En la figura 9 se observa la fase continua, calculada a partir de la fase discontinua de la figura 8 y su respectivo perfil transversal.

Figura 8. (a) Fase discontinua, (b) Perfil transversal de la fase discontinua



Fuente. Meneses J. E. [28]

Figura 9. (a) Fase continúa, (b) Perfil transversal de la fase continúa



Fuente. Meneses J. E. [28]

El proceso de reconstrucción 3D, se completa al convertir la distribución de fase  $\Delta\phi$  en valores de coordenadas  $Z$  para cada posición  $(x,y)$  digitalizada por la cámara. La conversión se puede realizar de dos maneras: 1. Usando los parámetros del montaje (ángulo de proyección, paso de proyección y el factor de ampliación geométrico de la lente de la cámara) para determinar la ecuación

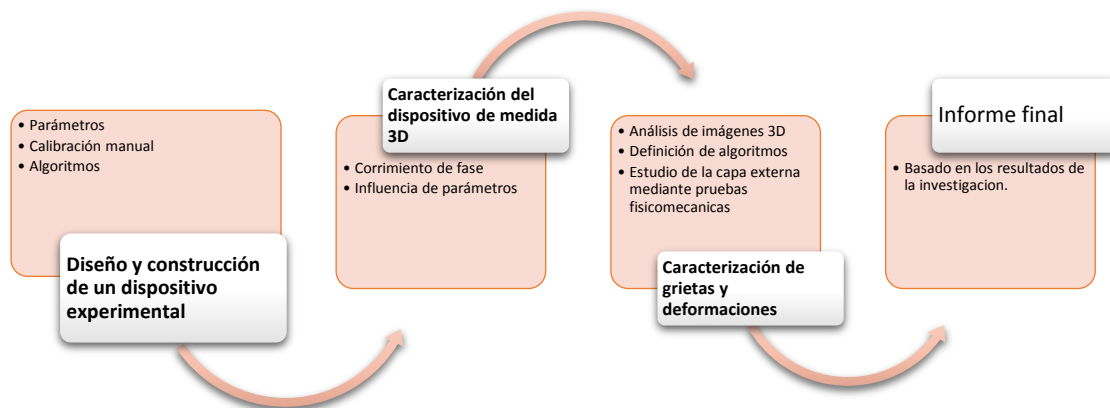
teórica que asocia  $\Delta\phi$  con  $Z$ ; o 2. Usando un procedimiento de calibración que permita hallar una ecuación experimental que asocie  $\Delta\phi$  con  $Z$  [27], [28].

Para este trabajo se ha optado por aplicar una estrategia de calibración manual, que aporte mayor versatilidad y flexibilidad, además de precisión y alta resolución, al sistema de reconstrucción 3D por proyección de franjas.

### 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La metodología propuesta en la presente investigación consta de cuatro fases: Diseño y construcción de un dispositivo experimental, caracterización del dispositivo de medida 3D, caracterización de grietas y deformaciones y finalmente la elaboración del documento donde se reportan los resultados obtenidos en cada una de las fases. En la figura 10. Se presenta el diagrama de la metodología.

Figura 10 Metodología Experimental



Fuente. Autor.

A continuación se describe cada una de las fases de la metodología propuesta para el desarrollo de la presente investigación.

#### 3.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.

Durante el desarrollo de esta investigación se realizó una búsqueda, recopilación y revisión de diversas fuentes bibliográficas como libros especializados, tesis y trabajos de grado, artículos recientes publicados en revistas nacionales e

internacionales, normas técnicas ASTM, NTC e ISO, prácticas recomendadas y especificaciones API. Con base en esta revisión bibliográfica se realizó un análisis comparativo de las principales técnicas no destructivas existentes, que permiten cuantificar el tamaño de las grietas y deformaciones presentes en la superficie externa de tubería flexible utilizada en el transporte de hidrocarburos, con el fin de determinar la técnica más adecuada para esta aplicación.

Se tomaron como criterios de selección de la técnica, tipos de defectos detectables en la superficie externa, detección de deformaciones, calidad en el registro de información de la zona evaluada y resolución en la cuantificación de discontinuidades. Los resultados obtenidos de este análisis se presentan el capítulo 4.

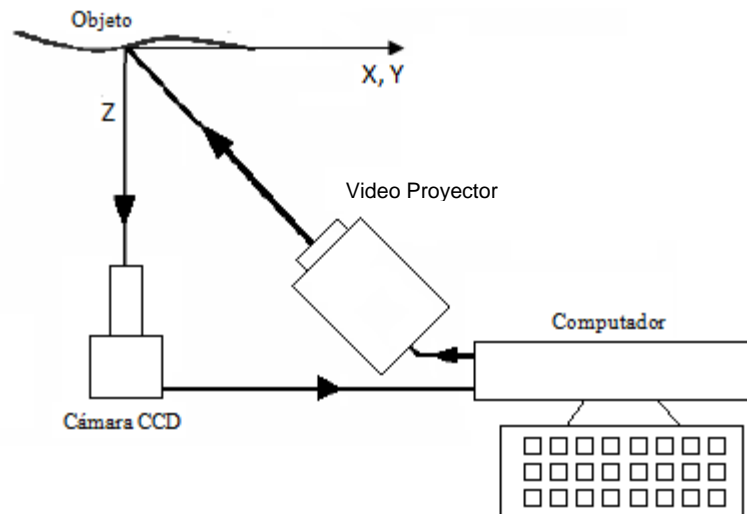
La técnica no destructiva que concuerda con los criterios exigidos, es aquella que se implementa por medio de un sistema óptico para reconstrucción tridimensional de la superficie externa de tubería flexible, empleando el método de proyección de franjas. Los parámetros a medir con este sistema son: medidas de profundidad en las grietas y en las deformaciones inducidas en el contorno, con alta precisión, alta resolución y a 360° grados de observación.

**3.1.1 Sistema Óptico de Proyección de Franjas.** La unidad de proyección-adquisición está conformada por un dispositivo de proyección (tradicionalmente un Video Proyector) para proyectar las franjas sobre la superficie de la tubería flexible y un dispositivo de observación (cámara CCD), para la adquisición de las imágenes de la exploración superficial de la tubería flexible. Las imágenes adquiridas son procesadas por la unidad de control, que permite adicionalmente sincronizar las adquisiciones y calibrar el dispositivo.

Generalmente la cámara CCD está situada perpendicularmente al plano X-Y donde se ubica la tubería flexible, llamado plano de referencia. El eje óptico del

video proyector se ubica formando un ángulo  $\theta$  con el eje óptico de la cámara CCD, como se muestra en la Figura 11. A este ángulo se le denomina ángulo de proyección.

Figura 11. Montaje experimental para la técnica de proyección de franjas. Vista superior.



Fuente. Autor.

**3.1.2 Procesos para la reconstrucción tridimensional.** En la reconstrucción tridimensional de la tubería flexible, se obtiene una nube de datos 3D ubicados en un sistema coordenado XYZ en milímetros (mm). La nube de datos modela la superficie externa de la tubería, reproduciendo características físicas como dimensiones, volumen y forma, obtenidas con un error de medida que deriva del dispositivo de reconstrucción 3D. El proceso de obtención de la nube 3D, para un campo de observación de la cámara sobre la superficie de la tubería, consta de una serie de etapas que incluye la proyección y adquisición de franjas, cálculo de la fase, corrección de discontinuidades de la fase  $\phi$  y conversión de  $\phi$  a coordenadas Z en mm.

### **3.2 CARACTERIZACIÓN DEL DISPOSITIVO DE MEDIDA 3D**

En esta etapa de la metodología experimental se calcula de manera aproximada el error que introduce el dispositivo de medida 3D en el cálculo de la coordenada Z. Para obtener el error se emplearon objetos de forma conocida y por comparación con los valores experimentales. En el capítulo 4 se muestran los resultados experimentales. Esta etapa fue soportada por investigaciones desarrolladas anteriormente [25] donde se demuestra que la resolución se incrementa con la disminución del paso de proyección y el incremento del ángulo de proyección.

### **3.3 CARACTERIZACIÓN DE GRIETAS Y DEFORMACIONES**

Para llevar a cabo esta fase, en primer lugar se realizó una revisión de los diferentes fabricantes de tubería compuesta flexible, para el transporte de hidrocarburo, que en el mercado se encuentran disponibles y de más uso en el mercado Colombiano.

Seleccionados los sistemas de tuberías a estudiar, se determinó, analizó y caracterizó las fallas típicas que se presentan en las mismas. Las especificaciones de las tuberías flexibles seleccionadas para la investigación y la caracterización de las fallas se mostrarán en el capítulo de resultados.

Para determinar la afectación que sufre la capa externa de la tubería y la influencia en la estructura total de la tubería compuesta flexible se realizaron para la presente investigación, tres (3) pruebas mecánicas estandarizadas, determinación de dimensiones, ensayo de dureza y resistencia a la tensión por anillo muescado, que permitieron obtener información sobre las características y propiedades físicas y mecánicas de la tubería flexible con refuerzo no metálico. Los resultados obtenidos de esta fase se presentan en el capítulo cuatro.

Se realizaron pruebas con el sistema de reconstrucción tridimensional mediante la determinación de su capacidad de resolución y área mínima detectable para la identificación de grietas y deformaciones. Finalmente se compararon mediciones sobre muestras con un rayado simulado en la superficie de la tubería flexible, hechas con el sistema óptico y la verificación por medio de microscopía cofocal utilizando el microscopio digital marca HIROX KH-7700. Los resultados se indican en el capítulo 4 de resultados.

### **3.4 INFORME FINAL**

Esta fase de la investigación se realizó a partir de los resultados obtenidos en cada una de las fases de la metodología anteriormente mencionadas.

## **4. RESULTADOS Y ANÁLISIS**

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en el desarrollo de la presente investigación, teniendo en cuenta las fases señaladas dentro de la metodología experimental descrita en el capítulo anterior.

### **4.1 SELECCIÓN DE LA TÉCNICA NO DESTRUCTIVA**

A partir de la revisión bibliográfica se hizo el análisis comparativo de las principales técnicas que permiten la cuantificación del tamaño de las grietas y deformaciones presentes y medibles en la superficie externa de tubería flexible, utilizada para transporte de hidrocarburos. En la tabla 7 se presenta el resultado obtenido.

Por lo anterior, la técnica más adecuada para el desarrollo de esta investigación es la implementación de un sistema óptico, empleando la técnica de proyección de franjas, por la rapidez de obtención del registro tridimensional, su alta resolución en la exploración de la superficie externa de la tubería flexible, bajos costos de implementación y su relativa facilidad de aplicación en campo. A pesar que el alcance de esta investigación no tiene el desarrollo para un sistema que sea aplicable en campo, los resultados presentados solo incluyen la construcción de un sistema para laboratorio.

Tabla 7 Análisis comparativo de pruebas no destructivas para materiales compuestos

Técnicas PND		Fortalezas	Limitaciones	Registro 3D de la superficie evaluada	Obtención de resultados e interpretación	Resolución
Ultrasonido	Pulso-Eco [30]	Posición y tamaño de grietas y defectos en la dirección del haz ultrasónico.	Solo aplicable a tuberías de una matriz no a compuesta, se pueden generar zonas muertas en la cercanía de los palpadores.	No aplica	Manejo de múltiples variables, rápida obtención de resultados y necesita personal capacitado y con experiencia en la técnica.	Longitud mínima de la indicación de Aprox. 1,0 mm
	Retrodispersión [31]	Información sobre la orientación y apilamiento de la fibra interna.	El ángulo es crítico ya que debe ser mantenido con precisión para mantener la alineación con la superficie.	No aplica	Nos da como resultado el aseguramiento de la calidad de la capa de fibras.	Técnica cualitativa nos da el estado de la capa de fibras.
	Espectroscopia ultrasónica [31], [32]	Se utiliza para conocer espesores, detectar poros, grietas y delaminaciones a diferentes profundidades.	Solo aplicable a tuberías de una matriz, la señal se puede atenuar debido a la naturaleza de los materiales poliméricos.	No aplica	Manejo de múltiples variables, rápida obtención de resultados y necesita personal capacitado y con experiencia en la técnica.	Longitud mínima de la indicación de Aprox. 0,5 mm.
Inspección Radiográfica	Rayos X [33]	Puede detectar grietas, delaminaciones y falta de continuidad entre capas.	Las grietas no se detectan a menos que sean paralelas al haz de radiación, las fibras son difíciles de detectar porque la matriz y el refuerzo tiene alto contenido de carbono y la absorción de radiación son similares.	No aplica	Requiere de tiempo para la obtención de resultados y un analista con experiencia para detectar interpretar los datos obtenidos.	Longitud mínima de la indicación de Aprox. 1,0 mm radiografía tangencial.

Técnicas PND		Fortalezas	Limitaciones	Registro 3D de la superficie evaluada	Obtención de resultados e interpretación	Resolución
	Tomografía computada [34]	Básicamente puede detectar todas las anomalías presentes y tiene gran funcionalidad para tubería compuesta.	Alto Costo del servicio operador especialista y no puede ser utilizada en campo.	Reconstruye imágenes 3D	Toma entre 360 y 720 radiografías en el eje axial de la muestra	Longitud mínima de la indicación de Aprox. 1,5 mm
<b>Sistemas ópticos</b>	Reconstrucción Laser. [35]	Identificación de defectos superficiales.	Necesita equipo y elementos de costo relativamente Alto. Mayor número de datos para la reconstrucción en comparación a la otra técnica Óptica.	Reconstrucción de superficies en tres dimensiones.	Rápida obtención de resultados y corto entrenamiento del operario.	Láser: 0.01 mm con campo de observación de 4mm x3mm.
	Reconstrucción por proyección de franjas. [36]	Identificación de defectos superficiales.	Desarrollo en laboratorio. La radiación de la superficie puede originar degradación de la imagen.	Reconstrucción de superficies en tres dimensiones.	Rápida obtención de resultados gran número de datos para la reconstrucción y la calibración es manual.	Proyección de franjas: 0.02mm en campo de observación de 100x100mm <sup>2</sup>

Fuente. Autor

## 4.2 RECONSTRUCCIÓN 3D MEDIANTE LA TÉCNICA DE PROYECCIÓN DE FRANJAS

Como ya se ha mencionado, para esta investigación la técnica más adecuada para la adquisición de la información de la superficie de la tubería flexible con refuerzo no metálico, se realizó mediante la implementación de un sistema óptico utilizando la técnica de proyección de franjas.

**4.2.1 Montaje del sistema de reconstrucción 3D.** La unidad de proyección-adquisición del sistema óptico de reconstrucción tridimensional implementado, está formada por: una cámara CCD de la marca Edmund referencia EO 813M-65, las características de la cámara se pueden observar en la tabla 8, con conexión USB 2.0, monocromática y resolución VGA de 1024 píxeles x 768 píxeles, y lente EDMUND OPTICS de 16 mm/F1.3; y un video proyector DELL referencia M110X, con brillo de 300 lúmenes ANSI y resolución XVGA de 1280 píxeles x 800 píxeles. Las imágenes se procesaron con un computador portátil Toshiba referencia Satellite E-45T, con procesador Intel Core i5, 6 GB de memoria RAM y tarjeta gráfica NVIDIA NVS 5200M de 1 GB.

Tabla 8. Características de la cámara EDMUND OPTICS 813M

Tipo de sensor	Sony ICX204
Área del sensor, HxV (mm)	4.76 x 3.57
Píxeles (H x V)	1024 x 768
Tamaño de pixel, H x V ( $\mu\text{m}$ )	4.65 x 4.65
Profundidad de pixel	8-bit
Velocidad	30 -fps
Montura del lente	Montura C

Fuente. Edmund cameras [37]

La adquisición de la información se realizó por medio de un computador portátil con sistema operativo Windows 8.1 de 64 bits. Por medio del computador y utilizando algoritmos desarrollados para Matlab ®, se generó y desplazó de

manera controlada el patrón de franjas. Las imágenes capturadas por la cámara fueron almacenadas en la memoria del computador para su posterior procesamiento. En la figura 12 se observa el montaje experimental del sistema.

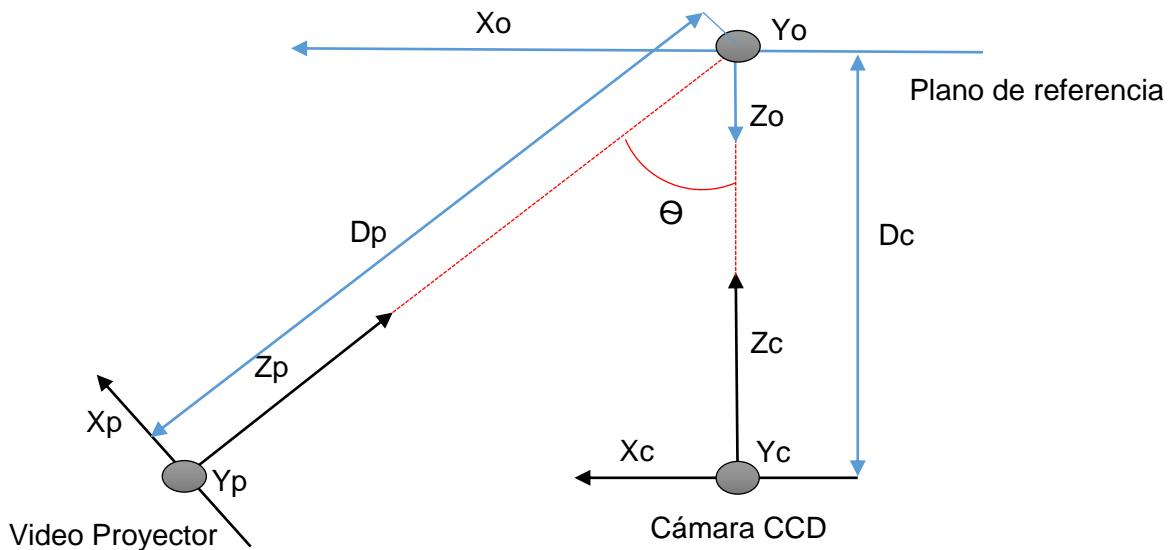
Figura 12. Unidad Proyección-Adquisición



Fuente. Autor

Con el fin de obtener un campo de observación de aproximadamente  $10 \times 10 \text{cm}^2$  y una resolución de  $100 \mu\text{m}$ , se ubicaron sus componentes de la siguiente manera: la distancia entre la cámara y el plano de referencia ( $D_c$ ) es de 30cm, la distancia entre el plano de referencia y el video Proyector ( $D_p$ ) es de 28.3cm y el ángulo ( $\theta$ ) entre el eje de proyección y el eje óptico es de aproximadamente 45 grados. Las coordenadas de la cámara ( $X_c, Y_c, Z_c$ ), coordenadas del proyector ( $X_p, Y_p, Z_p$ ) y las coordenadas del plano de referencia ( $X_o, Y_o, Z_o$ ) se pueden ver en la figura 13.

Figura 13. Coordenadas del sistema implementado



Fuente. Autor.

**4.2.2 Calibración de un sistema de reconstrucción 3D por proyección de franjas.** El proceso de calibración de una unidad de proyección-adquisición consta de dos partes bien definidas: la calibración de la cámara CCD y la calibración del sistema. La calibración de la cámara consiste en encontrar sus parámetros intrínsecos, extrínsecos y posibles distorsiones que esta tenga. Para ello se usan expresiones matemáticas deducidas a partir de la relación de características de la cámara y de su geometría. Dichos modelos matemáticos suelen ser matrices con propiedades específicas, que representan el mapeo que realiza la cámara desde un punto en el espacio tridimensional a una imagen en dos dimensiones. El modelo más usado para la representación matemática de cámaras finitas (cámaras con su centro definido en un punto específico) es el modelo Pinhole [38].

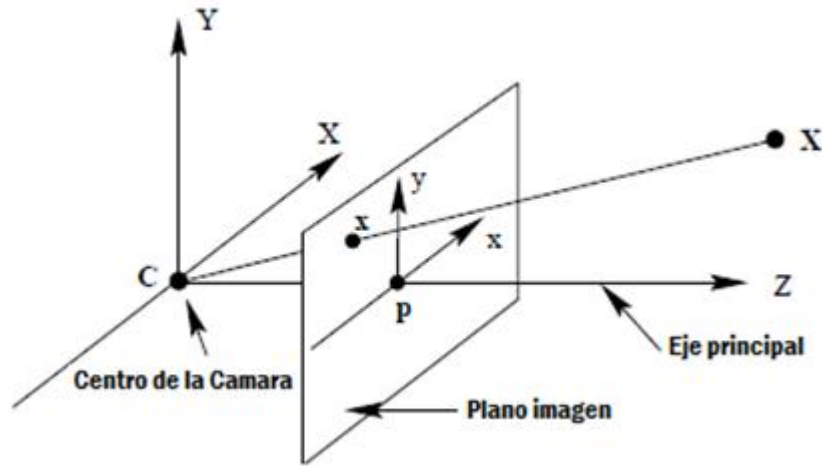
**4.2.2.1 Calibración experimental de la cámara CCD.** La técnica de calibración que se ha descrito, permite calcular los parámetros intrínsecos y extrínsecos usando un modelo lineal [39]. En la técnica propuesta por Zhang [40], se requiere que un patrón plano sea visto por la cámara en al menos dos posiciones diferentes. El objeto de calibración es un patrón ajedrezado (cuadros a dos colores), una de las herramientas más usada y referenciada para la calibración de cámaras es un algoritmo de código abierto desarrollado dentro del entorno de MATLAB® y de libre distribución llamado *Camera Calibración Toolbox (CCT)*. Se encuentra disponible en [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/). La técnica de Zhang se basa en el método Pinhole el cual se describe a continuación.

- **Modelo Pinhole para calibración de cámaras.** En el modelo Pinhole se define un plano, llamado plano imagen, y se asume que sobre él se proyectan los puntos del espacio tridimensional. El centro del plano imagen se conoce como punto principal ( $p$ ), y es colineal con el centro de la cámara ( $C$ ). Dichos puntos son, independientemente, el origen de un sistema de coordenadas Euclidianas y se encuentran sobre el eje principal de la cámara o el eje  $Z$  (también llamado el eje óptico). En la figura 14 se puede observar cómo un punto  $X$  ubicado en el espacio es mapeado a un punto  $x$  en el plano imagen siguiendo la línea de proyección  $CX$  [39].

Por consiguiente, las coordenadas de la imagen final se pueden deducir de acuerdo con la ecuación 10. Esta ecuación describe el mapeo de las coordenadas 3D de un punto en el espacio a las coordenadas 2D del mismo punto en una imagen. Este es un mapeo desde el espacio Euclidiano 3D a el espacio Euclidiano 2D ( $\mathbb{R}^3 \mapsto \mathbb{R}^2$ ).

$$(X, Y, Z)^T \mapsto (fX/Z, fY/Z)^T \quad (10)$$

Figura 14. Geometría de la cámara según el modelo Pinhole



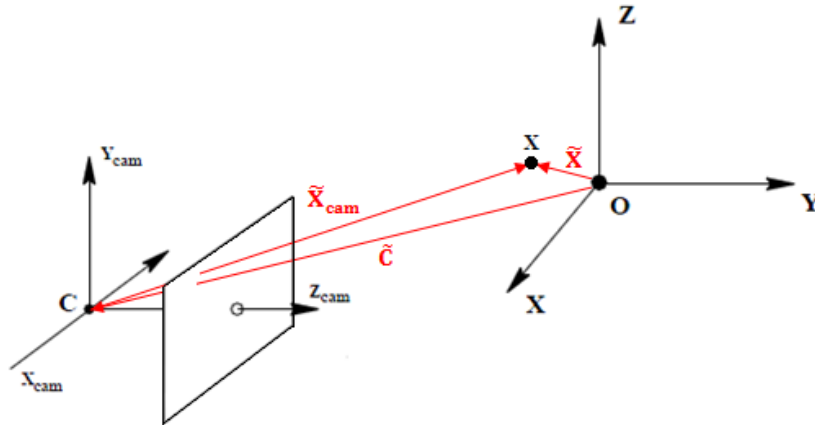
Fuente. GONZÁLEZ, A.L. [39]

Aplicando conceptos de *Geometría Proyectiva*, los puntos del mundo real y los de la imagen se pueden representar como un mapeo lineal de sus coordenadas homogéneas. La ecuación 10 se puede expresar en términos de una multiplicación de matrices, como se observa en la ecuación 11. [41]

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} fX \\ fY \\ Z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

Por otro lado, los puntos o los objetos en el espacio 3D se suelen ligar a un sistema coordenado, diferente al de la cámara, que algunos autores llaman *el sistema coordenado del mundo*. Como se observa en la figura 15.

Figura 15. Transformación Euclidiana entre el sistema coordenado de un objeto y el de la cámara



Fuente. GONZÁLEZ, A.L. [39]

En la figura 15,  $\tilde{X}$  es un vector con las coordenadas de la posición del punto X en el *sistema coordenado del mundo*,  $\tilde{X}_{cam}$  contiene las coordenadas del mismo punto en el *sistema coordenado de la cámara*, y  $\tilde{C}$  las coordenadas del centro de la cámara en el *sistema coordenado del mundo*. La ecuación 12 se encuentra a menudo en la literatura en donde  $t$  representa el término  $-R\tilde{C}$ . [41]

$$\tilde{X}_{cam} = R\tilde{X} + t \quad (12)$$

El vector  $\tilde{X}_{cam}$  contiene las mismas coordenadas las cuales relacionan la orientación y posición de la cámara con el *sistema de coordenadas del mundo*.

Además en coordenadas homogéneas la ecuación 12 asume que el origen de coordenadas del *plano imagen* es el *punto principal*  $p$ ; en donde  $(p_x, p_y)$  son las coordenadas del punto principal, se puede expresar así en la ecuación 13.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} fX + Zp_x \\ fY + Zp_y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & p_x & 0 \\ 0 & f & p_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

Y de forma compacta se puede expresar como se muestra en la ecuación 14.

$$x = K[I|0]X \quad (14)$$

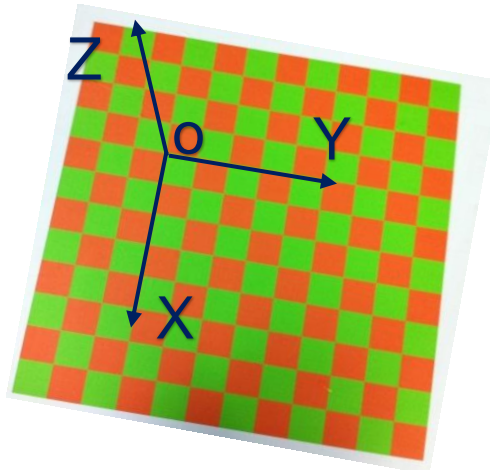
La matriz  $K$ , ecuación 15, se conoce como la *matriz de calibración* de la cámara.

$$K = \begin{bmatrix} f & 0 & p_x \\ 0 & f & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Los elementos de  $K$ , distancia focal y origen de coordenadas, se conocen como los *parámetros internos de la cámara* (parámetros intrínsecos); los elementos de  $R$  y  $\tilde{C}$ , los cuales relacionan la orientación y posición de la cámara con el *sistema de coordenadas del mundo*, son llamados *parámetros externos de la cámara* (parámetros extrínsecos).

- **Calibración experimental de la cámara para reconstrucción de tubería flexible.** Para esta calibración experimental se empleó la CCT; como patrón de calibración se acondicionó una tabla de acrílico con dimensiones 22 cm x 28 cm x 0,5 cm, adhiriendo a una de sus caras un patrón ajedrezado con cuadros de 10 mm × 10 mm como se observa en la figura 16.

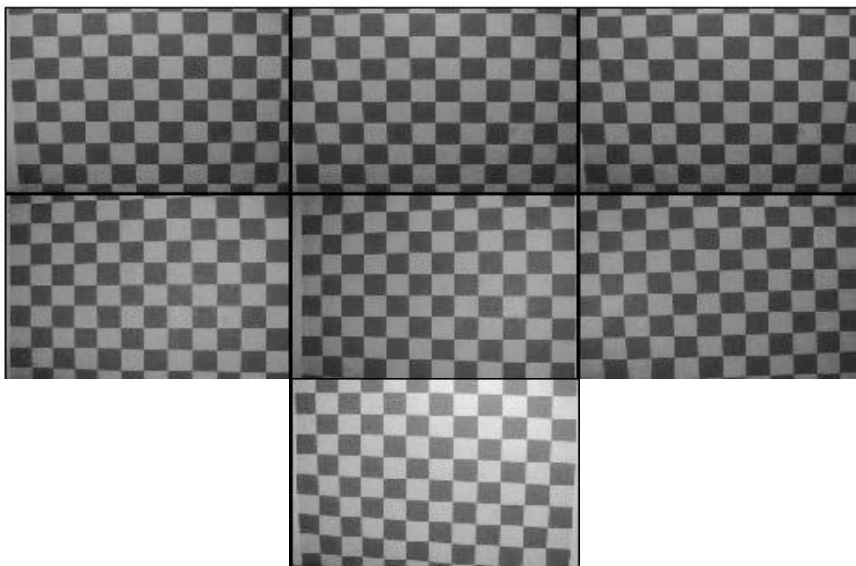
Figura 16. Patrón de calibración de cámara CCD



Fuente. Autor

Para esta investigación se tomaron 7 imágenes, cada una en una posición diferente y arbitraria dentro de la profundidad del campo de observación de la cámara. Luego, las imágenes son cargadas en la CCT, las imágenes se observan en la figura 17.

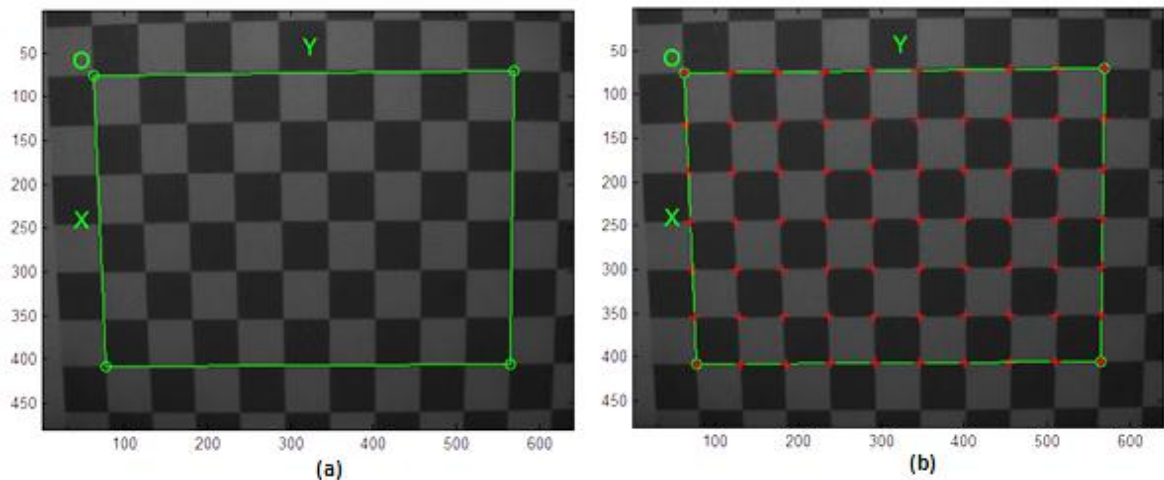
Figura 17. Imágenes de calibración de la cámara



Fuente. Autor

El siguiente paso consiste en calcular las coordenadas  $(x_i, y_i)$ , en unidades métricas, del mayor número posible de puntos  $x_i$  sobre las imágenes. Para tal fin, mediante técnicas de procesamiento de imágenes, la CCT identifica las esquinas de los cuadrados presentes en una sub-área seleccionada por el usuario, donde también se define el sistema coordenado del *plano imagen*, con origen en la esquina superior izquierda, como se observa en la figura 18.

Figura 18. Procesamiento de la Imagen 1 mediante la CCT. (a) Sub-área seleccionada por el usuario, (b) Esquinas calculadas



Fuente. Autor

Las esquinas encontradas corresponden a los puntos  $x$  en la imagen, y a los puntos  $X$  en el plano de calibración. Las coordenadas  $(X_i, Y_i)$  de los puntos  $X_i$ , en el plano de calibración, se pueden deducir fácilmente en coordenadas métricas gracias a que las dimensiones de los cuadros son conocidas y teniendo en cuenta que para el plano de calibración  $Z = 0$  respecto al *sistema coordenado del mundo*.

Las esquinas de las imágenes son calculadas con una precisión de 0,1 píxel aproximadamente, usando técnicas de procesamiento digital de imágenes

especializadas en detección de bordes [42]. Este procedimiento se realiza para las 6 imágenes restantes, con el fin de recuperar la información.

La transformación proyectiva entre dos planos de la *Geometría Proyectiva*, toma  $Z = 0$  para el plano en el *sistema coordenado del mundo* y se asemeja a la transformación proyectiva entre: el plano imagen de una cámara y un plano físico; esta transformación se conoce como una *homografía*. La expresión matemática que define esta transformación, básicamente es la multiplicación entre las coordenadas de un punto en el plano y su respectiva matriz de *Homografía H* (matriz de *Proyección* reducida), ecuación 16. [41]

$$x = HX \quad (16)$$

Con estos datos se ejecuta el algoritmo de calibración calculando inicialmente la matriz de *Homografía H*, ecuación 16, para cada imagen. En la ecuación 17 se muestran los resultados obtenidos para la matriz  $H$  de la imagen número 1, las restantes 6 imágenes tendrán el mismo tratamiento para su procesamiento.

$$H_1 = \begin{bmatrix} -0.201 & 9.773 & 91.354 \\ 9.995 & 0.082 & 108.291 \\ 0.000 & -0.004 & 1.0000 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Una vez conocidos los valores  $h_{ij}$  de cada imagen, se llega a la matriz de calibración  $K$ , ecuación 18. Los parámetros intrínsecos de la cámara calculados con la *CCT*, se muestran en la ecuación 18.

$$K = \begin{bmatrix} 3492.1 & 0 & 538.7 \\ 0 & 3456.4 & 389.0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Finalmente, con los valores de la matriz  $K$ , en *pixeles*, se procede a hallar los

parámetros extrínsecos, que corresponden a la matriz compuesta por la matriz de rotación  $R_i$  y el vector de traslación  $t_i$  de cada una de las imágenes; se muestra el tratamiento realizado para la imagen número 1 ecuación 19.

$$R_1[I | t_1] = \begin{bmatrix} -0.022 & 0.990 & -0.137 & -34.45 \\ 0.999 & 0.023 & 0.006 & -27.88 \\ 0.009 & -0.137 & -0.990 & 345.22 \end{bmatrix} \quad (19)$$

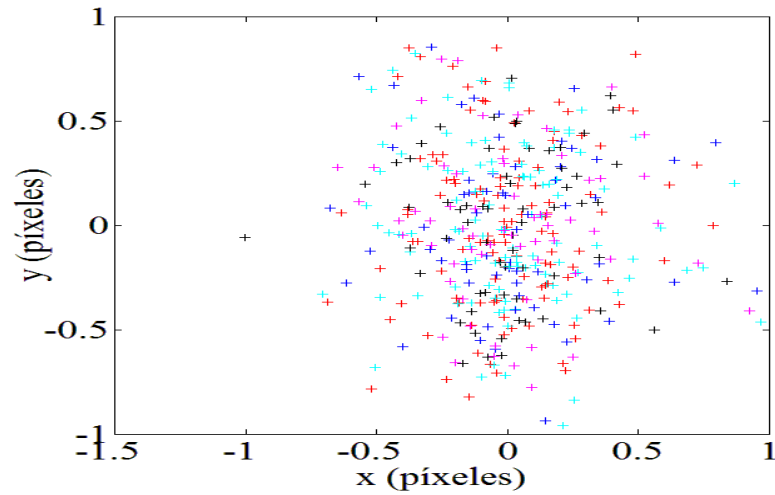
Conociendo el valor de los parámetros intrínsecos, matriz  $K$ , y el de los parámetros extrínsecos, matriz  $R_i[I | t_i]$ , se calculan las coordenadas teóricas  $(x_i, y_i)$  en píxeles de los puntos  $x_i$ , usando las coordenadas  $(X_i, Y_i, Z_i)$  en milímetros del respectivo punto  $X_i$  en el patrón de calibración. De este modo, la función de error (F) a optimizar está dada por la ecuación 20.

$$F = \sum_{i=1}^N (\tilde{x}_i - x_i)^2 + \sum_{i=1}^N (\tilde{y}_i - y_i)^2 \quad (20)$$

En donde  $N$  es el número de puntos de observación,  $(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$  son las coordenadas experimentales y  $(x_i, y_i)$  las teóricas de un punto  $X_i$ . Un procedimiento de optimización implementado en la CCT permiten conocer  $k$  y  $R_i$  para minimizar  $F$

En la figura 19, se muestra la nube de error final. La posición de cada cruz en la gráfica corresponde a la diferencia entra las coordenadas teóricas y las experimentales, de cada uno de los puntos  $x_i$  de las 7 imágenes.

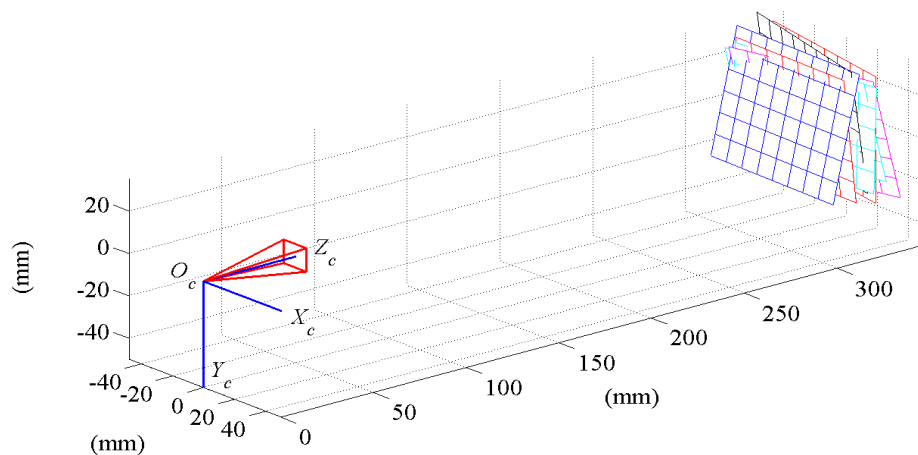
Figura 19. Error de re-proyección en píxel



Fuente. Autor

El error medio de x corresponde a 0,22 píxeles y en y a 0,27 píxeles, esto evidencia la precisión al calcular los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara. En la figura 20, se observa la representación gráfica de los parámetros extrínsecos finales respecto al sistema coordenado de la cámara.

Figura 20. Posiciones de los planos adquiridos respecto al sistema coordenado de la cámara

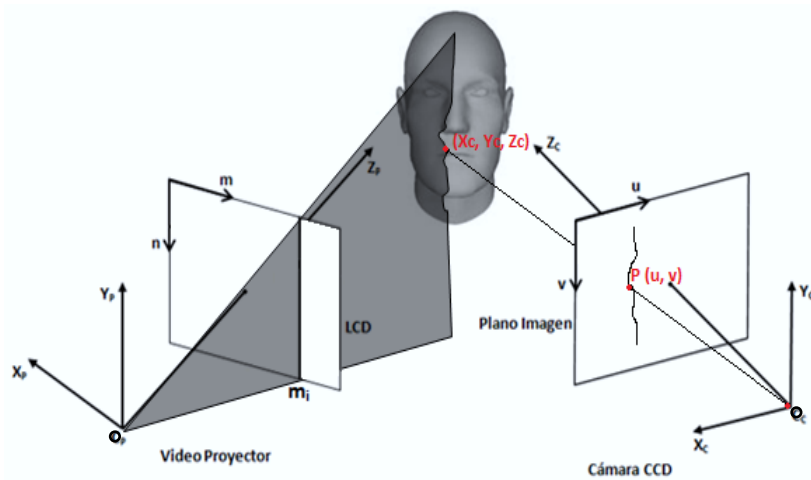


Fuente. Autor

- **Calibración experimental de una unidad de proyección-adquisición para reconstrucción de tubería flexible.** En la sección anterior se mostró como calibrar una cámara CCD, a partir del modelo Pinhole y el toolbox de calibración de cámaras digitales. En esta sección se muestra el proceso empleado para la calibración de la unidad proyección-adquisición empleando la extracción de datos 3D de un objeto.

El proceso de calibración depende de la metodología establecida en la extracción de coordenadas 3D. Aunque en el capítulo 2 se mostraron los conceptos teóricos para extraer información 3D con la metodología de proyección de franjas, es importante definir en detalle el proceso utilizado en la investigación. La figura 21 muestra el detalle empleado para calcular las coordenadas  $(X, Y, Z)$  del punto  $P$  sobre la superficie del objeto, en el sistema coordenado de la cámara.  $O_p (X_p, Y_p, Z_p)$  define el sistema coordenado del proyector a una distancia focal y paralelo al plano  $(X_p, Y_p)$  se ubica la LCD.  $O_c (X_c, Y_c, Z_c)$  define el sistema coordenado de la cámara, el plano imagen es paralelo al plano  $(X_c, Y_c)$ .

Figura 21. Calibración del sistema proyección-adquisición para reconstrucción 3D.



Fuente. Carreño, J.E., Salazar, G [43]

Sobre el plano de la LCD se ubica una función de transmitancia dada por la ecuación 3

$$I(x_o, y_o) = I'_o(x_o, y_o) + A'(x_o, y_o) \cos(\phi) \quad (10)$$

Donde:

$$\phi = \frac{2\pi}{P} m \quad (21)$$

Siendo  $m = 0, 1, 2, \dots, M-1$  donde  $M$  es el número máximo de columnas.  $P =$  paso de pixeles.

La imagen que se obtiene de la cámara corresponde al sistema de deformadas por el objeto. Para un punto  $P (X_c, Y_c, Z_c)$  sobre el objeto se obtiene un punto imagen  $P' (u, v)$ , donde  $u$  y  $v$  definen las coordenadas en pixeles sobre el plano imagen, tanto para  $P$  como para  $P'$  le corresponde la misma fase absoluta  $\phi'$  igual a  $\frac{2\pi}{P} m'$ , siendo  $m'$  la columna que al proyectarla pasa por el punto  $P$ . Esta proyección genera un plano de luz llamado plano isofase, y corresponde a la fase  $\phi'$  y columna  $m'$ . La línea  $PP'O_c$  corresponde a la línea de visión del punto recuperado  $P'$ . el proceso de reconstrucción funciona de la siguiente manera: se calcula la fase del sistema de franjas deformado por la superficie, para el punto  $P'$  se tiene su fase  $\phi'$  y la ecuación de su línea de visión, ya que reconoce los parámetros intrínsecos de la cámara; con  $\phi'$  se calcula el valor de la columna  $m'$  según ecuación 21; conociendo  $m'$  se debe calcular la ecuación del plano isofase en el sistema coordenado de la cámara y que pasa por  $m'$ ; finalmente la intercepción del plano isofase con la línea de visión se obtiene la coordenada del plano  $P' (X_c, Y_c, Z_c)$ .

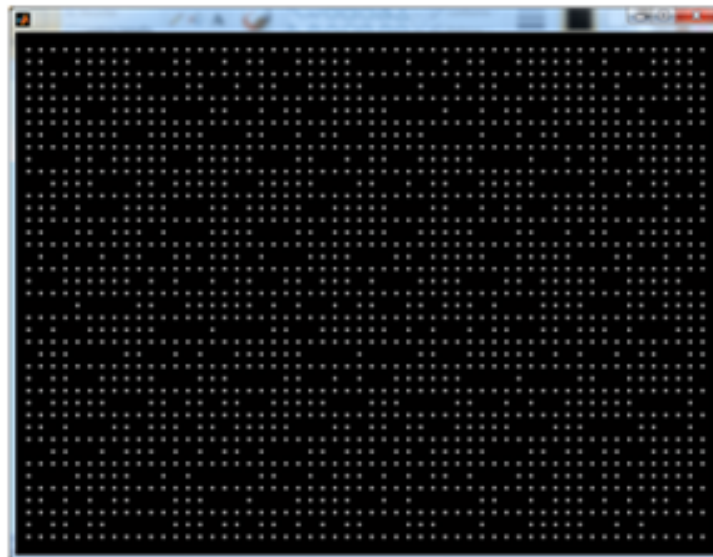
Los parámetros intrínsecos se calculan en un patrón ajedrezado y el toolbox de la cámara CCD, la fase se calcula con el método de corrimiento de fase a  $n=4$ , el problema que se plantea es como calcular la ecuación de los planos de la isofase en el sistema coordenado de la cámara. El proceso que permite obtener las

ecuaciones del plano isofase en función de  $m$  fue desarrollado al interior del grupo GOTS (Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales) y explica en detalle en [39].

El proceso de calibración presenta las siguientes características:

- Se emplea una superficie plana con un tablero ajedrezado en colores verde y rojo pintados en su superficie, como se muestra en la figura 16. Los colores permiten adquirir una imagen con iluminación blanca y con una cámara monocromática se obtiene una imagen homogénea, sin cuadros, pero al iluminar con luz roja, la cámara monocromática genera una imagen con cuadros negros y blancos.
- Sobre la LCD se usa un patrón de puntos como se muestra en la figura 22. Para cada punto se conocen las coordenadas en píxeles  $(m, n)$  sobre la LCD.

Figura 22. Imagen proyectada, Patrón de puntos.

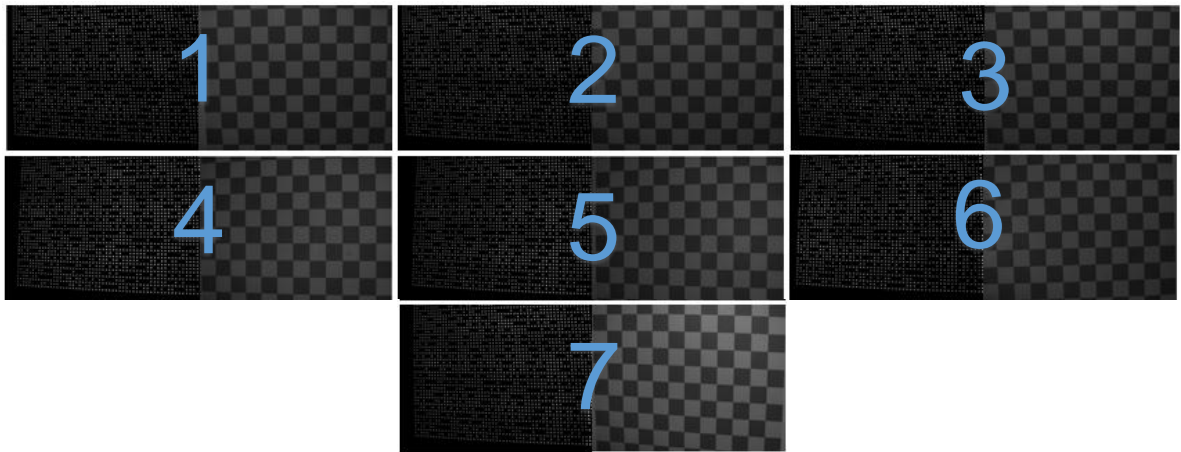


Fuente. Autor

- Sobre el patrón ajedrezado de colores, que se ubica en el campo de observación sostenido con la mano y en una posición arbitraria, se proyectan dos imágenes, una el patrón de puntos y una iluminación homogénea roja.

Se adquieren 2 imágenes la del patrón de puntos y el patrón ajedrezado. La figura 23 muestra las 14 imágenes para 7 posiciones relativas y arbitrarias.

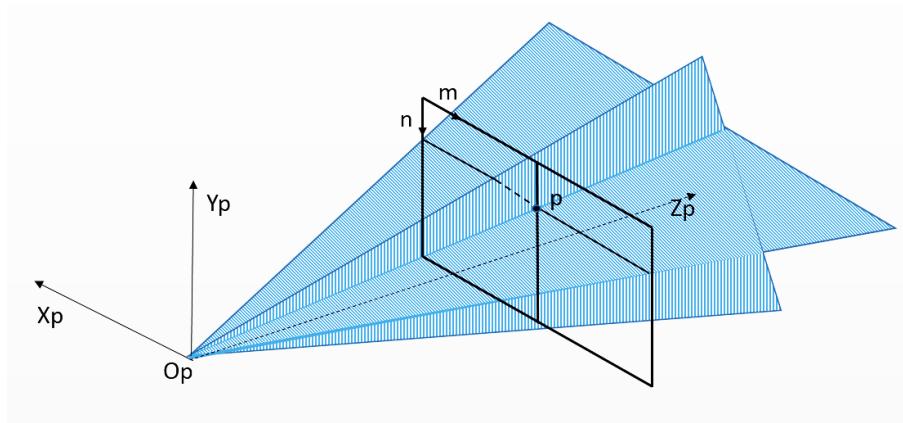
Figura 23. Imágenes de calibración. Puntos y cuadros



Fuente. Autor

Para el procesamiento de las imágenes se realiza de acuerdo a la figura 24.

Figura 24. Proyección de planos vertical y horizontal sobre plano  $m \times n$



Fuente. Autor

De acuerdo con la figura 24, un punto sobre la LCD corresponde a la intercepción de la fila  $n$  y la columna  $m$ . Al proyector en el punto se generan dos planos de luz, uno vertical y otro horizontal las ecuaciones 22 y 23 respectivamente.

$$w_{11}X_c + w_{12}Y_c + w_{13}Z_c + w_{14} = \alpha m_x \quad (22)$$

$$w_{21}X_c + w_{22}Y_c + w_{23}Z_c + w_{24} = \alpha n_y \quad (23)$$

Describen las ecuaciones de los planos en el sistema coordenado de la cámara. Los coeficientes  $w_{ij}$  son función de los parámetros intrínsecos del proyector y de la matriz de rotación y vector translación que trasladan los sistemas coordenados del proyector a la cámara. El detalle matemático y que permite demostrar las ecuaciones 22 y 23 se desarrollan en [39]. Esta ecuación se puede describir matricialmente como lo indica la ecuación 24.

$$\begin{bmatrix} \alpha m_x \\ \alpha n_y \\ \alpha \end{bmatrix} = [w_{ij}] \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

El paso a seguir es calcular los coeficientes de  $w_{ij}$  que permiten conocer la ecuación del plano isofase que pasa por  $m$ , ecuación 22. Esta ecuación matricial indica que existen una relación lineal entre las coordenadas de los puntos de la LCD ( $m \times n$ ) y las coordenadas de los puntos ( $X_c, Y_c, Z_c$ ) sobre el plano ajedrezado. El procesamiento de las imágenes adquiridas se realiza de la siguiente manera:

Las imágenes del tablero ajedrezado permiten calcular los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara. Con la imagen del patrón de puntos se calculan los puntos con precisión subpixel y se determinan  $m$  y  $n$ . Por cada punto se tienen dos ecuaciones lineales con  $w_{ij}$  como incógnita, la tabla 9 muestra el número de puntos encontrados para cada imagen. Realizando un ajuste lineal por mínimos

cuadrados se calcula  $w_{ij}$ ; este coeficiente es almacenado y empleado en el proceso de reconstrucción 3D [44].

Tabla 9. Puntos con coordenadas  $(X_c, Y_c, Z_c)$  recuperadas de las 7 imágenes de calibración

Imagen	Puntos
1	725
2	670
3	721
4	732
5	727
6	675
7	765
<b>Total: 5015</b>	

Fuente. Autor

Una vez calculados los coeficientes  $w_{ij}$ , la unidad de proyección-adquisición está calibrada y se puede iniciar con el proceso de reconstrucción 3D.

**4.2.3 Reconstrucción 3D de la superficie de la tubería flexible.** Con la unidad de proyección–adquisición calibrada, se realizó la reconstrucción tridimensional de la superficie de la tubería flexible. Para lograr una reconstrucción 3D a 360° de observación y una resolución aprox. de 100  $\mu\text{m}$ , esta resolución nos permite reconstruir afectaciones generadas sobre la tubería a 10% y 50% de la profundidad de la capa externa de la tubería. Se ubicaran sobre la superficie de la tubería flexible figuras geométricas que actúan como puntos de referencia para la unión de dos nubes de puntos 3D consecutivas, como se muestra en la figura 25. Siete secciones reconstruidas a diferentes posiciones angulares alrededor de la tubería permiten extraer información 3D alrededor de toda la tubería.

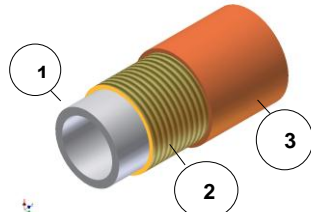
Figura 25. Figuras Geométricas para unión de dos imágenes adquiridas




Fuente. Autor

Para el procedimiento experimental se implementó la unidad descrita y calibrada en la sección 4.2.2.1.3 *Calibración experimental de una unidad de proyección-adquisición para reconstrucción de tubería flexible*, se reconstruyeron tramos de tubería flexible con refuerzo no metálico, fabricados en diferentes materiales poliméricos, como se muestra en la tabla 10.

Tabla 10. Características de los sistemas de tubería seleccionados

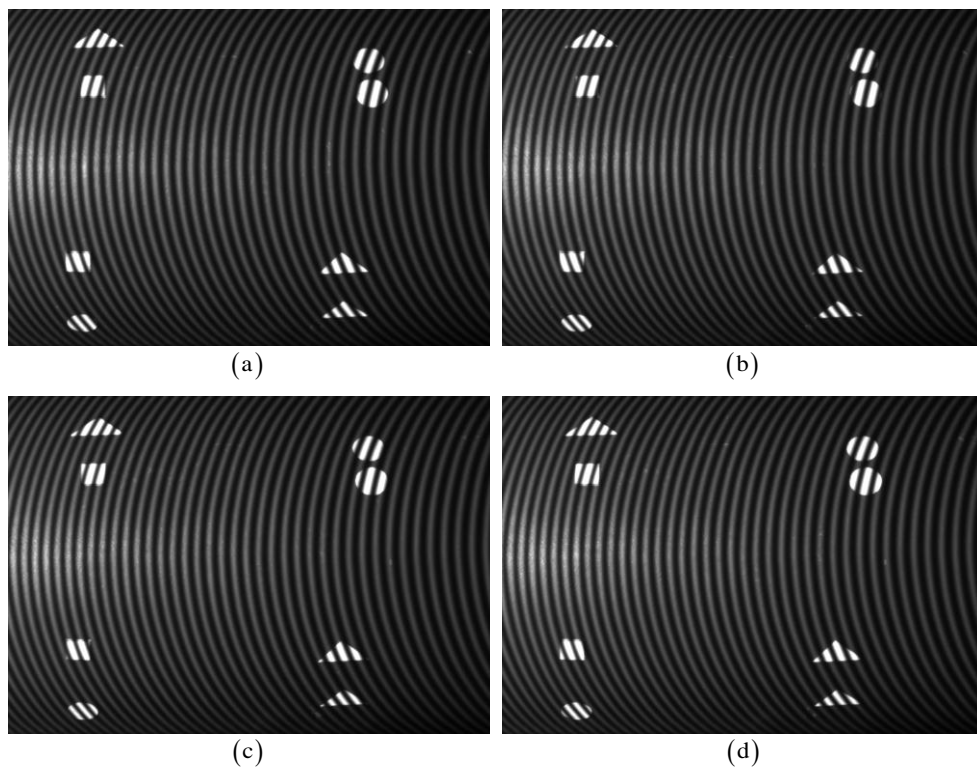
Diámetro (in)	Capa interna [1]	Capa intermedia (refuerzo) [2]	Capa externa [3]	Tecnología
2 <sup>3</sup> / <sub>8</sub>	Nylon (PA) Polipropileno Fortron (PPS)	Fibra de Aramida	Nylon (PA) Polipropileno (PP)	

3	Polietileno de Alta Densidad (PEAD)	Fibra de Vidrio	Polietileno de Alta Densidad (PEAD)	
---	-------------------------------------	-----------------	-------------------------------------	---

Fuente. Autor

Para reconstruir superficie de la tubería flexible se ubica frente a la unidad de proyección–adquisición, y sobre él se proyectan consecutivamente cuatro imágenes de un sistema de franjas con paso  $P = 8$ , y un desfase de  $\phi = \pi/2$  entre cada imagen. De cada proyección se adquiere una imagen con la cámara CCD, como se muestra en la figura 26.

Figura 26. Sistema de franjas proyectado sobre un objeto con un desfase de, (a)



(a)  $0$ , (b)  $\pi/2$ , (c)  $\pi$ , y (d)  $3\pi/2$

Fuente. Autor

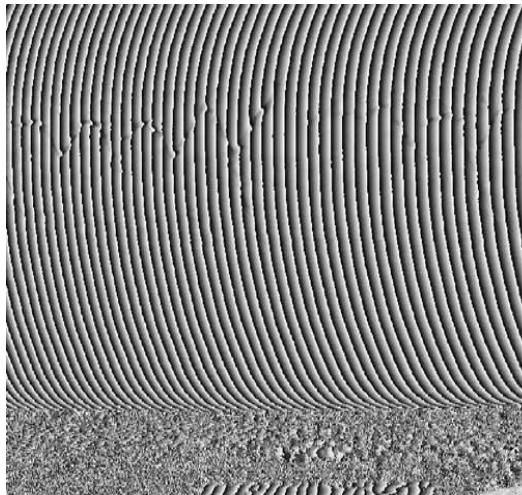
Usando la ecuación 9 se recupera la fase discontinua del sistema de franjas proyectado sobre el objeto.

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right) \quad (9)$$

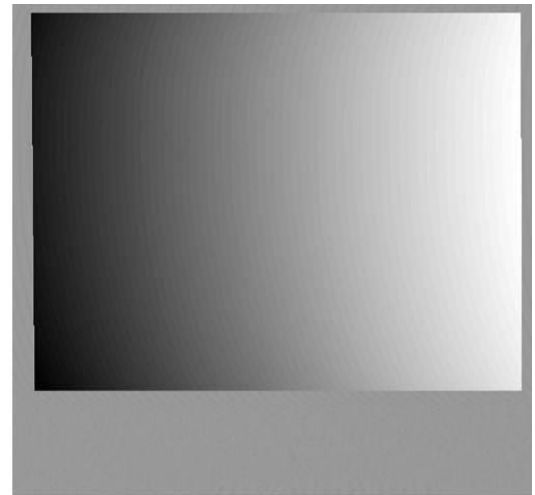
Para hallar la fase continúa es necesario identificar las discontinuidades y adicionar valores de  $\pm 2\pi N$ , siendo  $N$  una función escalón entera dada por el intervalo en las discontinuidades.

Este procedimiento se conoce como “*Unwrapping*” y se usa para obtener la fase continua de un patrón de franjas proyectado sobre un plano o sobre un objeto [28]. En la figura 27(b) se observa la fase continua, calculada a partir de la fase discontinua de la figura 27(a).

Figura 27. (a) Fase discontinua de las franjas proyectadas sobre la tubería, (b) Fase continúa de las franjas proyectadas sobre la tubería



(a)



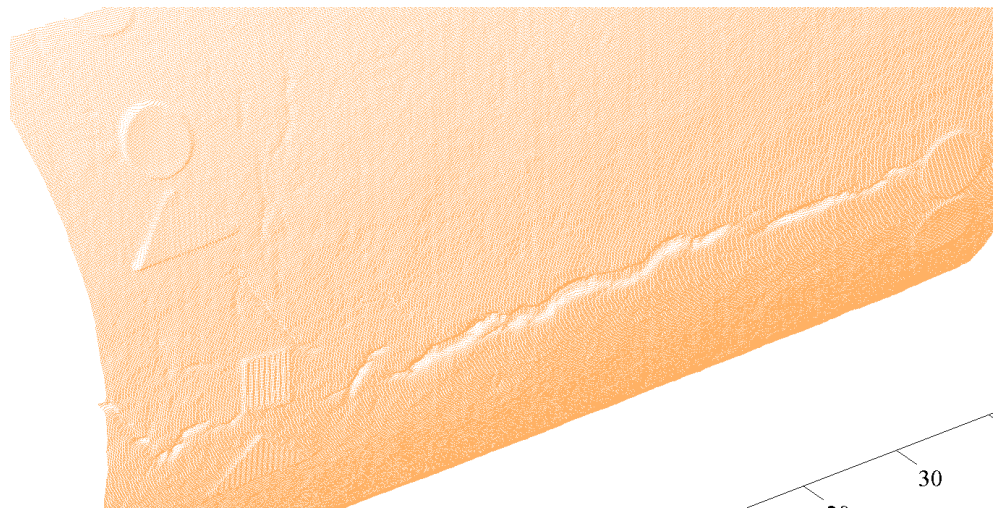
(b)

Fuente. Autor

De este modo, al conocer la fase de la imagen es posible recuperar las coordenadas  $m$  necesarias para calcular la ecuación de cada uno de los planos isofase que se forman con la proyección del sistema de franjas sobre la tubería flexible. Conociendo las coordenadas  $(x_i, y_i)$  de los puntos  $x_i$  en la imagen, y los parámetros intrínsecos de la cámara, se calculan las ecuaciones de las líneas de visión que inician en el centro  $C$  de la cámara, pasan por los puntos  $x_i$  en el plano imagen, y llegan hasta los respectivos puntos  $X_i$  en el espacio tridimensional; al calcular el punto de intersección de la línea de visión con el plano, se encuentran las coordenadas  $(X_c, Y_c, Z_c)$  de cada uno de los puntos  $X_i$  respecto al sistema coordinado de la cámara.

Repitiendo el procedimiento que se ha descrito, para los 5015 puntos que se recuperan de la imagen de fase continua, se obtiene la reconstrucción 3D del objeto representado en una nube de puntos, figura 28.

Figura 28. Reconstrucción 3D de la tubería flexible



Fuente. Autor

### 4.3 CARACTERIZACIÓN DE GRIETAS Y DEFORMACIONES

Para realizar la evaluación técnica de los sistemas de tubería y su capa externa, en primer lugar se realizó una revisión de los diferentes fabricantes de tubería compuesta flexible, para el transporte de hidrocarburo, que en el mercado se encuentran disponibles y de más uso en el mercado Colombiano. Los sistemas de tuberías a estudiar se muestran en la tabla 10.

**4.3.1 Ensayos experimentales.** La evaluación técnica de los sistemas de tubería contempla la revisión y análisis de la información obtenida en la investigación, en lo referente a la caracterización de tubería flexible con refuerzo no metálico, obtención de muestras con daño superficial simulado y aplicación de técnicas seleccionadas. Las tres (3) pruebas fisicomecánicas seleccionadas para la evaluación de tubería flexible con refuerzo no metálico se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. Pruebas fisicomecánicas seleccionadas para la presente investigación

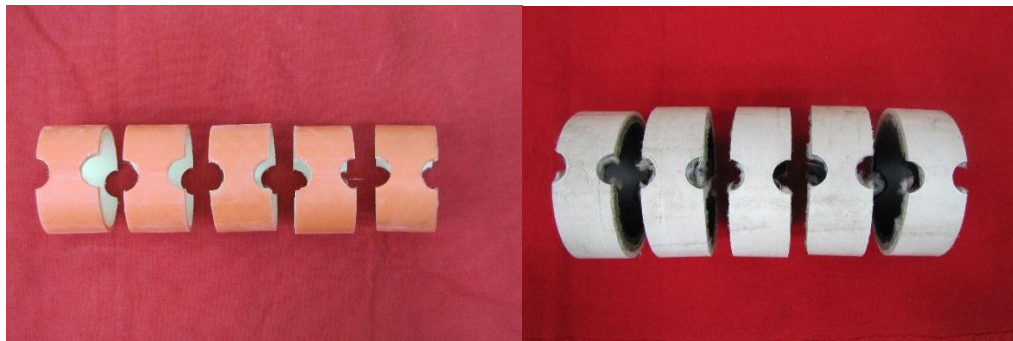
Prueba	Designación y nombre de la norma	Resumen	Aspectos técnicos / económicos	Disponibilidad para efectuar el ensayo
<b>Determinación de dimensiones</b>	<b>ASTM: D3567 - 97 (Reapproved 2011)</b> Standard Practice for Determining Dimensions of "Fiberglass" (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting Resin) Pipe and Fittings. <sup>[45]</sup>	Esta prueba determina las dimensiones físicas de tuberías termoplásticas reforzadas destinadas para el transporte de fluidos. Se incluyen procedimientos y cálculos pertinentes para medir las dimensiones y posterior cuantificación de las mismas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bajo costo.</li> <li>▪ Fácil y rápido manejo de los instrumentos de medición.</li> </ul>	<b>DISPONIBLE</b>
<b>Dureza</b>	<b>ASTM D2240-05 (Reapproved 2010).</b> Standard Test Method for	Esta prueba permite determinar la dureza por penetración de materiales termoplásticos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Este ensayo debe realizarse mediante durómetro tipo Shore D.</li> </ul>	<b>DISPONIBLE</b>

<b>Resistencia a la tensión por anillo muescado</b>	Rubber Property— Durometer Hardness. <sup>[46]</sup>		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bajo costo</li> <li>▪ Fácil y rápida manipulación del durómetro.</li> </ul>	
	<b>ASTM D2290-12.</b> Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe.  (Procedimiento A) <sup>[47]</sup>	Este ensayo determina la resistencia aparente a la tensión de tuberías plásticas reforzadas por el método de anillo muescado. Es aplicable a probetas tubulares en forma de anillo, ya sean con refuerzo de fibras paralelas, extruidos, o moldeados.		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Este ensayo debe realizarse bajo los lineamientos del procedimiento A, (ensayo para determinar la tensión aparente de plásticos tubulares y plásticos reforzados).</li> <li>▪ Costoso</li> </ul>

Fuente. Jiménez C. R., Vallen A. V. [18]

**4.3.2 Preparación de muestras de tubería flexible.** Con base en los sistemas de tubería seleccionados, se prepararon las respectivas muestras para llevar a cabo la prueba de resistencia a la tensión por anillo muescado, siguiendo los criterios establecidos en la norma ASTM D2290-12 [47]. En la figura 29 se presentan algunas imágenes de las probetas preparadas para cada sistema de tubería flexible.


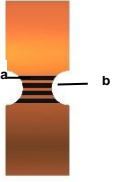
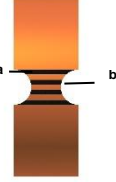
Figura 29. Probetas para prueba ASTM D2290-12



Fuente. Autor

**4.3.2.1 Preparación de muestras con daño superficial simulado.** En esta etapa, se afectaron muestras en su capa externa por medio de rayas según criterios descritos en la norma ASTM D7027-05 [48], la cual, evalúa la resistencia al rayado de recubrimientos poliméricos. Los criterios aplicados a las muestras, según la norma anteriormente mencionada, se pueden observar en la tabla 12. Posteriormente se hizo la caracterización y evaluación física de las muestras afectadas, mediante microscopía cofocal.

Tabla 12. Parámetros utilizados en el rayado de la capa externa de la tubería flexible

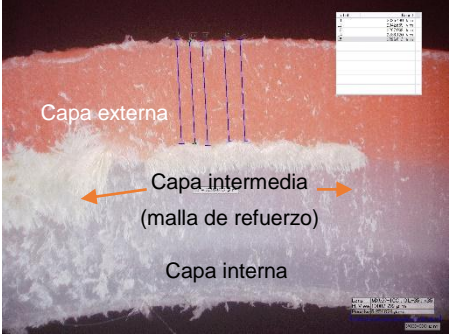
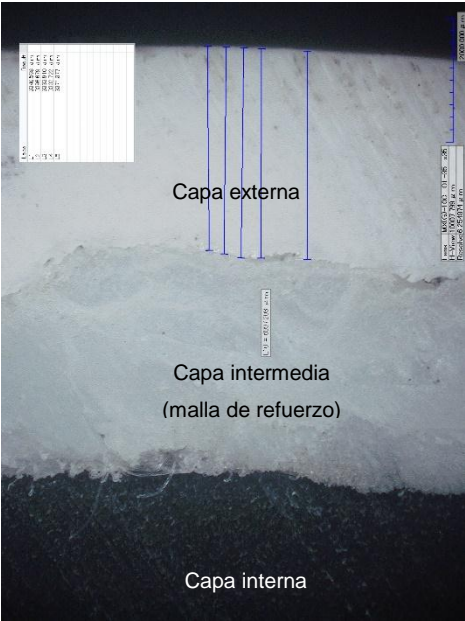
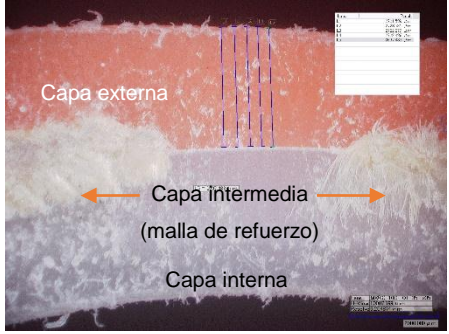
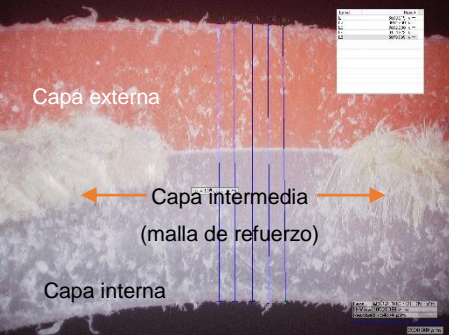
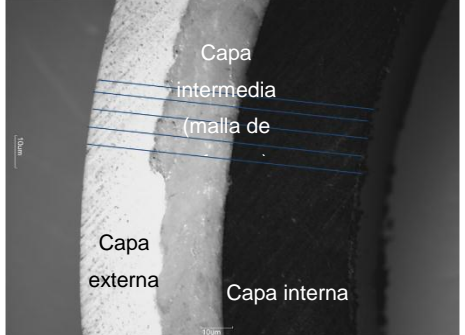
Parámetro	Descripción	
Ancho de la rayadura	0.5 mm	
Densidad de rayaduras	Cuatro (4) por probeta	
Orientación de las rayaduras	Longitudinales	
Ubicación de las rayaduras	<b>Anillo muescado</b>	
	Adyacentes a la curvatura de las muescas (Centradas solamente en una sección reducida). 	
Longitud de las rayaduras	<b>Espaciamiento = 2.0 mm</b>	<b>Espaciamiento = 3.0 mm</b>
	$a = 16.3 \text{ mm}$ $b = 14.2 \text{ mm}$ 	$a = 23.0 \text{ mm}$ $b = 14.5 \text{ mm}$ 
Geometría de la rayadura	Angular	
Material de rayado	Acero rápido aleado con cobalto (High Speed Steel – HSS + 12%Co)	
Velocidad de avance de rayado	20 mm/s	

Fuente. Jiménez C. R., Vallen A. V. [18]

**4.3.3 Análisis de muestras por microscopía confocal.** Se analizaron los cortes transversales de cada sistema de tubería flexible sin afectación de rayas. A partir de las imágenes se obtuvieron los valores promedio de los espesores de la capa externa, y el espesor total de la tubería sobre una probeta de anillo muescado. Estos valores corresponden a la media aritmética de cinco lecturas. En la tabla 13 se presentan las imágenes de los sistemas de tubería con sus respectivas medidas.

En este análisis se puede observar que para el sistema I, se evidenciaron vacíos en la capa de refuerzo, debido a la estructura trenzada y entrecruzada de la malla de refuerzo mostrando vacíos entre capas. Por lo tanto, presentó heterogeneidad en el espesor de la capa externa, así como se observó homogeneidad en el espesor de la capa interna. Para el sistema II, se identificaron tres capas existentes, presentando heterogeneidad en el espesor de la capa externa, en menor cantidad que el sistema I, pese a que en la malla de refuerzo se aprecia un enmallado más compacto, sin vacíos. Se presentó homogeneidad en la capa interna.

Tabla 13. Imágenes de la sección transversal de un anillo muescado

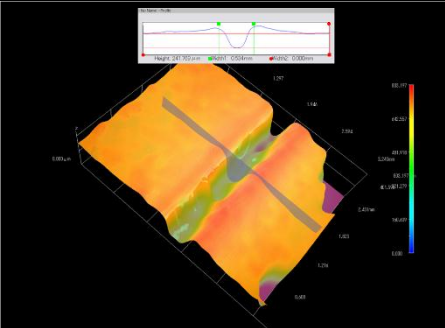
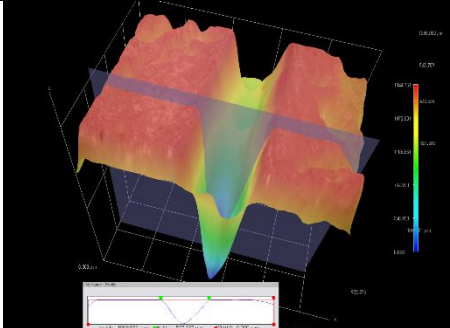
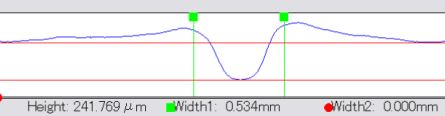
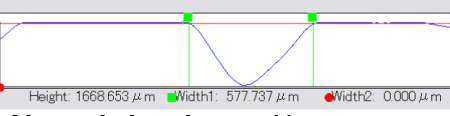
Espesor	Sistema de tubería	
	Sistema I	Sistema II
Espesor capa externa	 <p><b>Capa externa</b> <b>Capa intermedia (malla de refuerzo)</b> <b>Capa interna</b></p> <p><b>Espesor prom. = 2.44 mm (2437.48 <math>\mu\text{m}</math>)</b> <b>Aumento = 35x en campo oscuro.</b></p>	 <p><b>Capa externa</b> <b>Capa intermedia (malla de refuerzo)</b> <b>Capa interna</b></p> <p><b>Espesor prom. = 3.36 mm (3360.25 <math>\mu\text{m}</math>)</b> <b>Aumento = 35x en campo oscuro.</b></p>
	 <p><b>Capa externa</b> <b>Capa intermedia (malla de refuerzo)</b> <b>Capa interna</b></p> <p><b>Espesor prom. = 2.72 mm (2718.50 <math>\mu\text{m}</math>)</b> <b>Aumento = 35x en campo oscuro.</b></p>	
Espesor de pared tricapa	 <p><b>Capa externa</b> <b>Capa intermedia (malla de refuerzo)</b> <b>Capa interna</b></p> <p><b>Espesor prom. = 6.09 mm (6093.58 <math>\mu\text{m}</math>)</b> <b>Aumento = 35x en campo oscuro.</b></p>	 <p><b>Capa intermedia (malla de refuerzo)</b> <b>Capa externa</b> <b>Capa interna</b></p> <p><b>Espesor prom. = 13.03 mm (13032.58 <math>\mu\text{m}</math>)</b> <b>Aumento = 35x en campo normal.</b></p>


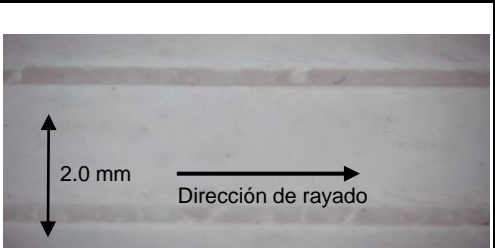

Fuente. Jiménez C. R., Vallen A. V. [18]

**4.3.3.1 Caracterización de tubería afectada por microscopía cofocal.** Se realizó la caracterización microscópica a los sistemas de tubería con la afectación inducida en la capa exterior, por medio del microscopio digital HIROX KH-7700. En las tabla 14 se muestran los resultados del análisis obtenido de la rayas inducidas en cada sistema de tubería.

Se aprecia una notoria decoloración en las zonas de mayor deformación, con mayor desprendimiento de material, es decir, donde se forman los hombros de las rayas. Este fenómeno fue mayor para el sistema I, esto es característico de su rigidez y a la poca recuperación que presenta el material. Para el sistema II, no se evidencia la presencia de hombros, este fenómeno es representativo de materiales dúctiles y con buena capacidad de deformación elástica, debido a las propiedades propias del polietileno de alta densidad que es el material constituyente de la capa exterior.

Tabla 14. Características generales de las rayas inducidas en la superficie

		Sistema de tubería	
		Sistema I	Sistema II
Características generales de las rayaduras	Profundidad	 <p><b>Profundidad aprox. = 0.24 mm</b> (241.769 <math>\mu\text{m}</math>) <b>Aumento = 140x en campo oscuro.</b></p>	 <p><b>Profundidad aprox. = 1.67 mm</b> (1668.653 <math>\mu\text{m}</math>) <b>Aumento = 140x en campo normal.</b></p>
	Altura de hombros y ancho del surco	 <p>Height: 241.769 <math>\mu\text{m}</math> Width1: 0.534mm Width2: 0.000mm <b>Altura de hombros = Pronunciada</b> <b>Ancho del surco = 0.53 mm</b></p>	 <p>Height: 1668.653 <math>\mu\text{m}</math> Width1: 577.737 <math>\mu\text{m}</math> Width2: 0.000 <math>\mu\text{m}</math> <b>Altura de hombros = No se presenta</b> <b>Ancho del surco = 0.58 mm (577.737 <math>\mu\text{m}</math>)</b></p>

Espaciamiento y dirección de rayado	 <p><b>Espaciamiento entre rayaduras = 2.0 mm</b>  <b>Aumento = 70x en campo oscuro.</b>  <b>1. Blanqueamiento en los contornos del surco.</b>  <b>2. Proa (fin del rayado)</b></p>	 <p><b>Espaciamiento entre rayaduras = 2.0 mm</b>  <b>Aumento = 70x en campo normal.</b></p>
	Forma superficial de la rayadura en el fondo del surco	 <p><b>Aumento = 140x en campo oscuro.</b>  <b>1. Marcas de playa en el fondo del surco.</b></p>

Fuente. Autor

#### 4.4 ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS FISICOMECAÑICAS EN MUESTRAS DE TUBERIA FLEXIBLE CON REFUERZO NO METALICO

Para determinar la afectación que sufre la capa externa de la tubería y la influencia en la estructura total de la tubería compuesta flexible se realizaron tres (3) pruebas mecánicas estandarizadas descritas en la tabla 9, que permitieron obtener información sobre las características y propiedades físicas y mecánicas de la tubería flexible con refuerzo no metálico.

4.4.1 Determinación de dimensiones. Siguiendo la Norma ASTM D3567-97 [45], se calculó el diámetro exterior e interior para cada sistema de tubería, así como del espesor de pared tricapa (ver tabla 13). Los resultados de este ensayo se presentan en las tablas 15 y 16.

Para determinar el diámetro exterior se utilizó la ecuación 25.

$$De = C_{De}/\pi \quad (25)$$

Dónde:  $De$ , es el diámetro exterior y,  $C_{De}$ , es la media aritmética del perímetro exterior. A continuación se muestran los cálculos respectivos por sistema de tubería.

Tabla 15. Diámetro exterior por sistema de tubería

Sistema de tubería	
Sistema I	Sistema II
$De = C_{De}/\pi$ $De = 7.47(in)/\pi$  $De = 2.38 (in)$	$De = C_{De}/\pi$ $De = 12.19 (in)/\pi$  $De = 3.88 (in)$

Fuente. Jiménez C. R., Vallen A. V. [18]

Para determinar el diámetro interior se utilizó la ecuación 26.

$$d = De - 2T_a \quad (26)$$

Donde  $d$ , es el diámetro interior,  $De$ , es el diámetro exterior y,  $T_a$ , es el espesor de pared tricapa. A continuación se muestran los cálculos respectivos para cada sistema de tubería.

Tabla 16. Diámetro interior por sistema de tubería

Sistema de tubería			
Sistema I		Sistema II	
Dato	<i>Espesor pared tricapa (<math>T_a</math>)</i> = 6.09 mm (0.24 in)	Dato	<i>Espesor pared tricapa (<math>T_a</math>)</i> = 13.03 mm (0.51 in)
$d = D_e - 2T_a$ $d = 2.38$ (pulgadas) - 2(0.24 (in))  $d = 1.90$ (in)		$d = D_e - 2T_a$ $d = 3.88$ (pulgadas) - 2(0.51 (in))  $d = 2.86$ (in)	

Fuente. Jiménez C. R., Vallen A. V. [18]

Comparando con la información de especificaciones según el manual de los fabricantes de la tubería [9], [49], sobre dimensiones de diámetros externos e internos, se determinó que los resultados obtenidos son acordes con la información suministrada por los fabricantes.

**4.4.2 Ensayo de dureza.** En la superficie de la capa externa de cada sistema de tubería, se realizó la toma de dureza en escala Shore D, bajo condiciones estándar de operación, según los criterios y especificaciones de la Norma ASTM D2240-05 [46]. En la tabla 17, se indican los resultados obtenidos del ensayo para los dos sistemas de tubería en estudio.

Tabla 17. Valores de dureza Shore D.

Condiciones estándar de ensayo											
Carga:44.64 N			Tiempo:25 s			Patrón:45D		Temperatura: 24°C		Humedad: 58 %	
Sistema de tubería											
Sistema I						Sistema II					
Puntos de medida de Dureza (Shore D)					Dureza <sub>prom</sub> (Shore D)	Puntos de medida de Dureza (Shore D)					Dureza <sub>prom</sub> (Shore D)
1	2	3	4	5		1	2	3	4	5	
66.20	70.20	69.20	65.30	66.50	67.48±2.10	56.80	52.10	54.80	61.40	56.50	56.32±3.40

Fuente. Autor

La capa externa correspondiente al sistema de tubería I, es más resistente a la penetración, en comparación con la capa externa del sistema II, esto se debe a la diferencia en el material componente en cada uno de los sistemas, siendo de mayor dureza el Polipropileno (PP) que el Polietileno de Alta Densidad (PEAD). [50]

**4.4.3 Ensayo de resistencia a la tensión por anillo muescado.** Los resultados de la prueba se muestran en la tabla 18, se puede afirmar que los sistemas presentaron un comportamiento mecánico típico de los plásticos reforzados con fibras, siendo este más abrupto en el caso del sistema I (ver figura esfuerzo vs deformación (a) de la tabla 18), en comparación con el sistema II, el cual presentó una deformación mayor (ver figura esfuerzo vs deformación (b) de la tabla 18). El sistema I presentó mayor valor en cuanto al módulo de elasticidad y esfuerzo último a la tensión, en comparación con el sistema II, lo cual está acorde con la constitución tricapa, así como las propiedades mecánicas de los materiales individuales indicadas en el marco teórico (ver tabla 3 del capítulo dos).

Tabla 18. Propiedades mecánicas promedio obtenidas para sistema de tubería no afectada

Sistema de tubería	Propiedades mecánicas			Curvas esfuerzo-deformación
	Deformación Unitaria ( $\epsilon$ )	Módulo de Elasticidad (E) (psi)	Esfuerzo Último a la Tensión (UTS) (psi)	
Sistema I	0.50±0.03	23958.60±1527.84	3658.29±349.97	
Sistema II	1.45±0.18	9045.95±453.56	2896.58±208.20	

Fuente. Autor

En las curvas esfuerzo - deformación se observan tres (3) cambios de dirección en la curvatura después del esfuerzo último a la tensión, siendo más notoria esta

característica en el sistema II. Estos cambios pueden estar asociados al rompimiento de las capas constitutivas del material compuesto, siendo la capa externa la primera que rompe y consecutivamente hasta la capa interna, aunque los materiales que componen cada uno de los sistemas estudiados tienen diferentes valores en sus propiedades, siendo la capa de refuerzo con valores mucho más altos, el rompimiento no sucede en orden descendente de los valores presentados en la tabla 3, en los anexos se evidencia la secuencia de rompimiento de las capas en la tubería flexible (ver anexos A y B).

En las tablas 19, 20, 21 y 22 se aprecian los valores de espaciamiento entre las rayas, profundidad de rayado, las diferentes características mecánicas estudiadas (deformación unitaria ( $\epsilon$ ), módulo de elasticidad ( $E$ ) y esfuerzo último a la tensión (UTS)), las curvas esfuerzo - deformación obtenidas, así como los porcentajes de variación de los valores con respecto a las propiedades mecánicas de la tubería no afectada por rayas.

#### **4.4.3.1 Ensayo de resistencia a la tensión para sistema I de tubería flexible.**

A continuación, en las tablas 19 y 20 se muestran los resultados promedio de las propiedades mecánicas para el sistema de tubería I afectado por rayas inducidas, con espaciamiento de 2.0 y 3.0 mm respectivamente.

Tabla 19. Propiedades mecánicas promedio obtenidas para sistema de tubería I, afectado a 2.0 mm de espaciamento

Variables		Propiedades mecánicas			
Espaciamento entre rayas	Profundidad de las rayas	Deformación Unitaria ( $\epsilon$ )	Módulo de Elasticidad (E) (psi)	Esfuerzo Último a la Tensión (UTS) (psi)	
		2.0 mm			
10% (0.24 mm)		0.48±0.02	24922.61±1818.79	3605.15±17.42	
		% variación respecto a tubería nueva			
		4.00% (-)*	4.02% (+)*	1.45% (-)*	
50% (1.22 mm)		0.46±0.05	25072.94±2514.17	3117.20±127.20	
		% variación respecto a tubería nueva			
		6.12% (-)*	4.65% (+)*	14.79% (-)*	

**Curvas esfuerzo-deformación**

\*(+): Aumento de la propiedad; \*(-): Disminución de la propiedad.

Fuente: Autor

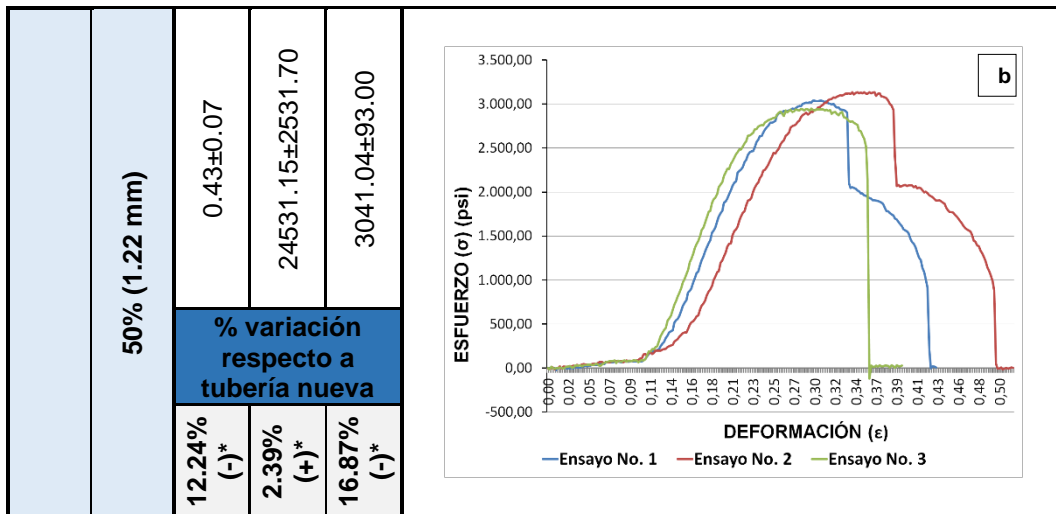
La profundidad en las rayas al 10% y 50% de la capa externa, para un espaciamiento entre estas de 2.0 mm afectó los resultados obtenidos, de manera, en que disminuyeron la deformación unitaria y el esfuerzo último a la tensión, aunque se mantienen dentro del grado de incertidumbre del ensayo. Por el contrario, se presentó un aumento en los resultados para el módulo de elasticidad, de igual manera está en el rango de incertidumbre pero la variación es mucho menor lo que nos muestra que permanece constante durante la prueba. Estas variaciones negativas fueron mayores para el 50% de profundidad en las rayas.

Tabla 20. Propiedades mecánicas promedio obtenidas para sistema de tubería I, afectado a 3.0 mm de espaciamiento

Variables		Propiedades mecánicas		
Espaciamiento entre rayas	Profundidad de las rayas	Deformación Unitaria ( $\epsilon$ )	Módulo de Elasticidad (E) (psi)	Esfuerzo Último a la Tensión (UTS) (psi)
3.0 mm	10% (0.24 mm)	0.47±0.06	26734.07±1025.35	3616.66±175.45
		% variación respecto a tubería nueva		
		4.08% (-)*	11.58% (+)*	1.14% (-)*

**Curvas esfuerzo-deformación**

El gráfico muestra tres curvas de esfuerzo-deformación (σ vs ε) para tres ensayos diferentes (No. 1, 2, 3). El eje vertical (Esfuerzo) va de -500,00 a 4.000,00 psi. El eje horizontal (Deformación) va de 0,00 a 0,54. Las curvas corresponden a: Ensayo No. 1 (línea azul), Ensayo No. 2 (línea roja) y Ensayo No. 3 (línea verde). Todas las curvas muestran un comportamiento elástico-plástico, con un punto de máxima tensión (UTS) que ocurre entre 0,30 y 0,40 de deformación. El Ensayo No. 3 alcanza el mayor esfuerzo máximo, seguido por el Ensayo No. 2 y luego el Ensayo No. 1.



**\*(+):** Aumento de la propiedad; **\*(-):** Disminución de la propiedad.

Fuente. Autor

Para una distancia entre rayas de 3.0 mm y con profundidades de rayado en 10% y 50% de la capa externa, los resultados mostraron una disminución de la deformación unitaria y el esfuerzo último a la tensión, siendo más significativa la variación para el 50%, manteniéndose dentro del rango de incertidumbre del ensayo.

Por otra parte el módulo de elasticidad aumentó en los dos casos, siendo más significativo el aumento para la profundidad al 10%. Los resultados presentados están dentro del rango de incertidumbre, se pueden valorar como constantes, pero requieren de un análisis más profundo ya que no podemos asociar este aumento a un comportamiento común en polímeros o al cambio de la rigidez en el material.

Por otra parte, la variación del espaciamiento entre rayas de 2.0 mm a 3.0mm, modificó levemente las características mecánicas medidas, manteniéndose dentro del rango de incertidumbre del ensayo, mostrando menor influencia el espaciamiento entre rayas, comparado con la profundidad de las rayas, la profundidad del rayado a 50% en la tercera capa tiene variaciones negativas mayores sobre el esfuerzo ultimo a la tensión y la deformación unitaria.

#### 4.4.3.2 Ensayo de resistencia a la tensión para sistema II de tubería flexible.

En las tablas 21 y 22 se muestran los resultados promedio de las propiedades mecánicas para el sistema de tubería II afectado por rayas inducidas, con espaciamento a 2.0 y 3.0 mm respectivamente.

Tabla 21. Propiedades mecánicas promedio obtenidas para sistema de tubería II, afectado a 2.0 mm de espaciamento

Variables		Propiedades mecánicas			Curvas esfuerzo-deformación
Espaciamento entre rayaduras	Profundidad de la rayadura	Deformación Unitaria ( $\epsilon$ )	Módulo de Elasticidad (E) (psi)	Esfuerzo Último a la Tensión (UTS) (nsi)	
2.0 mm	10% (0.34 mm)	1.08±0.14	8946.39±356.46	2781.09±209.79	
		% variación respecto a tubería nueva			
	52 %	1.1 %	0% (-)*	3.9 % (-)*	
	13.79 % (+)*	0.26% (-)*	13.86 % (-)*		
2.0 mm	50% (1.68 mm)	25±0.04	9022.26±279.12	2495.03±81.21	
		% variación respecto a tubería nueva			
	13.79 % (+)*	0.26% (-)*	13.86 % (-)*		
	13.79 % (+)*	0.26% (-)*	13.86 % (-)*		

\*(+): Aumento de la propiedad; \*(-): Disminución de la propiedad.

Fuente. Autor

La profundidad en las rayas al 10% y 50% de la capa externa, con distancia entre ellas de 2.0 mm, mostró una disminución más significativa para la deformación unitaria y el esfuerzo último a la tensión y un módulo de elasticidad que permanece constante.

Tabla 22. Propiedades mecánicas promedio obtenidas para sistema de tubería II, afectado a 3.0 mm de espaciamento

Variables		Propiedades mecánicas			Curvas esfuerzo-deformación
Profundidad de la rayadura	Distancia entre rayaduras	Deformación Unitaria	Módulo de Elasticidad	Esfuerzo a la Tensión	
3.0 mm	10% (0.34 mm)	1.12±0.18	9500.81±336.22	2600.18±445.22	
		% variación respecto a tubería nueva			
		22.76% (-)*	5.03% (+)*	10.23% (-)*	
	50% (1.68 mm)	1.07±0.10	9195.65±426.83	2174.20±316.25	
		% variación respecto a tubería nueva			
		26.21% (-)*	1.65% (+)*	24.94% (-)*	

\*(+): Aumento de la propiedad; \*(-): Disminución de la propiedad.

Fuente. Autor.

Para una distancia entre rayas de 3.0 mm y con profundidades del 10% y 50% de la capa externa, los resultados de la deformación unitaria y el esfuerzo último a la tensión disminuyeron significativamente, con respecto a la tubería no afectada, el esfuerzo último a la tensión para 10% y 3.0 mm se mantiene dentro del rango de incertidumbre. Los resultados obtenidos para el módulo de elasticidad nos muestran un comportamiento constante.

Estos resultados se presentaron debido al mayor daño ocasionado en el material, por la profundidad de las rayas, siendo la variable de espaciamiento entre rayas poco relevante en la variación de las propiedades mecánicas, comparado con la profundidad de las rayas, la profundidad del rayado en la tercera capa tiene mayor influencia sobre el esfuerzo último a la tensión. Este comportamiento es semejante entre ambos sistemas de tubería flexible estudiado, encontrando que el módulo de elasticidad permanece constante, la profundidad de las rayas en la última capa es la variable que mayor afectación hace a la tubería flexible con refuerzo no metálico.

La variación de las propiedades se puede comprobar en el ensayo de tensión, debido a la disminución del tiempo de ruptura de las muestras, en el sistema I se presentó una disminución de tiempo de ruptura del 40%, con respecto a la tubería sin afectar, para una profundidad del 50% de la capa externa; para el sistema II, la disminución del tiempo fue del 18%, con respecto a la tubería sin afectar, para una profundidad del 50% de la capa externa. Estos resultados comprueban la afectación de las rayas a la capa externa que se reflejaría en la disminución de la vida útil de la tubería flexible. Se puede observar en los anexos A y B la secuencia del ensayo.

En la tabla 23 de comparación de los sistemas con las propiedades analizadas se podrá evidenciar los porcentajes de variación del ensayo.

Tabla 23. Propiedades mecánicas para los sistemas analizados.

PROPIEDADES MECÁNICAS	AFECTACIÓN	SISTEMA 1	%	SISTEMA 2	%
Deformación Unitaria ( $\xi$ )	Tubería NO afectada	0.50±0.03		1.45±0.18	
Módulo de elasticidad (E)		23958.60±1527.84		9045.95±453.56	
Esfuerzo último a la tensión		3658.29±349.97		2896.58±208.20	
Deformación Unitaria ( $\xi$ )	2.0 mm - 10% p.	0.48±0.02	- 4	1.08±0.14	-25,52
Módulo de elasticidad (E)		24922.61±1818.79	+ 4,02	8946.39±356.46	-1,1
Esfuerzo último a la tensión		3605.15±17.42	- 1,45	2781.09±209.79	-3,99
Deformación Unitaria ( $\xi$ )	2.0 mm - 50% p.	0.46±0.05	- 6,12	1.25±0.04	-13,79
Módulo de elasticidad (E)		25072.94±2514.17	+ 4,65	9022.26±279.12	-0,26
Esfuerzo último a la tensión		3117.20±127.20	14,79	2495.03±81.21	-13,86
Deformación Unitaria ( $\xi$ )	3.0 mm - 10% p.	0.47±0.06	- 4,08	1.12±0.18	-22,76
Módulo de elasticidad (E)		26734.07±1025.35	+11,58	9500.81±336.22	5,03
Esfuerzo último a la tensión		3616.66±175.45	- 1,14	2600.18±445.22	-10,23
Deformación Unitaria ( $\xi$ )	3.0 mm - 50% p.	0.43±0.07	12,24	1.07±0.10	-26,21
Módulo de elasticidad (E)		24531.15±2531.70	+ 2,39	9195.65±426.83	1,65
Esfuerzo último a la tensión		3041.04±93.00	16,87	2174.20±316.25	-24,94

Fuente. Autor.

#### 4.5 RECONSTRUCCIÓN 3D DE TUBERÍA FLEXIBLE A 360° GRADOS DE OBSERVACIÓN

Esta técnica de reconstrucción 3D muestra cómo se puede extraer información 3D de la superficie de la tubería flexible usando un video proyector y una cámara. Este tipo de sistemas sólo permite reconstruir las secciones de la tubería donde las franjas son iluminadas y capturadas por la cámara. Uno de los objetivos específicos de la presente investigación es la reconstrucción de la superficie de la tubería flexible a partir de la captura de varias imágenes a 360<sup>0</sup> grados de observación, utilizando una sola *unidad de proyección-adquisición*.

La técnica consiste en usar un sistema de proyección-adquisición de manera que tome la imagen de una parte de la superficie de la tubería flexible con alta resolución y continuar adquiriendo imágenes de la superficie de la tubería en diferentes secciones angulares. La unificación de las secciones permite obtener una imagen completa de la tubería flexible.

Cada reconstrucción tiene su sistema coordenado independiente y corresponde al sistema coordenado de la cámara. Con el fin de unificar las nubes de datos en un único sistema coordenado, se debe aplicar a una nube de datos una transformación rígida, conformada por una matriz de rotación y un vector de translación, ecuación 27. Esta transformación se aplica a una nube de datos de las imágenes adquiridas para convertirlas en un único sistema coordenado de la cámara.

$$X' = RX + t \quad (27)$$

$X'$  y  $X$  corresponden a las dos nubes de datos consecutivas, obtenidas al rotar la tubería.  $R$  la matriz rotación y  $t$  el vector traslación, se utiliza una estrategia que consiste en emplear un objeto de control compuesto por figuras geométricas adheridas a la superficie. En la figura 30 se observan las imágenes adquiridas con el modelo propuesto.

Figura 30. Figuras de Control sobre superficie de tubería flexible



Fuente. Autor.

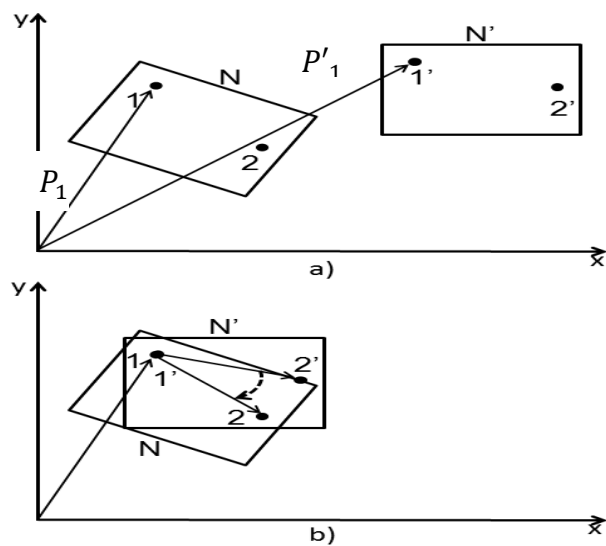
El objetivo consiste en realizar la reconstrucción 3D del objeto con las figuras geométricas. De esta manera, la nube de datos 3D se puede segmentar en puntos que pertenecen al objeto y puntos que pertenecen a las figuras. De igual forma las figuras son fácilmente identificables, lo cual implica que se pueden identificar y calcular los centroides de cada una. La rotación de la tubería se realiza de tal manera que se logren identificar al menos tres figuras geométricas no lineales en las tres secciones consecutivas.

Para calcular  $R$  y  $t$  se plantean que conociendo las coordenadas del centroide de una figura en el sistema coordenado de la cámara ( $X'$ ,  $Y'$ ,  $Z'$ ) y conociendo las coordenadas del centroide de la misma figura en el sistema coordenado siguiente ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ), cómo aplicar  $R$  y  $t$  a ( $X, Y, Z$ ) para obtener unas nuevas coordenadas que coincidan con ( $X'$ ,  $Y'$ ,  $Z'$ ).

El problema planteado puede resolverse usando una estrategia de optimización en términos de mínimos cuadrados, ya que hay bastante información 3D con puntos correspondientes o emplearse una estrategia geométrica usando solamente tres figuras geométricas no colineales. La Figura 31 muestra la idea

empleada pero para el caso 2D con el fin de facilitar la comprensión. Los puntos  $1$  y  $2$  son los centroides de dos figuras y los puntos  $1'$  y  $2'$  son puntos correspondientes en la siguiente sección de datos. A la nube de datos  $N'$  se aplica la translación dada por  $t = P_1 - P'_1$ . Posteriormente se calcula la rotación de  $2'$  a  $2$ , ya que el ángulo  $\theta$  se puede calcular.

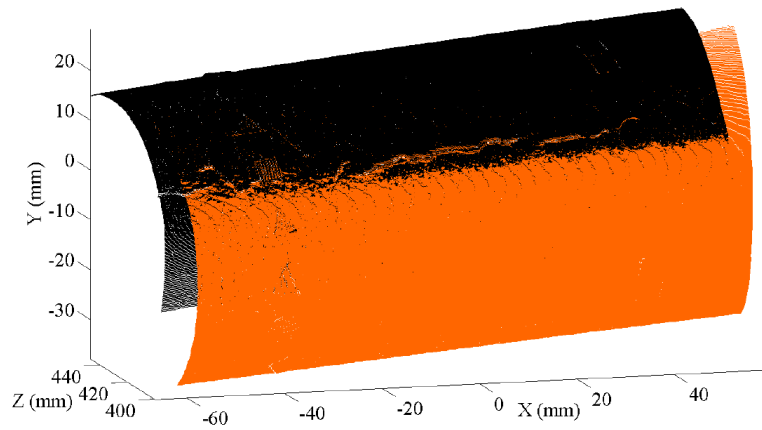
Figura 31. (a) Translación y (b) Rotación de los planos



Fuente. Carreño, J.E., Salazar, G. [43]

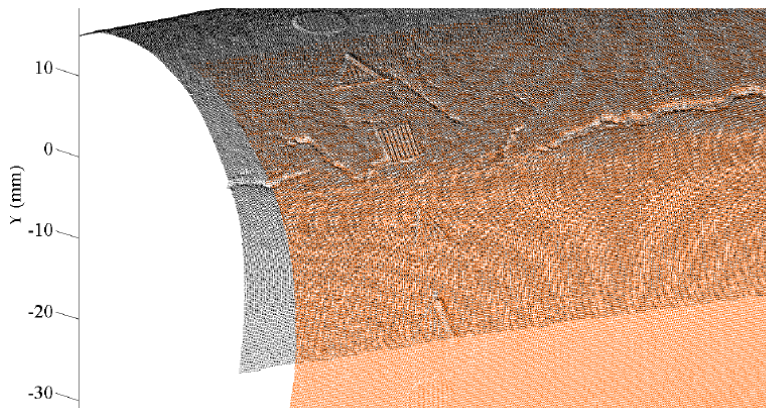
Para el caso de la tubería flexible ubicada en el espacio 3D, se utilizaron 4 figuras no colineales. El procedimiento se repite para varias combinaciones de figuras y se promedia los valores  $R$  y  $t$ . La figura 32 muestra las dos nubes de datos iniciales del objeto de control y la figura 33 muestra las nubes unificadas.

Figura 32. Reconstrucción 3D del objeto de control en único plano coordenado



Fuente. Autor

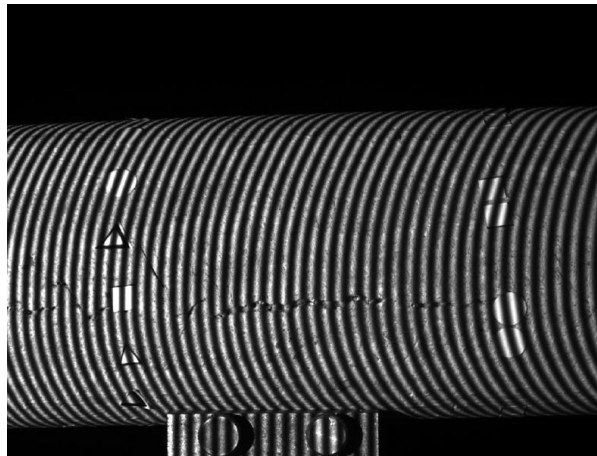
Figura 33. Reconstrucción 3D del objeto de control aplicando matriz de rotación y vector de translación



Fuente. Autor

Se procede a realizar la reconstrucción 3D completa de la tubería flexible. La figura 34 muestra los sistemas de franjas adquiridos para cada sección de tubería flexible de las cuales se obtiene su respectiva nube de datos.

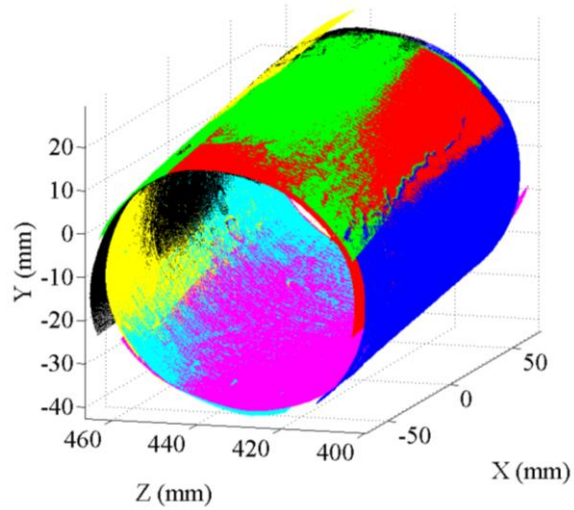
Figura 34. Adquisición de imágenes por técnica de proyección de franjas



Fuente. Autor

Utilizando la matriz de rotación y el vector de translación se genera la nube de datos que da como resultado la reconstrucción 3D de la tubería flexible como se muestra en la figura 35.

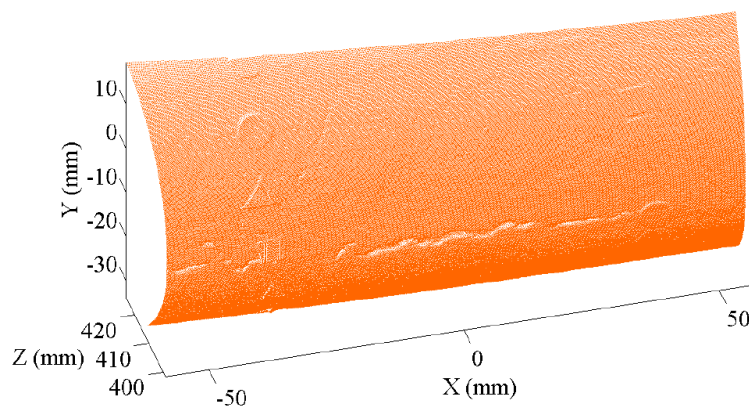
Figura 35. Reconstrucción 3D de la tubería flexible



Fuente. Autor

En la Figura 36 se muestra la reconstrucción 3D de una sección de la superficie de la tubería, en esta reconstrucción se puede apreciar una grieta en la superficie, para este caso la falla es originada por el deterioro ocasionado en la exposición al medio ambiente, esta degradación del material es a causa de los rayos UV a la cual estuvo expuesta la tubería.

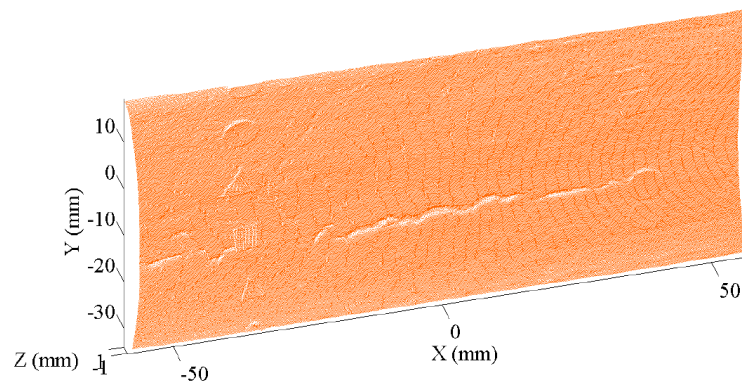
Figura 36. Reconstrucción 3D de la superficie con grieta en la capa externa



Fuente. Autor

Con el propósito de extraer información topográfica, cuantificar la longitud de una región de la grieta, su profundidad máxima y su profundidad promedio, para las fallas presentes en la superficie de la tubería se realiza un procesamiento que permite eliminar la curvatura promedio de la sección reconstruida, el resultado de tal procesamiento se muestra en la figura 37.

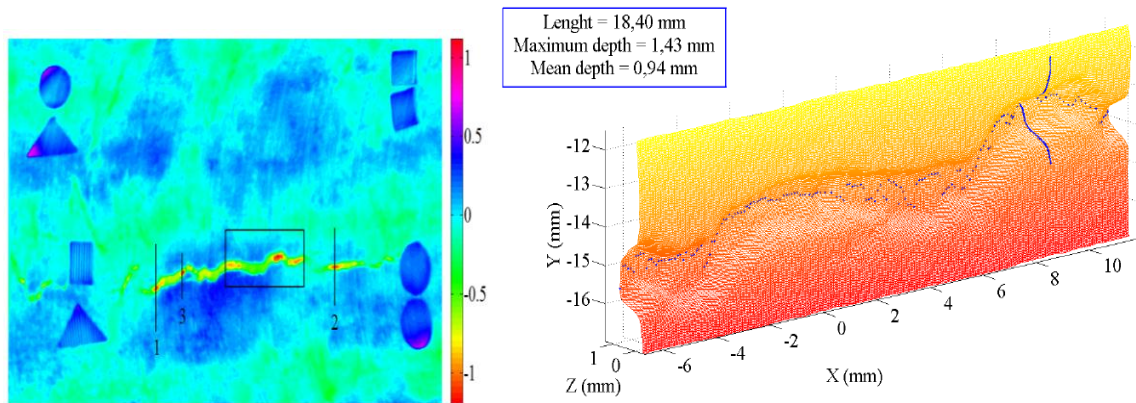
Figura 37. Superficie de tubería flexible, después de eliminar la curvatura



Fuente. Autor

La reconstrucción de una sección de la grieta y las características mencionadas anteriormente, indican que las afectaciones que fueron inducidas en las tuberías y analizadas en el párrafo 4.4.3 *Ensayo de resistencia a la tensión por anillo muescado*, pueden ser reconstruidas tridimensionalmente ya que la raya inducida de menor profundidad para el sistema 1 de 0.24 mm (10% de profundidad de la última capa) está superando las 100  $\mu\text{m}$  de resolución que el sistema implementado puede reconstruir, en la imagen de la figura 38 se observa la reconstrucción de una grieta comúnmente presente en este tipo de tubería flexible con una profundidad máxima de 1.43 mm mucho mayor que la profundidad inducida de 1.22 mm (50% de profundidad de la última capa) analizada anteriormente que es causal de las variaciones de negativas en las propiedades de deformación unitaria y esfuerzo último a la tensión.

Figura 38. Reconstrucción de grieta presente en superficie de la tubería flexible



Fuente. Autor

**4.5.1 Validación metrológica del proceso de calibración de una unidad de proyección-adquisición.** Para validar la resolución métrica y el margen de error (inducido por los parámetros de calibración) de la unidad de proyección-adquisición que se ha utilizado para reconstruir la tubería flexible, se toman imágenes de un objeto en diferentes posiciones  $\Delta Z$  conocidas, conservando su posición en el plano  $XY$ . Para desplazar el objeto se usa un tornillo micrométrico de **10  $\mu m$**  de resolución y **10 cm** de recorrido lineal. Al ubicar las reconstrucciones del objeto en un mismo sistema coordenado, la separación entre cada una debe coincidir con los desplazamientos teóricos que se han introducido experimentalmente.

En primer lugar, se usó una lámina de acrílico blanco de dimensiones 30 cm  $\times$  30 cm  $\times$  0,5 cm; un objeto aparentemente plano. En la figura 39, se muestra el plano ubicado en la unidad de desplazamiento micrométrico.

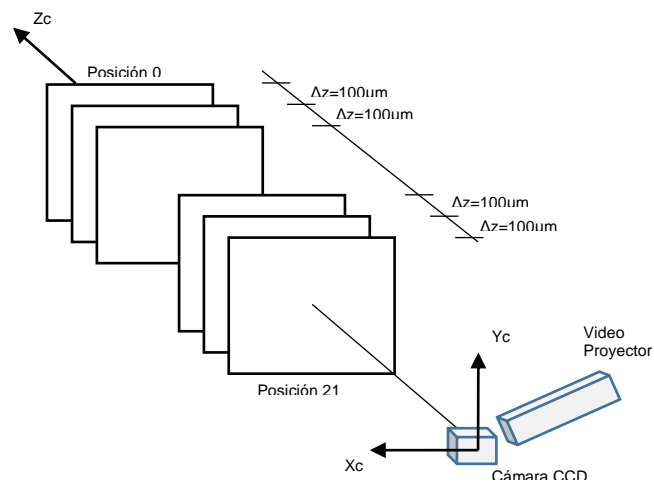
Figura 39. Unidad de desplazamiento y objeto plano



Fuente. Autor.

Se adquirieron imágenes del plano ubicado en 21 posiciones diferentes, cada una con un  $\Delta Z = 100 \mu m$  respecto a la anterior, figura 40. Para cada posición se proyectan franjas, se calcula la fase y se obtienen sus respectivas nubes 3D.

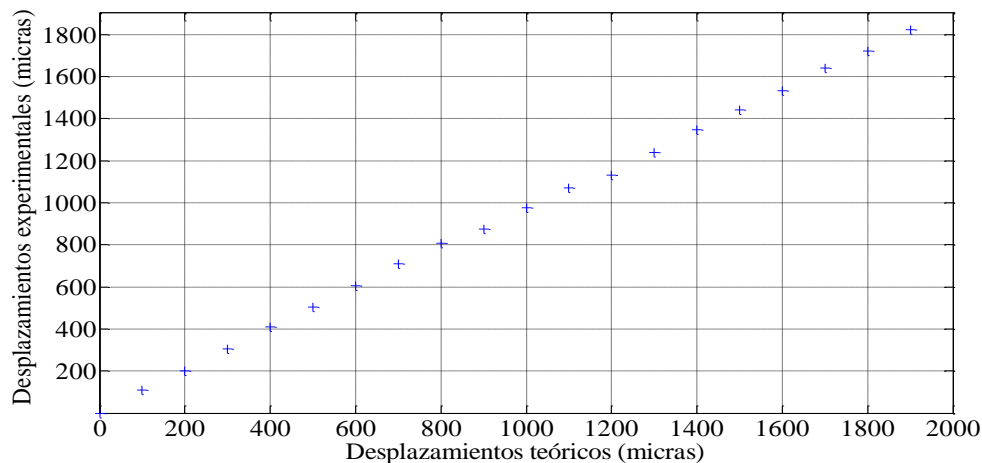
Figura 40. Desplazamiento del plano en el eje  $Z$  a intervalos  $\Delta Z = 100 \mu m$



Fuente. Autor

Para verificar que el desplazamiento fue lineal en el eje  $Z$  y que las reconstrucciones del plano son paralelas entre ellas, se calcula la normal del punto medio de cada uno de los planos reconstruidos y se mide el ángulo que forma cada una con la normal del plano anterior. Al tener 21 reconstrucciones en posiciones diferentes, se tienen 20 medidas, el ángulo más grande entre dos de las normales de las reconstrucciones 3D tiene un valor de  $0,060^\circ$ ; por lo anterior se puede decir que el desplazamiento del plano fue lineal y que las reconstrucciones 3D son paralelas entre sí. Posteriormente, se procedió a medir la separación entre las normales que debe coincidir con el  $\Delta Z = 100\mu m (\pm 4,67 \mu m)$  del desplazamiento introducido manualmente entre cada posición este desplazamiento se puede observar de manera gráfica en la figura 41.

Figura 41. Desplazamientos experimentales contra desplazamientos teóricos



Fuente. Autor

Experimentalmente se ha encontrado que un sistema de reconstrucción 3D por proyección de franjas, para un cuerpo de  $40\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ , tiene una resolución aproximada de  $100\mu m$ . Los resultados obtenidos indican que el error que se comete en la calibración del sistema es inferior o igual al error del método de reconstrucción 3D.

## 5. CONCLUSIONES

Para llevar a cabo la investigación fue importante conocer acerca de la defectología que comúnmente se presenta en la tubería compuesta flexible con el fin de identificar, clasificar y establecer, que tipo de fallas son las que pueden afectar la capacidad de contención de fluido de la tubería. En esta investigación se demostró mediante la búsqueda bibliográfica que las afectaciones en la capa externa de la tubería son las más comunes en los campos de producción donde se utiliza este tipo de tubería, por lo tanto esta investigación se basó en este tipo de falla para poder ser identificada.

Los resultados obtenidos en las curvas esfuerzo deformación, evidenciaron tres cambio de pendiente en la curva, esto se debe a la ruptura progresiva de las capas constituyentes de la tubería flexible. Se comprobó mediante el seguimiento fotográfico que se hizo a la prueba de tensión en donde se observa claramente el orden de rompimiento de la tubería desde la capa externa hasta la capa interna. Aunque los valores de las propiedades mecánicas de los materiales constituyentes de cada sistema son diferentes no se presenta el rompimiento desde el de menor resistencia al de mayor resistencia según los valores teóricos, sino que ocurre el rompimiento como se describió anteriormente.

Los resultados indican que la variación de las propiedades mecánicas de los sistemas de tubería, depende de cómo la capa externa está afectada. Se pudo comprobar que la separación entre las rayas no tiene una afectación relevante en la variación de las propiedades mecánicas, aunque para la mayoría de propiedades mecánicas analizadas se mantienen dentro del rango de incertidumbre de la prueba, la mayor afectación se presentó en el esfuerzo último a la tensión, esta afectación se debe especialmente a la profundidad de las rayas en la capa externa de la tubería flexible con refuerzo no metálico.

Se comprobó que la capa externa constituyente de los sistemas de tubería, cumple el papel de capa protectora y de soporte estructural para la tubería flexible con refuerzo no metálico, es necesario realizar otro tipo de ensayos para corroborar los resultados de la investigación, como la prueba de presión hidrostática a corto plazo ASTM D1599-99 (Reapproved 2011); esto contradice a fabricantes de este tipo de tubería con respecto a la importancia de la capa externa.

Se diseñó un sistema óptico a nivel de laboratorio, empleando la técnica de proyección de franjas y se validó su capacidad de reconstrucción tridimensional de zonas con deterioro sobre la superficie externa de tubería flexible. El dispositivo permitió caracterizar las grietas y deformaciones a partir de las imágenes 3D con una resolución de 100  $\mu\text{m}$  y un campo de observación de 40cm\*40cm.

Se implementó una técnica que permitió que el sistema pueda analizar con más detalle el contorno circular de la superficie de la tubería flexible, que realiza medidas de profundidad en las grietas y en las deformaciones pérdidas de contorno, con alta precisión, alta resolución y a 360° grados de observación. Aunque algunos errores propios de la técnica de corrimiento de fase fueron corregidos para la digitalización de las imágenes de la tubería, se presentaron algunos errores residuales en las reconstrucciones tridimensionales, probablemente al contorno circular de la tubería o a la reflectividad de la superficie.

Se implementó una técnica de unificación de sistemas coordenados a partir de un procedimiento geométrico básico, para empalme de dos imágenes consecutivas, dando la posibilidad de llevar esta técnica a un manejo en campo y cubrir un área de inspección mucho mayor que el referenciado en laboratorio.

La implementación de la técnica de proyección de franjas como prueba no destructiva para la inspección de tubería no metálica, es posible ya que se determinó que con una resolución de 100  $\mu\text{m}$  se tiene la capacidad de reconstrucción 3D de las diferentes rayas generadas en esta investigación en la capa externa de la tubería flexible.

## BIBLIOGRAFÍA

- Arciniegas J. (2011), Instalacion de tuberias no metalicas en lineas de superficie en los pozos del campo la cira-infantas., XI Congreso Nacional de Corrosión.
- Besl, P., & McKay, N. (1992). A method for registration of 3D shapes. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, p.239-256.
- Boehler, W., Boehm, K., Heinz, G., Justus, A., Schwarz, C. and Siebold, M., (2003), Documentation of Stone Age artifacts. The ISPRS International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 34, Part 5, p.506-510.
- CALLISTER, W. (1995), Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Ed. Reverte, 3 ed. Vol. II, p. 556-558.
- Carreño, J.E., Salazar, G. (2014)., Modelo funcional óptico para la extracción de información topográfica del rostro, Trabajo de Grado, Universidad Industrial de Santander.
- Chu, T, Suchin P. (2006), NDE of RCC using digitome volumetric X-ray image system, SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics.
- Dalmoden, B. (2006), Reinforced Thermoplastic Pipeline (RTP) Systems. For. 23rd World Gas Conference.
- Domínguez C. (2009), Estudio del Proceso de Crecimiento Lento de Grieta en el Polietileno de Alta Densidad para su aplicación en Tubería, Tesis Ph.D., Universidad de Valencia, . P. 47-48.
- Duarte, G. I., & Manrique, M. A. (2012), Guía recomendada para selección y uso de tuberías de materiales compuestos para aplicación en líneas de flujo de la VPR - ECOPETROL S.A.
- Farshad M. (2006), Plastic Pipe Systems: Failure investigation and diagnosis, Elsevier Science Technology.
- Farshad, M. (2004), Two new criteria for the service life prediction of plastics pipes, Polymer testing, Vol. 23, p. 967-972.

González, A. L., Ballesteros, A., Meneses, J., & León, J. (2013). Método para la extracción de puntos de control en la calibración de una cámara basado en la estimación de la fase de un patrón de puntos codificado. ITECKNE, p. 7-15.

GONZÁLEZ, A.L. (2014), Reconstrucción 3D del torso humano a 360° de observación mediante la técnica de proyección de franjas, Trabajo de postgrado, Universidad Autónoma de Bucaramanga, p. 19-59.

Hartley, R., & Zisserman, A. (2004). Multiple View Geometry in Computer Vision. New York: Cambridge University Press.

Hogert, E.N., Landau, M.R., Ruiz M.F., Aparicio, R., Gaggioli, N.G. (2002), Un nuevo método óptico de END para analizar superficies erosionadas, Laboratorio de Óptica y Laser, p. 1-6.

Hogert, E.N., Landau, M.R., Ruiz, M.F., Aparicio, R. and Gaggioli, N.G. (2002), Un nuevo método óptico de END para analizar superficies erosionadas, Laboratorio de Óptica y Laser, p. 1-6.

[http://www.fiberspar.com/sites/default/files/FibersparPresentation\\_October2012-US.pdf](http://www.fiberspar.com/sites/default/files/FibersparPresentation_October2012-US.pdf). > [Citado el 13 agosto de 2013].

[http://www.innovmetric.com/polyworks/3D-scanners/me\\_non-contact.aspx?p=4&lang=en](http://www.innovmetric.com/polyworks/3D-scanners/me_non-contact.aspx?p=4&lang=en) > [citado el 21 de enero de 2014].

Huthwaite, P., Ribichini, R., Cawley, P., Lowe, M.J.S., (2013), Mode selection for corrosion detection in pipes and vessels via guided wave tomography, IEEE Transactions on vol. 60, p.1165-1177.

Jiménez C. R., Vallen A. V. (2014), Estudio del efecto de los daños superficiales generados en tubería compuesta flexible con refuerzo no metálico para el transporte de hidrocarburos, Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander, p. 8-13, 40-50.

Kaiser H, Karbhari V. M. (2004), 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.

Kalpakjian, S. (2005), Manufactura, Ingeniería y Tecnología, Ed. Pearson Education. 4 ed., p. 242.

Larkin, K., Hibino, K., Oreb, B., & Farrant, I. (1995). Phase shifting for nonsinusoidal waveforms with phase-shift errors. *Optical Society of America*, p. 761-768

Lavigne G., Ezrin M. (2006), Unexpected and unusual failures of polymeric materials, Institute of Material Science, University of Connecticut.

Li H, Mackenzie D. (2006), Characterizing plastic collapse of pipe bend structures, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 83, p.85-95.

Mendoza González, E.Y., (2012), Diseño de una metodología no destructiva para la captura digital y el dimensionamiento en 3d de discontinuidades externas en tuberías de transporte de hidrocarburos, Investigación de Maestría, Universidad Industrial de Santander.

Meneses, J. E. (1998). *Système Optique Pour La Mesure des Dèformations De la Voûte Plantaire Sous Charge Statique*. Franche-Comté: Thèse. L'U.F.R Des Sciences Et Techniques DeL'Université De Franche-Comté.

Neal, S. P., Cepel, R., Palmer, J. D. (2006), Preliminary Study of Ultrasonic Detection of Cracks Through Thick Composite Doublers, *Reserch gate*, Vol 25, p. 16.

NICHOLSON, J.W. "The Chemistry of Polymers", 3rd ed. 2006.

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

\_\_\_\_\_. Norma ASTM D2240-05 (Reapproved 2010). "Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness". ASTM International 2010. DOI: 10.1520/D2240-05R10.

\_\_\_\_\_. Norma ASTM D2290-12., Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe. ASTM International 2012. DOI: 10.1520/D2290-12

\_\_\_\_\_. Norma ASTM D3567-97 (Reapproved 2011), Standard Practice for Determining Dimensions of "Fiberglass" (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting Resin) Pipe and Fittings. ASTM International 2010. DOI: 10.1520/D3567-97R11.

\_\_\_\_\_. Norma ASTM D7027-05., Standard Test Method for Evaluation of Scratch Resistance of Polymeric Coatings and Plastics Using an Instrumented Scratch Machine. ASTM International 2005. DOI: 10.1520/D7027-05E01.

< [http://www.hirox-usa.com/products/microscope/kh7700\\_04.html](http://www.hirox-usa.com/products/microscope/kh7700_04.html) > [citado el 10 de junio de 2014].

[Página Web], Bouguet, J.-Y. Camera Calibration Toolbox for Matlab. <[http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/#examples](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/#examples) > [citado el 10 de octubre de 2010].

[Página Web], Innovmetric Inc., Resolución para diferentes tipos de técnicas de reconstrucción, Canadá, 2014.

[Página Web], KISHNER, I. pskcolombia. <[http://pskcolombia.com.co/PSK\\_2012/PSK\\_RECURSOS\\_files/THERMOFLEXES PANOL \(2011\).pdf](http://pskcolombia.com.co/PSK_2012/PSK_RECURSOS_files/THERMOFLEXES PANOL (2011).pdf) >, [Citado el 3 de febrero de 2013].

[Página Web], Microscopía Cofocal.

[Página Web], EO USB 2.0 CCD Machine vision cameras, <<http://edmundoptics.com/imaging/usb-cameras/eo-usb-2-0-ccd-machine-vision-cameras/3049>>. [Citado el 23 de febrero de 2014].

[Página Web], Fiberspar Corporation, Line pipe engineering guide Fiberspar, 2012.

Peacock A.J. (2000), Handbook of polyethylene. Structures, properties and applications, Ed. Marcel Dekker, Inc., p. 241-242.

Pérez Z.M., Meneses J. (2006), Aproximación espacio-temporal para la medida absoluta de la forma 3D de un objeto por proyección de franjas, Revista de la Sociedad Colombiana de Física, Vol. 38, p.641-644.

Pérez Z.M., Romero L.A. (2004), Sistema óptico de reconstrucción tridimensional para la detección de ampollas en recubrimientos, XI Congreso Latinoamericano de Ingeniería Química.

Raynaud M. (2004), A view of the European plastic pipes market in a global scenario. *Plastics Pipes XII, Session 1, Conference papers 2004, Milan.*

Saldner, H. O., & Huntley, J. M. (1997). Profilometry using temporal phase unwrapping phase unwrapping and a spatial light modulator-based fringe projector. *Optical Engineering*, p.610-615.

Salvi, J. (2001). *Pattern codification strategies in structured light systems.* Girona: Instituto de Informatica, Universidad de Girona.

Scarponi C., Valente M. (2006), 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.

Schwartz M.M. (1997), *Composites materials: properties, non-destructive testing, and repair*, Prentice-hall, Vol. 1, p. 250.

Whale, A., Prause, S., DeJong M., Sonka M., (1999), Geometrically correct 3D reconstruction of intravascular ultrasound images by fusion with biplane, *IEEE Tran Med*, vol 18, p.686-687.

Xianyu, S., & Qican, Z. (2010). Dynamic 3-D shape measurement method: A review. *Optics and Lasers in Engineering*, p.191-204.

Zhang, D., Weide, V.D., Oliver J. (2010), Superfast phase-shifting method for 3D shape measurement, *Opt. Express* 18, p.9684-9689.

Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, p. 1330-1334.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[Página Web], Arroyave C.E., Corrosión: primer consumidor de acero en el mundo., 2013.

- [1] <http://www.ecopetrol.com.co/especiales/RevistaInnova7ed/entrevista.htm> > [citado el 1 de junio de 2013].

- [2] Arciniegas J. (2011), Instalacion de tuberias no metalicas en lineas de superficie en los pozos del campo la cira-infantas., XI Congreso Nacional de Corrosión.

- [3] Farshad M. (2006), Plastic Pipe Systems: Failure investigation and diagnosis, Elsevier Science Technology.

- [4] Lavigne G., Ezrin M. (2006), Unexpected and unusual failures of polymeric materials, Institute of Material Science, University of Connecticut.

- [5] Raynaud M. (2004), A view of the European plastic pipes market in a global scenario. Plastics Pipes XII, Session 1, Conference papers 2004, Milan.

[Página Web], Innovmetric Inc., Resolución para diferentes tipos de técnicas de reconstrucción, Canadá, 2014.

- [6] [http://www.innovmetric.com/polyworks/3D-scanners/me\\_non-contact.aspx?p=4&lang=en](http://www.innovmetric.com/polyworks/3D-scanners/me_non-contact.aspx?p=4&lang=en) > [citado el 21 de enero de 2014].

- [7] Boehler, W., Boehm, K., Heinz, G., Justus, A., Schwarz, C. and Siebold, M., (2003), Documentation of Stone Age artifacts. The ISPRS International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information

Sciences, Vol. 34, Part 5, p.506-510.

[8] Li H, Mackenzie D. (2006), Characterizing plastic collapse of pipe bend structures, International, Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 83, p.85-95.

[9] Dalmoden, B. (2006), Reinforced Thermoplastic Pipeline (RTP) Systems. For. 23<sup>rd</sup> World Gas Conference.

[10] CALLISTER, W. (1995), Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Ed. Reverte, 3 ed. Vol. II, p. 556-558.

Página Web], Fiberspar Corporation, Line pipe engineering guide Fiberspar, 2012.

[11] [http://www.fiberspar.com/sites/default/files/FibersparPresentation\\_October2012-US.pdf](http://www.fiberspar.com/sites/default/files/FibersparPresentation_October2012-US.pdf). > [Citado el 13 agosto de 2013].

[12] Farshad, M. (2004), Two new criteria for the service life prediction of plastics pipes, Polymer testing, Vol. 23, p. 967-972.

[13] Domínguez C. (2009), Estudio del Proceso de Crecimiento Lento de Grieta en el Polietileno de Alta Densidad para su aplicación en Tubería, Tesis Ph.D., Universidad de Valencia, . P. 47-48.

[14] Schwartz M.M. (1997), Composites materials: properties, non-destructive testing, and repair, Prentice-hall, Vol. 1, p. 250.

[15] Duarte, G. I., & Manrique, M. A. (2012), Guía recomendada para selección y uso de tuberías de materiales compuestos para aplicación en líneas de flujo

de la VPR - ECOPEPETROL S.A.

Peacock A.J. (2000), Handbook of polyethylene. Structures, properties and  
[16] applications, Ed. Marcel Dekker, Inc., p. 241-242.

Kalpakjian, S. (2005), Manufactura, Ingeniería y Tecnología, Ed. Pearson  
[17] Education. 4 ed., p. 242.

Jiménez C. R., Vallen A. V. (2014), Estudio del efecto de los daños  
superficiales generados en tubería compuesta flexible con refuerzo no  
[18] metálico para el transporte de hidrocarburos, Tesis de pregrado, Universidad  
Industrial de Santander, p. 8-13, 40-50.

[Página Web], Microscopía Cofocal.  
[19] < [http://www.hirox-usa.com/products/microscope/kh7700\\_04.html](http://www.hirox-usa.com/products/microscope/kh7700_04.html) > [citado el  
10 de junio de 2014].

Hogert, E.N., Landau, M.R., Ruiz M.F., Aparicio, R., Gaggioli, N.G. (2002),  
[20] Un nuevo método óptico de END para analizar superficies erosionadas,  
Laboratorio de Óptica y Laser, p. 1-6.

Xianyu, S., & Qican, Z. (2010). Dynamic 3-D shape measurement method: A  
[21] review. Optics and Lasers in Engineering, p.191-204.

Pérez Z.M., Meneses J. (2006), Aproximación espacio-temporal para la  
[22] medida absoluta de la forma 3D de un objeto por proyección de franjas,  
Revista de la Sociedad Colombiana de Física, Vol. 38, p.641-644.

Besl, P., & McKay, N. (1992). A method for registration of 3D shapes. IEEE  
[23] Transactions on pattern analysis and machine intelligence, p.239-256.

Pérez Z.M., Romero L.A. (2004), Sistema óptico de reconstrucción  
[24] tridimensional para la detección de ampollas en recubrimientos, XI Congreso  
Latinoamericano de Ingeniería Química.

Salvi, J. (2001). Pattern codification strategies in structured light systems.  
[25] Girona: Instituto de Informatica, Universidad de Girona.

Saldner, H. O., & Huntley, J. M. (1997). Profilometry using temporal phase  
unwrapping phase unwrapping and a spatial light modulator-based fringe  
[26] projector. Optical Engineering, p.610-615.

Zhang, D., Weide, V.D., Oliver J. (2010), Superfast phase-shifting method for  
[27] 3D shape measurement, Opt. Express 18, p.9684-9689.

Meneses, J. E. (1998). Système Optique Pour La Mesure des Dèformations  
De la Voûte Plantaire Sous Charge Statique. Franche-Comté: Thèse.  
[28] L'U.F.R Des Sciences Et Techniques DeL'Université De Franche-Comté.

Larkin, K., Hibino, K., Oreb, B., & Farrant, I. (1995). Phase shifting for  
[29] nonsinusoidal waveforms with phase-shift errors. *Optical Society of America*,  
p. 761-768

Kaiser H, Karbhari V. M. (2004), Non-destructive testing techniques for frp  
[30] rehabilitated concrete. I. A critical review, International Journal of Materials

and Product Technology, Vol.21, No.5, p.349-384.

[31] Neal, S. P., Cepel, R., Palmer, J. D. (2006), Preliminary Study of Ultrasonic Detection of Cracks Through Thick Composite Doublers, Reserch gate, Vol 25, p. 16.

[32] Scarponi C., Valente M. (2006), 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.

[33] Chu, T, Suchin P. (2006), NDE of RCC using digitome volumetric X-ray image system, SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics.

[34] Huthwaite, P., Ribichini, R., Cawley, P., Lowe, M.J.S., (2013), Mode selection for corrosion detection in pipes and vessels via guided wave tomography, IEEE Transactions on vol. 60, p.1165-1177.

[35] Hogert, E.N., Landau, M.R., Ruiz, M.F., Aparicio, R. and Gaggioli, N.G. (2002), Un nuevo método óptico de END para analizar superficies erosionadas, Laboratorio de Óptica y Laser, p. 1-6.

[36] Mendoza González, E.Y., (2012), Diseño de una metodología no destructiva para la captura digital y el dimensionamiento en 3d de discontinuidades externas en tuberías de transporte de hidrocarburos, Investigación de Maestría, Universidad Industrial de Santander.

[37] [Página Web],EO USB 2.0 CCD Machine vision cameras,

<<http://edmundoptics.com/imaging/usb-cameras/eo-usb-2-0-ccd-machine-vision-cameras/3049>>. [Citado el 23 de febrero de 2014]>.

Whale, A., Prause, S., DeJong M., Sonka M., (1999), Geometrically correct  
[38] 3D reconstruction of intravascular ultrasound images by fusion with biplane, IEEE Tran Med, vol 18, p.686-687.

GONZÁLEZ, A.L. (2014), Reconstrucción 3D del torso humano a 360° de  
[39] observación mediante la técnica de proyección de franjas, Trabajo de postgrado, Universidad Autónoma de Bucaramanga, p. 19-59.

Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. IEEE  
[40] Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, p. 1330-1334.

Hartley, R., & Zisserman, A. (2004). Multiple View Geometry in Computer  
[41] Vision. New York: Cambridge University Press.

[Página Web], Bouguet, J.-Y. Camera Calibration Toolbox for Matlab.  
[42] <[http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/#examples](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/#examples) > [citado el 10 de octubre de 2010].

Carreño, J.E., Salazar, G. (2014)., Modelo funcional óptico para la extracción  
[43] de información topográfica del rostro, Trabajo de Grado, Universidad Industrial de Santander.

González, A. L., Ballesteros, A., Meneses, J., & León, J. (2013). Método para  
la extracción de puntos de control en la calibración de una cámara basado en  
[44] la estimación de la fase de un patrón de puntos codificado. ITECKNE, p. 7-15.

\_\_\_\_\_. Norma ASTM D3567-97 (Reapproved 2011)., Standard Practice for Determining Dimensions of “Fiberglass” (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting Resin) Pipe and Fittings. ASTM International 2010. DOI: 10.1520/D3567-97R11.

\_\_\_\_\_. Norma ASTM D2240-05 (Reapproved 2010). “*Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness*”. ASTM International 2010. DOI: 10.1520/D2240-05R10.

\_\_\_\_\_. Norma ASTM D2290-12., Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe. ASTM International 2012. DOI: 10.1520/D2290-12


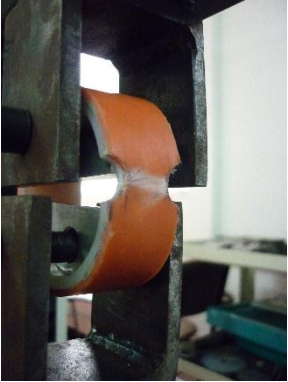
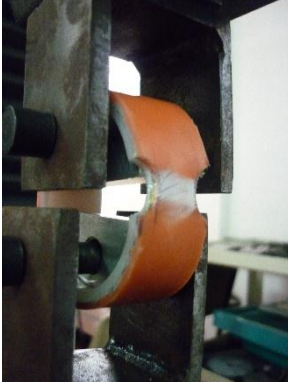

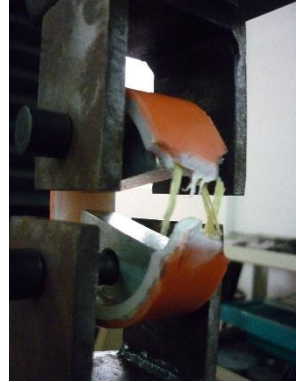
\_\_\_\_\_. Norma ASTM D7027-05., Standard Test Method for Evaluation of Scratch Resistance of Polymeric Coatings and Plastics Using an Instrumented Scratch Machine. ASTM International 2005. DOI: 10.1520/D7027-05E01.

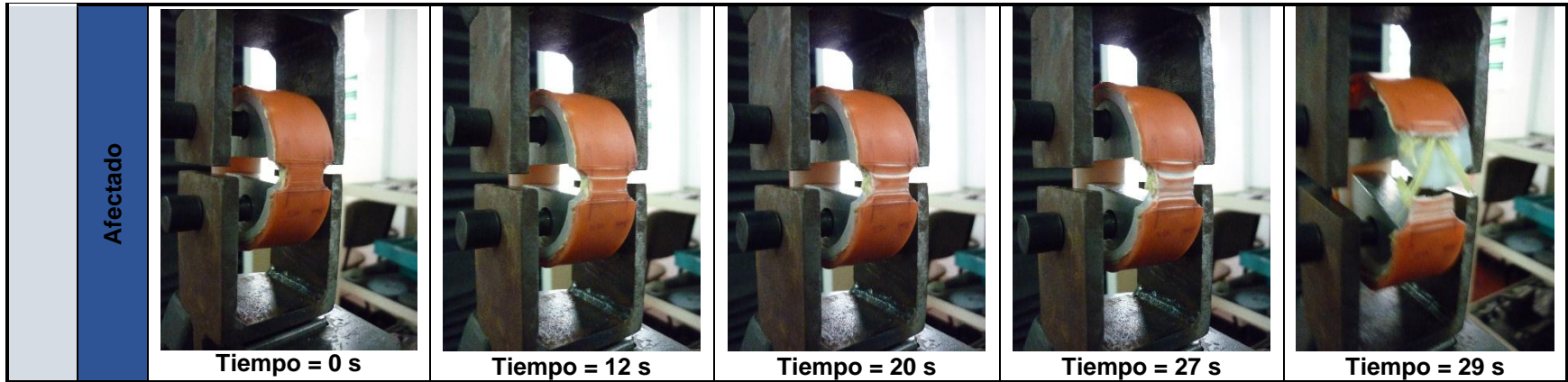
[Página Web], KISHNER, I. *pskcolombia*. <[http://pskcolombia.com.co/PSK\\_2012/PSK\\_RECURSOS\\_files/THERMOFLEXESPANOL\(2011\).pdf](http://pskcolombia.com.co/PSK_2012/PSK_RECURSOS_files/THERMOFLEXESPANOL(2011).pdf)> (2011) ≥, [Citado el 3 de febrero de 2013].

[50] NICHOLSON, J.W. “*The Chemistry of Polymers*”, 3rd ed. 2006.

## ANEXOS

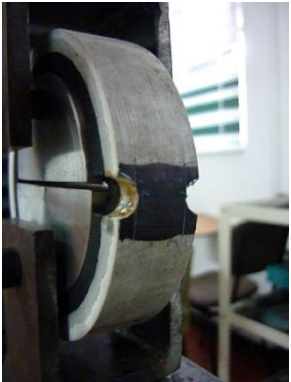
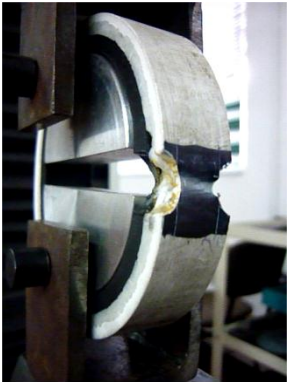
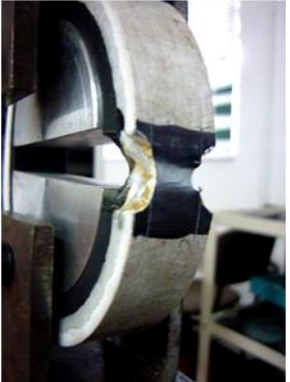







Anexo A. Secuencia de la estricción de un anillo sin rayas y afectado de sistema de tubería I, antes y después del ensayo de tensión.

Condiciones estándar de ensayo		Velocidad de ensayo: 0.4 in/min			Temperatura: 20°C	
Sistema I						
Secuencia		1	2	3	4	5
Estado Superficial	Nuevo	 <p>Tiempo = 0 s</p>	 <p>Tiempo = 24 s</p>	 <p>Tiempo = 42 s</p>	 <p>Tiempo = 47 s</p>	 <p>Tiempo = 49 s</p>



Fuente. Autor

Anexo B. Secuencia de la estricción de un anillo sin rayas y afectado de sistema de tubería II, antes y después del ensayo de tensión.

Condiciones estándar de ensayo		Velocidad de ensayo: 0.4 in/min			Temperatura: 20°C		
Sistema II							
Secuencia	1	2	3	4	5	5	
Estado Superficial	Nuevo	 Tiempo = 0 s	 Tiempo = 55 s	 Tiempo = 61 s	 Tiempo = 76 s	 Tiempo = 96 s	
	Afectado	 Tiempo = 0 s	 Tiempo = 27 s	 Tiempo = 31 s	 Tiempo = 35 s	 Tiempo = 79 s	

Fuente. Autor.

Dimensional Optical Metrology and Inspection for Practical Applications III,  
Baltimore 2014. DOI 10.1117/12.2050220.

**Three-dimensional shape measurement system applied to superficial inspection of non-metallic pipes for the hydrocarbons transport**

Javier R. Arciniegas<sup>1,2</sup>, Andrés L. González<sup>1</sup>, Luz A. Quintero<sup>2</sup>, Carlos R. Contreras<sup>1,\*</sup>, Jaime E. Meneses<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Industrial de Santander, Carrera 27 Calle 9, Bucaramanga, Santander, Colombia, Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales.

<sup>2</sup>Universidad Industrial de Santander, Carrera 27 Calle 9, Bucaramanga, Santander, Colombia, Grupo de Investigación en Desarrollo y Tecnología de Nuevos Materiales.

**ABSTRACT**

Three-dimensional shape measurement is a subject that consistently produces high scientific interest and provides information for medical, industrial and investigative applications, among others. In this paper, it is proposed to implement a three-dimensional (3D) reconstruction system for applications in superficial inspection of non-metallic pipes for the hydrocarbons transport. The system is formed by a CCD camera, a video-projector and a laptop and it is based on fringe projection technique. System functionality is evidenced by evaluating the quality of three-dimensional reconstructions obtained, which allow observing the failures and defects on the study object surface.

**Keywords:** Fringe projection technique, three-dimensional shape measurement, non-metallic piping

**1. INTRODUCTION**

The petroleum industry is in evolution constant, especially in Colombia, with the objective to improve the environmental security and the performance of the hydrocarbons transport systems. The new technologies implemented for the secondary extraction of the petroleum cause acceleration in the failure mechanisms of the conventional metallic pipes which are used to transport hydrocarbons; this cause an increment in the damages that generate economic losses, environmental affectations and expensive investments with the objective to recover affected zones. A new technology in pipes elaborated with non-metallic materials has been converted in an alternative for industry, because it provides installation easy, good mechanical resistance, resistance to the intern and external corrosion and less pressure losses.

In the last seventy years the plastic has been the material more utilized in the fabrication of diverse pipes, this technology was introduced six years ago by the oil industry in Colombia, this has provided a rapid solution to the demanding environmental normative that this industry confronts and it has facilitated a reduction significant in maintenance costs.

Despite the good results obtained with this type of pipe, early failures have been found in some of these when they are in service, this causes no controlled product transported leaks; different failures can be caused by design errors, production, installation, storage, transportation, service conditions and environmental factors including mechanical stress, thermal effects, chemical agents and service life characteristics.

Techniques to identify early failures in this type of pipe are in the process of development and in the hands of companies that manufacture them due to the novel character of this technology, if a comparison with the steel pipe is made, it can be deduced that non-destructive flaw detection techniques is not consolidated in the literature. This situation encourages the investigation to develop techniques to quantify structural damage during the years of service in the different environments to which the pipe will be subjected. The main objective of this work is to investigate the potential of applying the fringe projection technique for three-dimensional reconstruction of the different failures that may occur on the surface of the pipes with no metal reinforcement that are used to transport oil. The detailed analysis of three-dimensional reconstructions obtained will identify the failures that may affect the structural integrity of the pipe.

**2. THREE-DIMENSIONAL RECONSTRUCTION BY USING FRINGE PROJECTION TECHNIQUE**

At present, optical methods [1] are widely used for 3D reconstruction of different objects of study, because they have the features of high precision, wide field of work, and that the use of them does not involve contact with the

MOP-10

**Sistema de reconstrucción tridimensional aplicado a la exploración superficial de fallas y defectos en tuberías con refuerzo no metálico para el transporte de hidrocarburos**

J. Arciniegas<sup>1</sup>, A. González<sup>2</sup>, L. Quintero<sup>1</sup>, C. Contreras<sup>2</sup>, J. Meneses<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Investigación en Desarrollo y Tecnología de Nuevos Materiales (GIMAT), Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

<sup>2</sup>Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales (GOTS), Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

ricardocp07@gmail.com

La reconstrucción tridimensional (3D) es una temática que constantemente produce un alto interés científico, y proporciona informaciones para aplicaciones médicas, industriales, investigativas, entre otras. En el presente trabajo, desarrollado en conjunto por el GOTS y el GIMAT de la Universidad Industrial de Santander, se propone implementar un sistema de reconstrucción 3D en aplicaciones de exploración superficial de tuberías con refuerzo metálico para el transporte de hidrocarburos. El sistema de reconstrucción está formado por una cámara CCD, un videoprojector portable y un computador portátil, y se basa en la técnica de proyección de franjas. La funcionalidad del sistema queda evidenciada al evaluar su resolución y su precisión, y la calidad de las reconstrucciones tridimensionales obtenidas, las cuales permiten observar las fallas y los defectos presentes en la superficie del objeto de estudio.

**Palabras clave:** reconstrucción tridimensional, proyección de franjas, transporte de hidrocarburos

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

Luz Amparo Quintero, Javier Arciniegas Villamizar, Jaime Meneses Fonseca

### 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.

Texto completo: [PDF](#)

Revista Colombiana de Materiales  
Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería  
ISSN 2256-1013  
Calle 67 # 53 108 oficina 18-136  
Apartado Aereo 1226  
Teléfono 219 55 43  
[revmateriales@udea.edu.co](mailto:revmateriales@udea.edu.co)  
[revistacolombianademateriales@gmail.com](mailto:revistacolombianademateriales@gmail.com)



Este obra está bajo una licencia de [Creative Commons Reconocimiento 3.0 Unported](#).

Anexo D. Participación en eventos

XIII Encuentro nacional de óptica y la IV conferencia andina y del caribe en óptica  
y sus aplicaciones. Medellín 2013  
Modalidad POSTER



VII congreso internacional de materiales. Medellín 2013  
Modalidad CHARLA CORTA



Medellín, 1 de noviembre de 2013

A QUIEN INTERESE:

Por medio de la presente se hace constar que **Javier Arciniegas Villamizar, Luz Amparo Quintero y Jaime Meneses Fonseca**, participaron en calidad de ponente de charla oral en el **VII Congreso Internacional de Materiales**, realizado entre el 29 de octubre y el 1 de noviembre de 2013 en Medellín, Colombia.

Ponencia Oral: *Análisis de técnicas de inspección no destructiva en tubería flexible con refuerzo no metálico para el transporte de hidrocarburos.*

ID: 244.

María Esperanza López Gómez  
Universidad de Antioquia

Néstor Ricardo Rojas Reyes  
Universidad Nacional de Colombia

Patricia Fernández Morales  
Universidad Pontificia Bolivariana

Mónica Lucía Álvarez Láinez  
Universidad EAFIT



SPIE Dimensional Optical Metrology and Inspection for Practical Applications III.  
Baltimore 2014  
Modalidad POSTER

