

**ESTUDIO DEL EFECTO DE LOS DAÑOS SUPERFICIALES GENERADOS EN
TUBERÍA COMPUESTA FLEXIBLE CON REFUERZO NO METÁLICO PARA EL
TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS**

**MARÍA CATHALINA JIMÉNEZ ROMERO
ALBERT YESID VALLEN VARGAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2014

**ESTUDIO DEL EFECTO DE LOS DAÑOS SUPERFICIALES GENERADOS EN
TUBERÍA COMPUESTA FLEXIBLE CON REFUERZO NO METÁLICO PARA EL
TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS**

**MARÍA CATHALINA JIMÉNEZ ROMERO
ALBERT YESID VALLEN VARGAS**

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Metalúrgico

Director

**JAVIER RICARDO ARCINIEGAS VILLAMIZAR
Ingeniero Metalúrgico**

Co-directora

**LUZ AMPARO QUINTERO ORTIZ
MSc. Ingeniera Metalúrgica**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2014

DEDICATORIA

A Dios, porque Todo tiene su tiempo y todo lo que se quiere debajo del cielo tiene su hora.

A mis padres Luis y Gloria, que son lo que más amo, a su esfuerzo y sacrificio que se vio reflejado en cada momento de mi formación, junto a mis hermanos y amigas que sin su apoyo y cariño nada hubiera sido posible.

Dedico este logro a todas esas personas que demostraron su amor y cariño en todo momento de mi vida.

“El sacrificio es el precio de una vida luchando, la lucha es el alma de ser constante”

María Cathalina Jiménez Romero

DEDICATORIA

A DIOS por Ser la fuente de Luz y Sabiduría en mi vida, por darme Fortaleza y Protección Divina, porque por Su Voluntad, soy un profesional.

A mi madre Olga, por su amor y templanza, por ser ese motor que impulsa mi vida.

A mi papá Alberto, porque me enseñaste los principios, el valor y esencia de la vida a la Luz de Dios, y a pesar que eres un ángel, siempre habitarás en nuestros corazones. Te extraño mucho papá.

A mis hermanas Yenyfer y Angélica, y a mis tías Elena, Sarita, Betty y Dora, porque a pesar de la distancia, su amor y apoyo incondicional siempre estuvo conmigo, aún así en tiempos difíciles. Las quiero mucho.

A ti mi catica, porque más que mi compañera de tesis, siempre has sido una excelente mujer virtuosa. Te aprecio muchísimo.

A mis amigos y compañeros de universidad que compartieron momentos agradables de sus vidas conmigo. A tod@s: Mil gracias, jamás l@s olvidaré!

A Álvaro Macías y a Sergio Pinto por su amistad sincera, y por su ayuda incondicional y desinteresada en mi familia.

“La grandeza de un hombre se determina por el propósito por el cual vive, y por el precio que está dispuesto a pagar para alcanzarlo... Dios te da la sabiduría y te capacita para alcanzar tus logros y tus metas, tu potencial es único; porque una vida sin propósito es una vida insatisfecha, vacía y sin sentido”.

(Alberto Vallen Flórez (Q.E.P.D))

Albert Yesid Vallen Vargas

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander por habernos permitido entrar en su comunidad universitaria.

A la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales por habernos brindado excelente formación académica y humana, las cuales, son piedra angular en nuestro futuro profesional.

A nuestros directores: Ing. Javier Ricardo Arciniegas Villamizar y MSc. Luz Amparo Quintero Ortiz, por compartir sus valiosos conocimientos, así como por su apoyo incondicional en todas las actividades de seguimiento en el proyecto de grado.

Igualmente, por su valiosa asesoría y aporte técnico-científico, damos nuestros sinceros agradecimientos a las siguientes personas e instituciones, pues sin ellos, hubiera sido imposible el desarrollo del presente trabajo de grado:

- Ing. Juan Carlos Naranjo, por su apoyo incondicional y paciencia.
- Instituto Colombiano del Petróleo (ICP-ECOPETROL).
- Multiservicios Industriales Ltda.
- Dr. Bert Dalmolen. Technical Marketing Manager. Pipelife Nederland B.V.
- Ing. Mario Candela Cely. Gerente Imant Solutions Ltda.
- Ing. Luis Fernando Mesa Gómez. Director Nuevos Negocios. EXTRUCOL S.A.
- Ing. Pedro Pablo Díaz Jaimes. Docente en Ingeniería Mecatrónica. Universidad Santo Tomás de Aquino (USTA).
- MSc. Diego Hernández. Ing. Metalúrgico. Universidad Industrial de Santander.
- Téc. Nelson Bernal Hernández. Gerente MANIMEC Ltda.
- Téc. Raúl Martínez. Técnico en Mantenimiento Industrial. Universidad Industrial de Santander.
- Téc. Mauricio Jaraba. Escuela de Diseño Industrial. Universidad Industrial de Santander.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	19
1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	19
1.2 OBJETIVOS	20
1.2.1 Objetivo general	20
1.2.2 Objetivos específicos	21
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	22
2.1 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS PLÁSTICOS REFORZADOS	23
2.2 TUBERÍA COMPUESTA FLEXIBLE CON REFUERZO NO METÁLICO.	25
2.2.1 Ventajas y características	25
2.2.2 Aplicaciones	27
2.2.3 La capa externa y las causas de falla	27
2.3 DAÑOS POR TERCEROS	28
2.4 FACTORES FÍSICOS QUE AFECTAN LA PROPAGACIÓN DE GRIETAS EN TUBERÍAS FLEXIBLES	29
2.5 PRUEBAS FÍSICOMECAÑICAS Y CARACTERIZACIÓN DE TUBERÍA COMPUESTA FLEXIBLE	29
2.5.1 Microscopía cofocal	43
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	44
3.1 BÚSQUEDA, ADQUISICIÓN, REVISIÓN Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO	45
3.2 SELECCIÓN DE PRUEBAS	45
3.3 ENSAYOS EXPERIMENTALES	46
3.3.1 Caracterización de tubería no afectada	46
3.3.2 Obtención de muestras con daño superficial simulado	48
3.3.3 Aplicación de técnicas seleccionadas	51

3.4 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.	52
3.5 SOCIALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.	52
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	53
4.1 SELECCIÓN DE PRUEBAS	53
4.2 ENSAYOS EXPERIMENTALES	53
4.2.1 Caracterización de tubería no afectada	54
4.2.2 Obtención de muestras con daño superficial simulado	60
4.2.3 Aplicación de técnicas seleccionadas	62
5. CONCLUSIONES	75
6. RECOMENDACIONES	77
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
BIBLIOGRAFÍA	84
ANEXOS	91

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Estructura de un compuesto formado por capas de fibra y matriz.	24
Figura 2. Constitución de una tubería flexible con refuerzo no metálico.	26
Figura 3. Esquema de la metodología para el desarrollo de la investigación.	44

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Propiedades de materiales termoplásticos relacionados en la presente investigación.	25
Tabla 2. Principales propiedades mecánicas de los materiales compuestos reforzados con fibras.	24
Tabla 3. Principales propiedades de las capas en tubería compuesta flexible.	25
Tabla 4. Pruebas fisicomecánicas para la evaluación de tubería compuesta flexible.	30
Tabla 5. Características de los sistemas de tubería seleccionados.	47
Tabla 6. Variables y niveles de afectación seleccionados.	49
Tabla 7. Diseño de experimentos planteado.	49
Tabla 8. Parámetros fijos operativos durante la afectación.	50
Tabla 9. Pruebas fisicomecánicas seleccionadas para la presente investigación.	54
Tabla 10. Longitudes y número de muestras de tubería estimadas para el ensayo de resistencia a la tensión por anillo muescado.	55
Tabla 11. Imágenes de la sección transversal de un anillo muescado.	57
Tabla 12. Medidas del perímetro exterior por sistema de tubería.	58
Tabla 13. Diámetro exterior por sistema de tubería.	58
Tabla 14. Diámetro interior por sistema de tubería.	59
Tabla 15. Valores de dureza obtenidos.	59
Tabla 16. Características generales de las rayas inducidas en los sistemas de tubería.	61
Tabla 17. Propiedades mecánicas promedio obtenidas para sistema de tubería no afectada.	63
Tabla 18. Propiedades mecánicas promedio obtenidas para sistema de tubería I, afectado a 2.0 mm de espaciamento.	65

Tabla 19. Propiedades mecánicas promedio obtenidas para sistema de tubería I, afectado a 3.0 mm de espaciamiento.	66
Tabla 20. Propiedades mecánicas promedio obtenidas para sistema de tubería II, afectado a 2.0 mm de espaciamiento.	68
Tabla 21. Propiedades mecánicas promedio obtenidas para sistema de tubería II, afectado a 3.0 mm de espaciamiento.	69
Tabla 22. Gráficas de modelos estimados para deformación unitaria (ϵ).	71
Tabla 23. Gráficas de modelos estimados para grado de rigidez.	72
Tabla 24. Gráficas de modelos estimados para esfuerzo último a la tensión (UTS).	73

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Formato de la inspección realizada en las tuberías flexibles.	91
ANEXO B. Información técnica de diámetro exterior e interior correspondiente a sistema de tubería I.	94
ANEXO C. Información técnica de diámetro exterior e interior correspondiente a sistema de tubería II.	95
ANEXO D. Propiedades mecánicas y curvas de tracción obtenidas para cada sistema de tubería no afectado.	83
ANEXO E. Secuencia de la estricción de un anillo no afectado y afectado de sistema de tubería I, antes y después del ensayo de tensión.	84
ANEXO F. Secuencia de la estricción de un anillo no afectado y afectado de sistema de tubería II, antes y después del ensayo de tensión.	85
ANEXO G. Propiedades mecánicas y curvas de tracción obtenidas, según el diseño experimental planteado para cada sistema de tubería.	86
ANEXO H. Propiedades mecánicas y curvas de tracción obtenidas, según el diseño experimental planteado para cada sistema de tubería.	87
ANEXO I. Propiedades mecánicas y curvas de tracción obtenidas, según el diseño experimental planteado para cada sistema de tubería.	88
ANEXO J. Propiedades mecánicas y curvas de tracción obtenidas, según el diseño experimental planteado para cada sistema de tubería.	89
ANEXO K. a. Cortes efectuados en una probeta, según norma ASTM D638–10, numeral 6.1.4; b. Separación de capas no adherentes de la tubería.	91

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO DEL EFECTO DE LOS DAÑOS SUPERFICIALES GENERADOS EN TUBERÍA COMPUESTA FLEXIBLE CON REFUERZO NO METÁLICO PARA EL TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS.

AUTORES: JIMÉNEZ ROMERO, María Cathalina **
VALLEN VARGAS, Albert Yesid.

PALABRAS CLAVE: Sistema de tubería compuesta flexible, rayaduras, propiedades fisicomecánicas.

DESCRIPCIÓN:

Debido a los fenómenos de corrosión que afectan considerablemente las tuberías metálicas utilizadas para el transporte de fluidos de hidrocarburos, la industria del petróleo y gas en su evolución tecnológica, ha implementado la instalación de tuberías flexibles con refuerzo no metálico, mostrando éstas en principio, un servicio y rendimiento conforme. No obstante, se presentan fallas inesperadas y tempranas, las cuales, han ocasionado problemas económicos y ambientales, siendo de vital importancia el estudio y determinación de sus posibles causas.

Por lo anterior, el objetivo principal de este trabajo, es estudiar la influencia de fallas superficiales inducidas por rayaduras en la capa externa de dos sistemas de tubería compuesta flexible con refuerzo no metálico, que están enterradas y son utilizadas en el transporte de hidrocarburos, sobre sus propiedades fisicomecánicas. Para lograr el objetivo fue necesario realizar pruebas de resistencia a la tracción por anillo muescado, ensayo de dureza Shore D, determinación de dimensiones de los sistemas de tubería y caracterización por microscopía cofocal, todo realizado sobre muestras con y sin daño superficial, tomando como lineamientos parámetros establecidos por las distintas normas técnicas recomendadas.

La investigación permitió concluir que las fallas simuladas en la superficie externa de estas tuberías, con variación de la profundidad y espaciado entre éstas, afecta las propiedades mecánicas, siendo mayor la influencia de la profundidad de las rayaduras.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: ARCINIEGAS VILLAMIZAR, Javier Ricardo, Ing. Metalúrgico - UIS; Codirectora: QUINTERO ORTIZ, Luz Amparo, MSc. Ingeniería Metalúrgica - UIS.

ABSTRACT

TITLE: RESEARCH ABOUT THE SURFACE DAMAGE EFFECTS CAUSED ON COMPRISING FLEXIBLE PIPES WITH NON-METAL-REINFORCEMENT FOR HYDROCARBON TRANSPORTATION*

RESEARCHERS: JIMÉNEZ ROMERO, María Cathalina **
VALLEN VARGAS, Albert Yesid

KEY WORDS: Comprising flexible pipes system, scratches and physical-mechanic properties.

OUTLINE:

Due to the phenomena of corrosion that affect considerably the metallic pipelines used for the transport of fluids of hydrocarbons, the oil and gas industry in its technological evolution has implemented the installation of flexible pipelines with non-metal-reinforcement, showing at first a service and similar performance. Nevertheless, they present early and unexpected failures, which have caused economic and environmental problems, performing vital importance the study and determination of their possible reasons.

Consequently, the principal aim of this work is to study the influence of superficial failures induced by scratches on the external layer of two systems of comprising flexible pipeline with non-metal-reinforcement which are buried underground and are used to transport hydrocarbons, on its physical-mechanic properties. To achieve the aim was necessary to make endurance tests to the traction for notch ring, hardness test Shore D, determination of dimensions of the systems of pipeline and characterization for cofocal microscopy, all of them carried out on samples with and without superficial hurt, taking as guidelines the parameters established with the technical specifications by the international standards organization.

The investigation enabled to conclude that the failures simulated in the external surface of these pipelines, with variation of the depth and spacing between these, affect the mechanical properties, being bigger the influence of the depth of the scratches.

* Work Degree.

** Physicochemical Faculty of Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Directed: ARCINIEGAS VILLAMIZAR, Javier Ricardo, Metallurgical Engineer; Co-Director: QUINTERO ORTIZ, Luz Amparo, MSc. Metallurgical Engineering.

INTRODUCCIÓN

En la industria del petróleo y el gas se necesitan muchos kilómetros de tubería metálica para el transporte de los hidrocarburos y otros fluidos industriales. De manera alternativa, para minimizar los costos por corrosión y mantenimiento, ha surgido una nueva tecnología en tuberías flexibles multicapas de materiales compuestos, la cual, juega un papel destacado en este campo, aumentando el tiempo en servicio, el rendimiento, el ahorro en reparación y rehabilitación¹.

Los productos compuestos con base en polímeros han sido diseñados y producidos con la expectativa de que operaran de manera satisfactoria y según lo previsto durante su vida útil. Sin embargo, nuevas investigaciones han demostrado que estas tuberías fallan y, que a menudo, estas fallas son completamente inesperados o inusuales y su causa principal es el daño generado por terceros, que puede manifestarse por rayaduras y abolladuras, entre otros¹. Estos daños, producen cambio de sus propiedades mecánicas y, por tanto, pérdidas de la capacidad de contención del fluido.

En este trabajo se investigó el efecto de rayaduras inducidas en la capa externa de las tuberías, sobre las propiedades mecánicas de las mismas, en dos sistemas de tubería compuesta flexible. Se establecieron como variables de afectación el espaciamiento (2.0 mm y 3.0 mm) y profundidad de la rayadura (10% y 50% de espesor de la capa externa).

Con base en el estudio de las propiedades mecánicas de tubería polimérica con y sin afectación, se obtuvo información sobre la deformación unitaria (ϵ), grado de rigidez y esfuerzo último a la tensión (UTS). Los resultados mostraron influencia

¹ FARSHAD, M. Plastic Pipe Systems: Failure investigation and diagnosis. United Kingdom, Elsevier Science Technology, 2006.

significativa de la profundidad de la rayadura, sobre las propiedades de la tubería y, muy poca influencia del espaciamiento de éstas.

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1 IDENTIFICACIÓN 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. Como tecnología alternativa, se encuentran los sistemas de tuberías flexibles de materiales compuestos, las cuales, rápidamente están reemplazando tuberías convencionales metálicas, debido a su comportamiento respecto a los efectos de la corrosión y su mayor vida útil.

La corrosión puede costarle a Colombia cerca de los 17 billones de pesos anuales², cifra que representa el 3% de producto interno bruto (PIB), el cual, se pierde por culpa de este fenómeno natural, pero irreversible. No solo es problema de máquinas o instalaciones, trasciende hasta amenazar la estructura de costos de las empresas y toca directamente el futuro del país. Debido a la magnitud del daño causado, empresas de la industria del petróleo tuvieron la iniciativa de implementar tubería compuesta flexible con refuerzo no metálico, como alternativa de reemplazo a las tuberías metálicas.

Estas tuberías se emplean con la expectativa de que su servicio sea satisfactorio y se minimice la falla, haya reducción en los costos de mantenimiento y en daños ambientales. Sin embargo, ocurren fallas tempranas completamente inesperadas o inusuales y sus causas no son siempre fáciles de determinar. Las fallas pueden ocurrir en la tubería polimérica de diferentes maneras; en la etapa de fabricación, durante el montaje y en el servicio.

² [Página Web], ARROYAVE POSADA, Carlos Enrique. Corrosión: primer consumidor de acero en el mundo. Colombia. 2013. <<http://www.ecopetrol.com.co/especiales/Revistahnova7ed/entrevista.htm>>

Una de las principales amenazas a la seguridad de los ductos, particularmente en y alrededor de las ciudades y de las comunidades surge de individuos u organizaciones, conocidas como terceros³, que llevan a cabo actividades en las proximidades de tuberías enterradas, sin darse cuenta de que la tubería esté allí. En ocasiones se pueden presentar daños que parecen ser menores y pueden, durante un período de tiempo, debilitar una tubería y provocar una fuga o rotura en un período posterior.

Investigaciones recientes han mostrado que la causa principal de falla de estas tuberías es el daño generado por terceros¹. Estos daños se pueden manifestar por agrietamiento, rayaduras, abolladuras, entre otros, los cuales, producen cambio de sus propiedades, y por tanto pérdidas de la capacidad de contención del fluido.

Por lo anterior, en el presente proyecto se estudió las consecuencias del daño superficial generado por rayadura en tuberías compuestas flexibles con refuerzo no metálico, empleada en la conducción de hidrocarburos. Así mismo, se evaluó el efecto sobre las propiedades del material en la tubería, mediante la ejecución de pruebas fisicomecánicas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general. Estudiar el efecto del daño superficial externo más representativo generado en tuberías de materiales compuestos flexibles con refuerzo no metálico, enterradas, y utilizadas en el transporte de hidrocarburos, sobre sus propiedades fisicomecánicas.

³ EZRIN. Myer y LAVIGNE. Gary. Unexpected and unusual failures of polymeric Materials. Elsevier Science Technology. 2006.

¹ FARSHAD, M. Plastic Pipe Systems: Failure investigation and diagnosis. United Kingdom, Elsevier Science Technology. 2006.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Aplicar pruebas físicas y mecánicas seleccionadas, bajo criterios técnicos y económicos, a tubería con daño superficial externo.
2. Caracterizar física, mecánica y microscópicamente muestras de tubería nueva.
3. Evaluar el efecto de los daños sobre las propiedades estudiadas.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Un **material compuesto** es un sistema multifase de materiales, constituido por una mezcla o combinaciones de dos o más micro-constituyentes o macro-constituyentes que difieren en forma y composición química, y que son esencialmente insolubles entre sí. La importancia de un material compuesto para la ingeniería radica en que dos o más materiales se combinen para formar un material compuesto, cuyas propiedades sean superiores, o en algún modo más importantes que las de sus componentes⁴. Generalmente, en un material compuesto una fase es continua (la matriz) y rodea completamente a la otra (la fase dispersa)⁵.

De los varios tipos de materiales compuestos, el potencial de la eficiencia del reforzamiento es mayor en los *compuestos reforzados con fibras*. Utilizando materiales de baja densidad, tanto para la matriz como para las fibras, se fabrican compuestos reforzados con fibras, con la finalidad de conseguir elevada resistencia y rigidez a baja densidad. En estos compuestos, la carga aplicada se trasmite a las fibras y se distribuye entre ellas a través de la fase matriz, que pueden ser moderadamente dúctil⁵.

La matriz de un material compuesto soporta las fibras manteniéndolas en su posición correcta; transfiere la carga a las fibras fuertes, las protege de sufrir deterioro superficial que puede resultar de la abrasión mecánica durante su manufactura y su uso, y evitan la propagación de grietas en las fibras en el compuesto. Las matrices poliméricas son particularmente comunes. La mayoría de los polímeros termoplásticos como termoestables, están disponibles en grados correspondientes a reforzamiento con fibras⁶.

⁴ SMITH, William. Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales. 4 ed. McGraw Hill. 2004. 717 p.

⁵ CALLISTER, William. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. 3 ed. Barcelona, Reverté. 1995. 803 p.

⁶ ASKELAND, Donald. Ciencia e ingeniería de los materiales. 4 ed. Iberoamericana. 2005.

2.1 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS PLÁSTICOS REFORZADOS

Las propiedades mecánicas de una muestra son aquellas características que implican el reordenamiento físico de sus componentes moleculares o distorsión de su morfología inicial en respuesta a una fuerza aplicada⁷. En los plásticos reforzados, las propiedades físicas y mecánicas dependen del tipo, forma y orientación del material de refuerzo, de la longitud de las fibras y de la fracción volumétrica (porcentaje) de material de refuerzo. El refuerzo de fibra también afecta otras propiedades de los compuestos, las propiedades físicas y la resistencia a la fatiga y al desgaste, dependen del tipo y de la cantidad de refuerzo. Un factor crítico en los plásticos reforzados 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/matriz⁸.

Ciertas propiedades de un compuesto dependen sólo de las cantidades y propiedades relativas de los constituyentes. En muchos casos, se puede utilizar la *regla de las mezclas* para estimar las propiedades del compuesto⁶. Cuando un material compuesto con fibras continuas y orientadas se aplica una carga perpendicularmente a la dirección de la fibra, bajo condiciones de isoesfuerzo como lo indica la figura 1.4, se utiliza la regla de las mezclas para predecir la deformación del material compuesto ϵ_c .

Regla de las mezclas

$$\epsilon_c = \sum V_i \epsilon_i = V_1 \epsilon_1 + V_2 \epsilon_2 + \dots + V_n \epsilon_n$$
$$\epsilon_c = V_m \epsilon_m + V_f \epsilon_f \quad (1)$$

⁷ PEACOCK A. J. Handbook of polyethylene: Structures, properties and applications. New York, Marcel Dekker Inc. 2000.

⁸ KALPAKJIAN, Serope. Manufactura, ingeniería y tecnología. 4 ed. Pearson Education. 2005. 1154 p.

⁶ ASKELAND, Donald. Ciencia e ingeniería de los materiales. 4 ed. Iberoamericana. 2005.

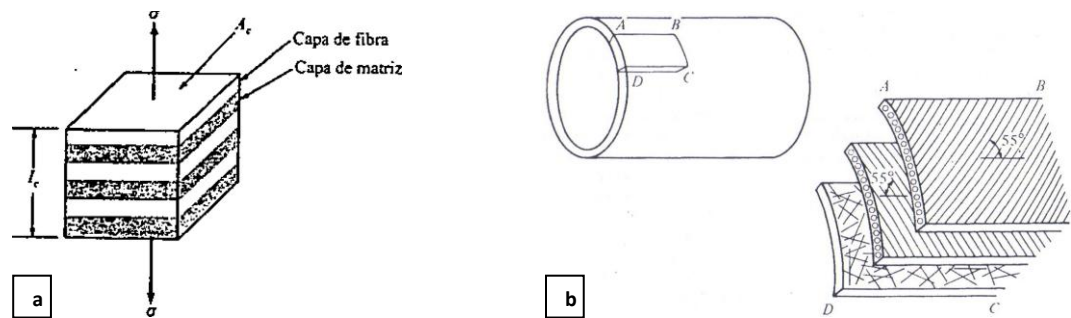
⁴ SMITH, William. Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales. 4 ed. McGraw Hill. 2004. 717 p.

En esta condición, el compuesto y ambas fases están expuestos al mismo esfuerzo⁵:

$$\sigma = \sigma_c = \sigma_m = \sigma_f \quad (2)$$

Donde $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ son las deformaciones estimadas de cada uno de los constituyentes dentro del compuesto; V_1, V_2, \dots, V_n son las fracciones volumétricas de cada constituyente. Los subíndices m y f se refiere a la matriz y a la fibra⁶.

Figura 1. Estructura de un compuesto formado por capas de fibra y matriz.



Fuente: a. SMITH, William⁴; b. HULL, Derek⁹.

A continuación, en las tablas 1 y 2 se detallan las propiedades mecánicas más importantes de los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados, y algunos termoplásticos de interés para la presente investigación.

⁵ CALLISTER, William. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. 3 ed. Barcelona, Reverté. 1995. 803 p.

⁶ ASKELAND, Donald. Ciencia e ingeniería de los materiales. 4 ed. Iberoamericana. 2005.

⁴ SMITH, William. Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales. 4 ed. McGraw Hill. 2004. 717 p.

⁹ HULL, Derek. Materiales compuestos. Barcelona, Reverté. 1987.254 p.

Tabla 1. Propiedades de materiales termoplásticos relacionados en la presente investigación.

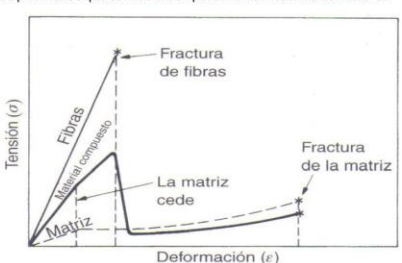
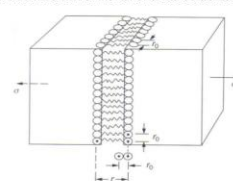
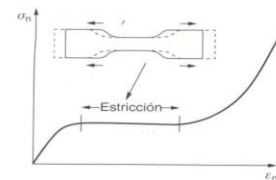
MATERIAL	Módulo de Elasticidad (E) (psi)	Esfuerzo Último a la Tracción (UTS) (psi)	% Elongación
Poliétileno de Alta Densidad (PEAD)	180000	5500	130
Poliéster (PET) (Fibra de Poliestireno)	600000	10500	300
Poliamida (PA) (nylon)	500000	12000	300
Sulfuro de polifenileno (PPS) (Polipropileno Fortron)	480000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

Fuente: ASKELAND, Donald⁶; ASHBY. M y JONES. D¹⁰.

⁶ ASKELAND, Donald. Ciencia e ingeniería de los materiales. 4 ed. Iberoamericana. 2005.

¹⁰ ASHBY. M y JONES. D. Materiales para ingeniería, introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño. Barcelona, Reverté. 2008.

Tabla 2. 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 (Δl) hasta alcanzar la fractura de la probeta. El resultado del ensayo sería la curva de esfuerzo (σ) vs deformación ingenieril (ε), de la que se pueden extraer distintos parámetros que definen el comportamiento mecánico del material.</p>  <p>Curva esfuerzo – deformación de una matriz polimérica reforzada con fibras.</p>	<p>Módulo de elasticidad (E)</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>Recuperación elástica de un material a nivel molecular ante esfuerzos aplicados.</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:</p> $\sigma = \varepsilon E \Leftrightarrow \varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (5)$ <p>Cuando la carga se aplica perpendicularmente a las fibras, el esfuerzo aplicado es igual sobre todas las capas (condición de isoesfuerzo) (ver ecuación 2). Con base en esta condición, y reemplazando la ecuación (5) en (1), se obtiene:</p> $\frac{\sigma}{E_c} = V_m \left(\frac{\sigma}{E_m} \right) + V_f \left(\frac{\sigma}{E_f} \right) \Leftrightarrow \frac{1}{E_c} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_f}{E_f} \quad (6)$ <p>Así, el módulo de elasticidad de un material compuesto (E_c) reforzado con fibras continuas y orientadas es igual a:</p> $E_c = \frac{E_m E_f}{E_f V_m + V_f E_m} \quad (7)$ <p>Donde: E_f = módulo de elasticidad de la fibra E_m = 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 deformación elástica. Si el material es deformado hasta el extremo de que no puede recuperarse por completo sus dimensiones originales, se dice que ha experimentado una deformación plástica. Por definición, la deformación ingenieril, 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> $\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3)$ <p>Donde: l_0 = longitud inicial de la muestra. l = 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 esfuerzo ingenieril es igual al cociente entre la fuerza de tensión uniaxial media F y la sección transversal original A_0 de la muestra, así que:</p> $\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (4)$ <p>Las unidades tradicionales en el sistema internacional son pascuales (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>Esfuerzo Último a la Tensión (UTS)</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>Formación de la estricción en la curva esfuerzo – deformación.</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> $\sigma_{máx.c} = V_m \sigma_m + V_f \sigma_f \quad (8)$ <p>Donde: σ_f = resistencia a la tensión de la fibra σ_m = esfuerzo que actúa sobre la matriz, cuando el compuesto está deformado hasta el punto donde se fracture la fibra.</p>
	<p>Porcentaje de elongación, deformación o alargamiento</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 las presencias de imperfecciones en las probetas.</p>	$\% \text{ elongación} = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100\% \quad (9)$ <p>Donde: l_0 = longitud inicial. l = longitud final.</p>
DUREZA	<p>Se define como dureza a la resistencia de un material de ser penetrado (deformación plástica permanente) o rayado.</p>	Dureza Shore	<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 (en escala Shore D).</p>

Fuente: ASHBY. M y JONES. D¹⁰, SEYMOUR. Raimond y CARRAHER. Charles¹¹.

¹⁰ ASHBY. M y JONES. D. Materiales para ingeniería, introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño. Barcelona, Reverté. 2008.

¹¹ SEYMOUR. Raimond y CARRAHER. Charles. Introducción a la química de los polímeros. Barcelona, Reverté. 2002.

2.2 TUBERÍA COMPUESTA FLEXIBLE CON REFUERZO NO METÁLICO

Las tuberías no metálicas de materiales compuestos son sistemas multifásicos, constituidas por una o más capas en una gran variedad de materiales, entre el polietileno, poliamidas, resinas termoestables, entre otros, y son elaboradas con el fin de mejorar las propiedades mecánicas del material resultante. Los materiales se pueden encontrar tanto rígidos como flexibles y, así mismo, sus características, ventajas y limitaciones están dadas por estas propiedades¹².

2.2.1 Ventajas y características. Una tubería de este tipo es la compuesta flexible, la cual se encuentra conformada por tres capas (ver figura 2) con diferentes propiedades, las cuales, brindan una variedad de ventajas como ligereza, durabilidad, alta resistencia mecánica, alta resistencia a la corrosión interna y externa, buena resistencia química, fácil instalación, ágil y económica, y no requiere de mantenimiento sofisticado¹³. Estas ventajas se logran gracias a las características específicas que presentan las capas constitutivas de las tuberías de materiales compuestos.

En la tabla 3 se muestran las características principales de cada capa.

Tabla 3. Principales propiedades de las capas en tubería compuesta flexible.

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

Fuente: DALMOLEN, Bert¹⁴.

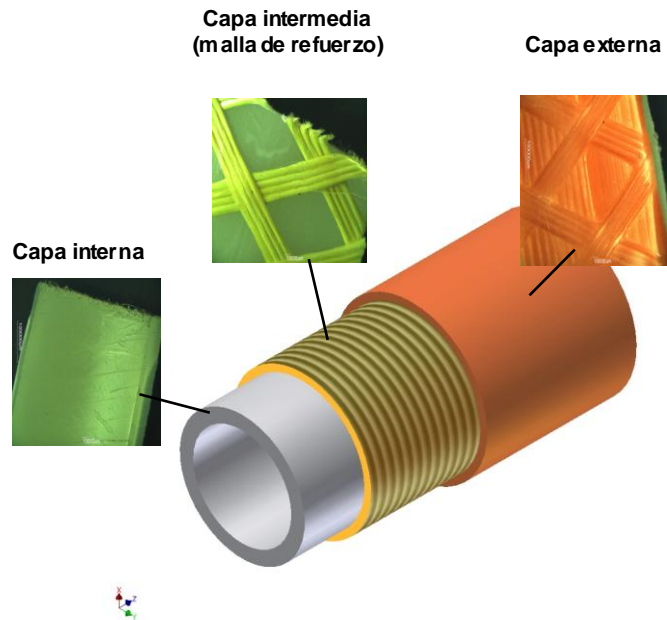
¹² DUARTE. Gloria Isabel y MANRIQUE. Miguel Antonio. Guía recomendada para selección y uso de tuberías de materiales compuestos para aplicación en líneas de flujo de la VPR. Piedecuesta, ECOPETROL S.A. 2012. 85 p.

¹³ [Página Web], KISHNER, Israel. Pskcolombia. 2011.

<[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) >.

¹⁴ DALMOLEN, Bert. Reinforced Thermoplastic Pipeline (RTP) Systems. Amsterdam, For 23rd World Gas Conference. 2006.

Figura 2. Constitución de una tubería flexible con refuerzo no metálico.



La resistencia y flexibilidad de estas tuberías permiten absorber sobrepresiones, vibraciones y tensiones causadas por movimientos del terreno. Esto permite que sean instaladas sin problemas en terrenos con obstáculos, ya que pueden colocarse en forma serpenteada, respetando ciertas tolerancias de curvatura (radios mínimos).

La resistencia a la ruptura por tensiones ambientales es muy alta, asegurando que no hay ningún efecto en el servicio a largo plazo si se producen rayas superficiales de una profundidad no mayor a 1/10 del espesor durante la instalación¹⁵.

¹⁵ [Página Web], FIBERSPAR CORPORATION, Line pipe engineering guide Fiberspar. United States. 2012. <http://www.fiberspar.com/sites/default/files/FibersparPresentation_October2012-US.pdf>

2.2.2 Aplicaciones. Las tuberías de materiales compuestos para la industria del Petróleo y Gas están comercialmente disponibles para diferentes servicios de fluidos, entre ellos, tuberías para fluidos multifásicos crudo – agua - gas; tuberías para suministro de gas combustible y líneas de distribución de gas; tuberías para inyección de agua en campos de producción o tuberías de disposición (agua producida y fresca)¹².

2.2.3 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 vía¹⁵.

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 que la suma individual de cada uno de los problemas¹⁰.

Las fugas causadas durante la instalación pueden en la mayoría de los casos detectarse durante las pruebas preliminares de presión, sin embargo, es posible que algunos daños requieran más tiempo para desarrollarse y causar falla durante la operación. Entre los daños que pueden tomar más tiempo para llevar a la falla de la tubería están la abrasión, causada por elementos afilados tales como rocas o fricción contra la tubería, la cual, es muy común durante la instalación.

¹² DUARTE. Gloria Isabel y MANRIQUE. Miguel Antonio. Guía recomendada para selección y uso de tuberías de materiales compuestos para aplicación en líneas de flujo de la VPR. Piedecuesta, ECOPETROL S.A. 2012. 85 p.

¹⁵ [Página Web], FIBERSPAR CORPORATION, Line pipe engineering guide Fiberspar. United States. 2012. <http://www.fiberspar.com/sites/default/files/FibersparPresentation_October2012-US.pdf>

¹⁰ ASHBY. M y JONES. D. Materiales para ingeniería, introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño. Barcelona, Reverté. 2008.

Esto conlleva a que se generen rayaduras en la capa exterior de la tubería en forma de marcas someras sin orientación preferencial¹². Dependiendo de la profundidad y forma de la rayadura, puede dar lugar a crecimientos de grietas, disminución de la resistencia y durabilidad de la tubería.

Es de interés para la presente investigación hacer énfasis en los daños causados por las rayaduras, 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 instalación¹.

2.3 DAÑOS POR TERCEROS

El daño por terceras partes es identificado como una de las causas de fallas en servicio para las tuberías de materiales compuestos, donde en algunos casos, es el resultado de falta de conocimiento con respecto a la ubicación precisa de las líneas enterradas, o por no seguir los procedimientos reconocidos en la industria en la alteración o excavación de tierra.

Los daños por terceros más comunes presentados en la capa externa de la tubería son: cuarteamiento, cortes exteriores, fracturas, rayaduras, daño por impacto, rotura, doblez y aplastamiento^{1, 3}.

¹² DUARTE. Gloria Isabel y MANRIQUE. Miguel Antonio. Guía recomendada para selección y uso de tuberías de materiales compuestos para aplicación en líneas de flujo de la VPR. Piedecuesta, ECOPETROL S.A. 2012. 85 p.

¹ FARSHAD, M. Plastic Pipe Systems: Failure investigation and diagnosis. United Kingdom, Elsevier Science Technology. 2006.

³ EZRIN. Myer y LAVIGNE. Gary. Unexpected and unusual failures of polymeric Materials. Elsevier Science Technology. 2006.

2.4 FACTORES FÍSICOS QUE AFECTAN LA PROPAGACIÓN DE GRIETAS EN TUBERÍAS FLEXIBLES

El esfuerzo aplicado, la presencia de entallas y ángulo de las mismas en el material, y la geometría de la tubería, son factores clave que influyen en la resistencia a la propagación de grietas¹⁶.

Un aumento en la tensión lleva aparejado un incremento en la velocidad de formación y crecimiento de daños, siempre y cuando se esté en la región de esfuerzos donde el material falla de manera frágil¹⁷.

2.5 PRUEBAS FÍSICOMECAÑICAS Y CARACTERIZACIÓN DE TUBERÍA COMPUESTA FLEXIBLE

Para la presente investigación, las pruebas físico-mecánicas de 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 la tubería en general.

En la tabla 4 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.

¹⁶ BROWN. N and Bhattacharya. K. Journal of materials science. 1985. 20, 4553-4560 p.

¹⁷ ZHOU. Z and BROWN, N. Journal of polymer science, part b: Polymer physics. 1992, 30, 5, 477-487 p.

Tabla 4. Pruebas fisicomecánicas para la evaluación de tubería compuesta flexible.

Ensayo	Designación y nombre de la norma	Normas equivalentes	Resumen	Criterios técnicos / económicos	Disponibilidad para efectuar el ensayo
DETERMINACIÓN DE DIMENSIONES	ASTM D3567 – 97 (Reapproved 2011) Standard Practice for Determining Dimensions of "Fiberglass" (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting Resin) Pipe and Fittings [18].	-	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 pi, calibrador).	DISPONIBLE
DUREZA	ASTM D2240-05 (Reapproved 2010). Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness [19].	NTC 2524 [20] ISO 868 (Shore) [21] ASTM D2583-13a (Barcol) [22]	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.	DISPONIBLE
IMPACTO POR GRAVEDAD	ASTM D2444-99 (Reapproved 2005). Standard Test Method for Determination of the Impact Resistance of Thermoplastic Pipe and Fittings by Means of a Tup (Falling Weight) [23].	ISO 3127 (1994) [24]	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.	NO DISPONIBLE
RESISTENCIA A LA PRESIÓN SOSTENIDA	ASTM D1598-02 (Reapproved 2011). Standard Test Method for Resistance to Short-Time Hydraulic Pressure of Plastic Pipe, Tubing, and Fittings [25].	NTC 3578 [26]. API RP 15S (2006) [27] ISO 1167 [28] ISO 9080 [29]	Este ensayo determina 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.	NO DISPONIBLE
PRESIÓN HIDROSTÁTICA DE ROTURA A CORTO PLAZO	ASTM D1599-99 (Reapproved 2011). Standard Test Method for Resistance to Short-Time Hydraulic Pressure of Plastic Pipe, Tubing, and Fittings. (Procedure A) [30].	NTC 3579 [31] API RP 15S (2006) [27] API Spec 17J (2008) Section 9.3 [32]	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.	NO DISPONIBLE
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	ASTM D695-10. Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics [33].	ISO 604 [34]	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	NO DISPONIBLE
RESISTENCIA A LA FLEXIÓN	ASTM D790-10. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials [35].	ISO 178 (2010) [36]	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.	NO DISPONIBLE
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	ASTM D638-10. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics [37].	ISO 527-1 (2012) [38] ISO 527-2 (2012) [39]	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.	NO DISPONIBLE
RESISTENCIA A LA TENSIÓN POR ANILLO MUESCADO	ASTM D2290-12. Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe. (Procedure A) [40].	NTC 4392 [41]	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.	DISPONIBLE

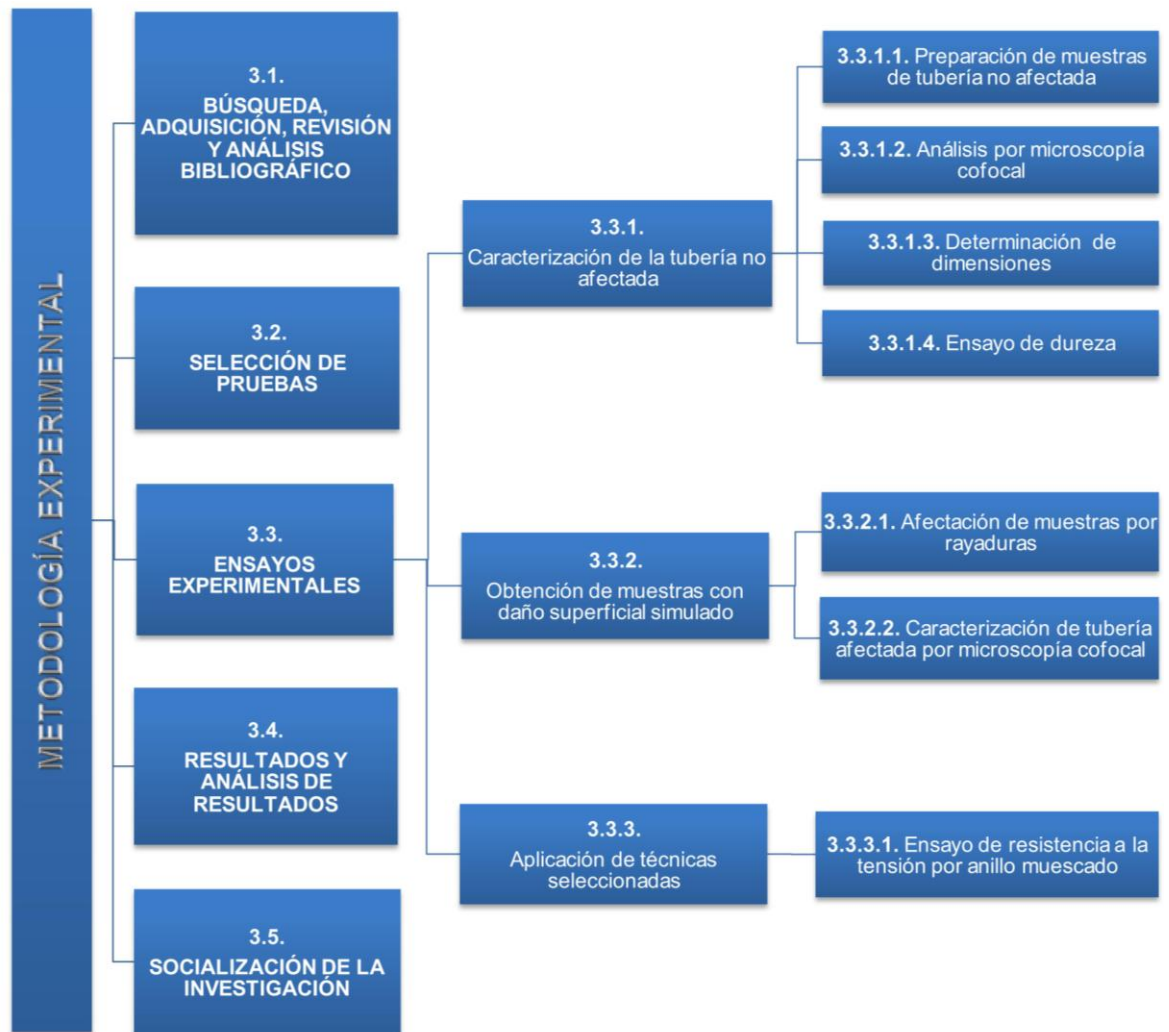
2.5.1 Microscopía cofocal. La microscopía cofocal es una tecnología de observación innovadora basada en un algoritmo original Hirox. Este sistema óptico reconstruye modelos 3D mediante el apilado vertical de imágenes, esto reproduce un rango dinámico con una imagen visual de alta resolución y calidad. Esta función proporciona una fácil observación y análisis mediante la extracción y producción de datos de imágenes; al capturar diez (10) planos de imágenes en sólo 4 segundos paso a paso con un escaneo rápido, suave y preciso con 0,05 μm /pulso y 30 mm de recorrido automatizado para visualizar un modelo en 3D de alta calidad⁴².

⁴² [Página Web], _____. Microscopía cofocal. 2014. <http://www.hirox-usa.com/products/microscope/kh7700_04.html>

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En la figura 3 se muestra un esquema de la metodología que se llevó a cabo para la realización de la presente investigación.

Figura 3. Esquema de la metodología para el desarrollo de la investigación.



A continuación se describen las fases, etapas y actividades metodológicas que se llevaron a cabo durante el desarrollo del proyecto.

3.1 BÚSQUEDA, ADQUISICIÓN, REVISIÓN Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO

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, catálogos y fichas técnicas de los equipos y accesorios utilizados, procedentes de las bases de datos ofrecidas por la biblioteca virtual de la Universidad Industrial de Santander, e información disponible en internet concernientes a las temáticas de interés en esta investigación.

Dicha información permitió adquirir y afianzar conocimientos referentes a los daños superficiales externos presentes en la tubería compuesta flexible, a las propiedades fisicomecánicas de materiales compuestos y poliméricos, así como base para la selección de pruebas, el planteamiento de los ensayos experimentales, registro y discusión de resultados y la escritura del informe final.

3.2 SELECCIÓN DE PRUEBAS

Con base en la revisión bibliográfica realizada sobre las pruebas mecánicas aplicables, se llevó a cabo una consulta de la disponibilidad y existencia de equipos y accesorios necesarios para realizarlas. La búsqueda se realizó en las escuelas de ingenierías de la UIS, en los laboratorios especializados de otras universidades, en algunas empresas privadas, en instituciones de investigaciones como el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), y el Instituto de Capacitación e Investigación del Plástico y del Caucho (ICIPC) en la ciudad de Medellín. Con la información anterior, y siguiendo aspectos técnicos y económicos, se determinó para el presente estudio utilizar tres (3) pruebas fisicomecánicas 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. Adicionalmente, se determinaron aspectos importantes para la selección apropiada de los equipos involucrados en la evaluación de la capa externa. Los resultados obtenidos de esta fase se presentan en el capítulo cuatro.

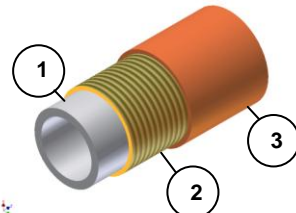
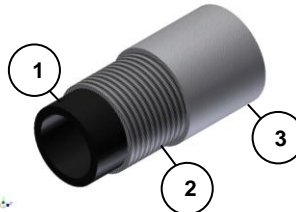
3.3 ENSAYOS EXPERIMENTALES

En esta fase se describen las tres etapas que se llevaron a cabo durante el desarrollo experimental, las cuales fueron: caracterización de la tubería no afectada, obtención de muestras con daño superficial simulado, así como la aplicación de cada una de las técnicas seleccionadas. A continuación se indican detalles de cada una de las etapas realizadas.

3.3.1 Caracterización de tubería no afectada. En esta etapa, se prepararon muestras de tubería no afectada, teniendo en cuenta criterios establecidos en normas técnicas, tales como la forma y las dimensiones de las probetas y accesorios; así mismo, se llevó a cabo la caracterización y evaluación física mediante microscopía cofocal, se hizo la determinación de dimensiones y se aplicó el ensayo de dureza.

3.3.1.1 Preparación de muestras de tubería no afectada: Para llevar a cabo esta actividad, en primer lugar se realizó una selección de los diferentes fabricantes de tuberías compuestas flexibles más utilizadas para el transporte de hidrocarburos en los campos petroleros en Colombia, teniendo en cuenta la revisión bibliográfica realizada sobre los sistemas de tubería flexible, así como la disponibilidad de muestras de tubería para desarrollar las pruebas. Con base en lo anterior, se determinó trabajar con dos sistemas de tubería, los cuales fueron suministrados por la Empresa Colombiana de Petróleos (ECOPETROL S.A.). En la tabla 5 se presentan detalles de los mismos.

Tabla 5. Características de los sistemas de tubería seleccionados.

SISTEMA DE TUBERÍA	INFORMACIÓN TÉCNICA		CONSTITUCIÓN TRICAPA			TECNOLOGÍA
	Diámetro (in)	Presión máx. de operación (psi)	Capa interna [1]	Capa intermedia (malla de refuerzo) [2]	Capa externa [3]	
SISTEMA I	2 3/8	275	Nylon (PA) Polipropileno Fortron (PPS)	Fibra de Aramida	Nylon (PA) Polipropileno (PP)	
SISTEMA II	3.0	1000	Poliétileno de Alta Densidad (PEAD)	Fibra de Poliestireno (PET)	Poliétileno de Alta Densidad (PEAD)	

Con base en estos sistemas seleccionados, se prepararon las respectivas muestras para llevar a cabo los ensayos planteados. Los resultados se muestran en el capítulo cuatro.

3.3.1.2 Análisis por microscopía cofocal: Con el fin de llevar a cabo la evaluación del espesor de la capa externa, se seleccionó al azar una probeta de anillo muescado para cada sistema de tubería, el cual, fue analizado con el microscopio digital marca HIROX KH-7700 a un aumento de 35x en campo oscuro. Así mismo, se realizaron cinco mediciones de espesor sobre las capas de las muestras analizadas. Este microscopio se encuentra disponible en el Laboratorio del Grupo de Investigación de Desarrollo y Tecnología de Nuevos Materiales (GIMAT) de la UIS. Los resultados obtenidos se describen en el capítulo cuatro: Resultados y Análisis de Resultados.

3.3.1.3 Determinación de dimensiones: Con el fin de llevar a cabo las pruebas mecánicas de tensión por anillo muescado y de dureza para tubería nueva, se

realizó la determinación de los diámetros exterior e interior de la tubería, siguiendo las indicaciones de la norma ASTM D3567-97¹⁸, la cual, determina las dimensiones de tuberías termoplásticas reforzadas. Los resultados obtenidos se especifican en el capítulo cuatro.

3.3.1.4 Ensayo de dureza: Para realizar esta prueba, se seleccionó al azar una muestra de anillo muescado para cada sistema de tubería, de los cuales, se obtuvo la lectura de la dureza Shore D de la capa externa. Este proceso se realizó bajo los lineamientos de la norma ASTM D2240-05¹⁹ (equivalente a NTC 2524²⁰), y se utilizó un durómetro análogo marca Bareiss con indentador tipo D, disponible en el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP). Los resultados se presentan en el siguiente capítulo.

3.3.2 Obtención de muestras con daño superficial simulado. En esta etapa, se afectaron muestras de tubería no afectada por inducción de rayaduras sobre la capa externa, teniendo en cuenta algunos parámetros descritos en la norma ASTM D7027-05⁴³, la cual, evalúa la resistencia al rayado de recubrimientos poliméricos y plásticos. Se hizo la caracterización y evaluación física de las muestras afectadas, mediante microscopía cofocal.

3.3.2.1 Afectación de muestras por rayaduras: Para el desarrollo de la presente investigación, se identificaron las rayaduras como uno de los daños de mayor frecuencia presentados en la superficie externa de las tuberías¹², y de importancia e interés para su estudio. Teniendo en cuenta las características físicas

¹⁸ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard practice for determining dimensions of "fiberglass" (glass-fiber-reinforced thermosetting resin) pipe and fittings. Reapproved 2011. ASTM International, 2010. 4 p. ASTM D3567-97.

¹⁹ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for rubber property—durometer hardness. Reapproved 2010. ASTM International, 2010. 13 p. ASTM D2240-05.

²⁰ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Plásticos y ebonita. Determinación de la dureza por penetración (indentación) mediante un durómetro (dureza shore). Primera actualización. Bogotá, D.C.: ICONTEC, 1997. 8 p. NTC 2524.

⁴³ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for evaluation of scratch resistance of polymeric coatings and plastics using an instrumented scratch machine. ASTM International, 2005. 8 p. ASTM D7027-05.

¹² DUARTE. Gloria Isabel y MANRIQUE. Miguel Antonio. Guía recomendada para selección y uso de tuberías de materiales compuestos para aplicación en líneas de flujo de la VPR. Piedecuesta, ECOPETROL S.A. 2012. 85 p.

superficiales de este daño, se evidenció y recopiló información acerca de su presencia en las tuberías flexibles, durante una visita técnica realizada al campo petrolero “La Cira-Infantas” en la ciudad de Barrancabermeja. Se anexa el formato utilizado en la inspección, incluyendo registro fotográfico (ver anexo A).

Con el fin de evaluar el efecto sobre las propiedades mecánicas de las tuberías, con variables como el espaciamiento entre rayaduras y profundidad de rayado, se planteó un diseño de experimentos, estableciendo dos niveles de afectación (alto y bajo) por cada variable (ver tablas 6 y 7).

Tabla 6. Variables y niveles de afectación seleccionados.


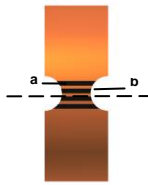
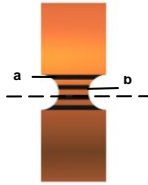
VARIABLES		NIVELES DE AFECTACIÓN (N.A)	
		Bajo	Alto
A	Profundidad de la rayadura (porcentaje respecto al espesor de la capa externa)	10%	50%
B	Espaciamiento entre rayaduras	2.0 mm	3.0 mm
C	Sistema de tubería	Sistema I	Sistema II

Tabla 7. Diseño de experimentos planteado.

COMBINACIÓN DE VARIABLES		VARIABLES		
		Profundidad de la rayadura	Espaciamiento entre rayaduras	Sistema de tubería
1	N.A	Bajo	Bajo	Bajo
	Equivalencia	10%	2.0 mm	Sistema I
A	N.A	Alto	Bajo	Bajo
	Equivalencia	50%	2.0 mm	Sistema I
B	N.A	Bajo	Alto	Bajo
	Equivalencia	10%	3.0 mm	Sistema I
C	N.A	Bajo	Bajo	Alto
	Equivalencia	10%	2.0 mm	Sistema II
AB	N.A	Alto	Alto	Bajo
	Equivalencia	50%	3.0 mm	Sistema I
AC	N.A	Alto	Bajo	Alto
	Equivalencia	50%	2.0 mm	Sistema II
BC	N.A	Bajo	Alto	Alto
	Equivalencia	10%	3.0 mm	Sistema II
ABC	N.A	Alto	Alto	Alto
	Equivalencia	50%	3.0 mm	Sistema II

Adicionalmente, se establecieron ocho (8) parámetros fijos de operación de rayado, los cuales, se indican en detalle en la tabla 8.

Tabla 8. Parámetros fijos operativos durante la afectación.

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	Anillo muescado	
	<p>Adyacentes a la curvatura de las muescas (Centradas solamente en una sección reducida).</p> 	
Longitud de las rayaduras	Espaciamiento = 2.0 mm a = 16.3 mm b = 14.2 mm 	Espaciamiento = 3.0 mm a = 23.0 mm b = 14.5 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	

Todas las muestras fueron rayadas en un torno convencional de mecanizado industrial, por medio de un buril 3/8" de acero rápido aleado con cobalto, y bajo condiciones controladas de operación, previa calibración del equipo.

3.3.2.2 Caracterización de tubería afectada por microscopía cofocal: Una vez finalizada la afectación de las muestras, se llevó a cabo el análisis superficial de las rayaduras en el microscopio digital HIROX KH-7700, con el cual, se obtuvo reconstrucciones tridimensionales e imágenes de las rayaduras inducidas en la capa externa. Se seleccionaron cuatro (4) probetas de anillos muescados para cada sistema de tubería con diferentes condiciones de rayado en la capa, las cuales, fueron observadas al microscopio en aumentos de 140x, 70x y 35x en campo oscuro y normal respectivamente.

Así mismo, se tomaron para el análisis de las rayaduras dos (2) puntos diferentes a lo largo de las mismas. Los resultados se presentan en el capítulo cuatro.

3.3.3 Aplicación de técnicas seleccionadas. Con base en las pruebas fisicomecánicas seleccionadas, se aplicó el ensayo de resistencia a la tensión por anillo muescado. Así mismo, una vez efectuado este ensayo, se realizó la revisión de las probetas, incluyendo registro fotográfico.

3.3.3.1 Ensayo de resistencia a la tensión por anillo muescado: Empleando la máquina de ensayos universal marca AutoGraph (AG-I Shimadzu), perteneciente al laboratorio de Caracterización de Materiales de la Universidad Santo Tomás de Aquino (USTA), se llevaron a cabo tres (3) pruebas por cada condición de ensayo para tubería no afectada y afectada (15 anillos muescados por cada sistema de tubería), siguiendo la norma ASTM D2290-12 (procedimiento A)⁴⁰, el cual, determina la tensión aparente plásticos tubulares y plásticos reforzados. Los resultados se muestran en el siguiente capítulo.

⁴⁰ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for apparent hoop tensile strength of plastic or reinforced plastic pipe. ASTM International, 2012. 8 p. ASTM D2290-12.

3.4 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta fase de la investigación, se presentaron y analizaron los resultados obtenidos durante el desarrollo de las actividades, buscando establecer una comparación entre las propiedades fisicomecánicas sin y con afectación por rayaduras inducidas en la superficie externa de los sistemas de tubería.

3.5 SOCIALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Finalmente, con todos los resultados obtenidos y analizados, conclusiones y recomendaciones derivadas del trabajo experimental, se llevó a cabo la elaboración y presentación del informe final del trabajo de grado.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos en cada una de las etapas llevadas a cabo durante la fase experimental de la presente investigación, y su respectivo análisis.

4.1 SELECCIÓN DE PRUEBAS

En la tabla 9, se presentan las tres (3) pruebas fisicomecánicas seleccionadas para la evaluación de tubería flexible con refuerzo no metálico. Se incluyen en la tabla la designación y nombre de la norma, equivalencias con otras normas, breve descripción de su contenido, aspectos técnicos y económicos analizados en la selección, y la disponibilidad de equipos y accesorios para su realización.

En la tabla 9 se aprecia la facilidad de aplicación y relativo bajo costo de las técnicas de determinación de dimensiones y dureza. Pese a su costo, la prueba de resistencia a la tensión por anillo muescado se seleccionó por considerarse fundamental para el presente estudio.

Aunque se dispuso del equipo básico para el desarrollo de la prueba de tensión por anillo muescado, fue necesario diseñar y fabricar los accesorios exclusivos para estos tipos de tubería, indicados en la norma ASTM D2290⁴⁰.

4.2 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 no afectada, obtención de muestras con daño superficial simulado y

⁴⁰ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for apparent hoop tensile strength of plastic or reinforced plastic pipe. ASTM International, 2012. 8 p. ASTM D2290-12.

aplicación de técnicas seleccionadas. A continuación se presentan los resultados con su respectivo análisis de cada una de estas etapas.

Tabla 9. Pruebas fisicomecánicas seleccionadas para la presente investigación.


Prueba	Designación y nombre de la norma	Normas equivalentes	Resumen	Aspectos técnicos / económicos	Disponibilidad para efectuar el ensayo
DETERMINACIÓN DE DIMENSIONES	ASTM D3567 – 97 (Reapproved 2011) Standard Practice for Determining Dimensions of “Fiberglass” (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting Resin) Pipe and Fittings [18].	-	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.	DISPONIBLE
DUREZA	ASTM D2240-05 (Reapproved 2010). Standard Test Method for Rubber Property — Durometer Hardness [19].	NTC 2524 [20] ISO 868 (Shore)[21] ASTM D2583-13a (Barcol)[22]	Esta prueba permite determinar la dureza por penetración de materiales termoplásticos.	Este ensayo debe realizarse mediante durómetro tipo Shore D. Bajo costo Fácil y rápida manipulación del durómetro.	DISPONIBLE
RESISTENCIA A LA TENSIÓN POR ANILLO MUESCADO	ASTM D2290-12 Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe. (Procedure A) [40]	NTC 4392 [41]	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, y a sean con refuerzo de fibras paralelas, extruidos, o moldeados.	Este ensayo debe realizarse bajo los lineamientos del procedimiento A, (ensayo para determinar la tensión aparente de plásticos tubulares y plásticos reforzados). Costoso	DISPONIBLE

4.2.1 Caracterización de tubería no afectada. Se presentan los resultados obtenidos en la preparación de muestras de tubería no afectada, caracterización y evaluación física por microscopía cofocal y, de los ensayos de dureza y determinación de dimensiones respectivamente.

4.2.1.1 Preparación de muestras de tubería no afectada: Con base en los sistemas de tubería seleccionados (ver detalles en la tabla 5 del capítulo tres), se prepararon las respectivas muestras para llevar a cabo la prueba de resistencia a la tensión por anillo muescado.

En total, se elaboraron treinta (30) probetas, siguiendo los criterios establecidos en la norma ASTM D2290-12⁴⁰. En la tabla 10 se presentan algunas imágenes de las probetas preparadas para cada sistema de tubería, así como las longitudes y cantidades de probetas utilizadas para esta prueba.

Tabla 10. Longitudes y número de muestras de tubería estimadas para el ensayo de resistencia a la tensión por anillo muescado.

SISTEMA DE TUBERÍA	IMÁGENES		Número de Probetas	Longitud total (m)
	Lateral	Frontal		
SISTEMA I			15	0.35
SISTEMA II			15	0.35
Total requerido			30	0.70

Finalizada la preparación de las probetas, se verificó la condición superficial y dimensional de las mismas por inspección visual directa, y las mediciones se hicieron empleando un calibrador convencional.

⁴⁰ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for apparent hoop tensile strength of plastic or reinforced plastic pipe. ASTM International, 2012. 8 p. ASTM D2290-12.

4.2.1.2 Análisis por microscopia cofocal: Se analizaron los cortes transversales de cada sistema de tubería no afectada. A partir de las imágenes se obtuvo 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 11 se presentan las imágenes de los sistemas de tubería con sus respectivas medidas.

La tabla 11 permite observar los valores de los espesores de las capas para cada sistema de tubería. A partir de estas imágenes, se puede describir las diferencias: en el sistema I, se evidenciaron vacíos en la capa intermedia, debido a la estructura trenzada y entrecruzada de la malla de refuerzo, por lo tanto, se mostró heterogeneidad en el espesor de la capa externa, así como se observó homogeneidad en el espesor de la capa interna.

De igual manera, en el sistema II se logró identificar con claridad las tres capas existentes, presentando heterogeneidad en el espesor de la capa externa, pese a que la capa intermedia (malla de refuerzo) se aprecia un enmallado sin vacíos. Se presentó homogeneidad en la capa interna.

4.2.1.3 Determinación de dimensiones: Siguiendo la norma¹⁸, se calculó el diámetro exterior e interior para cada sistema de tubería, teniendo en cuenta la medida del espesor de pared tricapa (ver tabla 11), así como del promedio de las medidas del perímetro exterior respectivo (ver tabla 12). Los resultados de este ensayo se presentan en las tablas 13 y 14.

¹⁸ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard practice for determining dimensions of "fiberglass" (glass-fiber-reinforced thermosetting resin) pipe and fittings. Reapproved 2011. ASTM International, 2010. 4 p. ASTM D3567-97.

Tabla 11. Imágenes de la sección transversal de un anillo muescado.

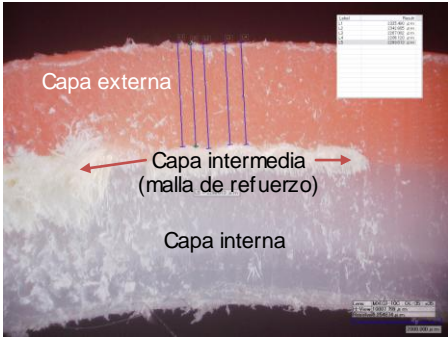
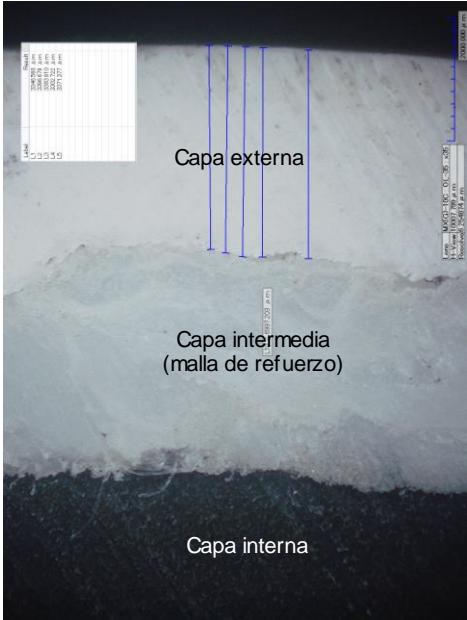
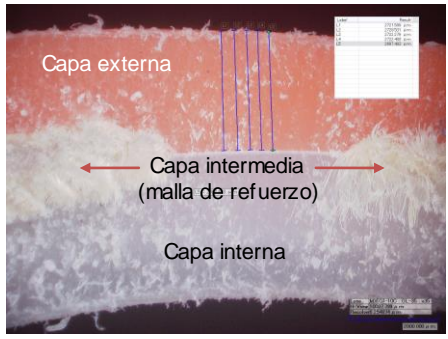
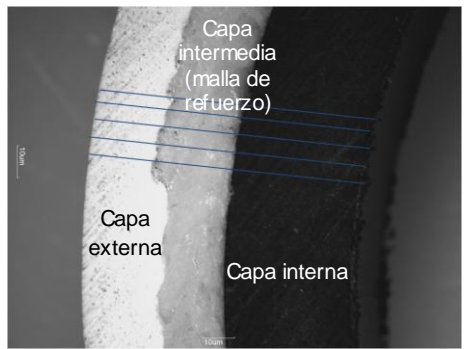
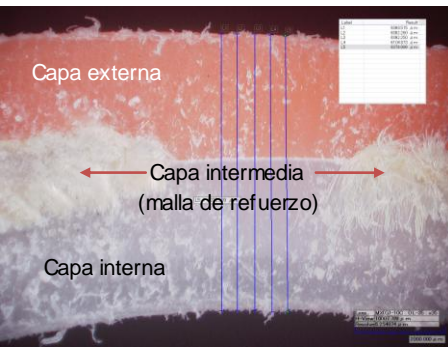
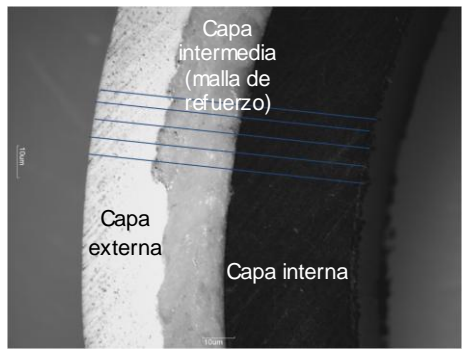
ESPESOR	SISTEMA DE TUBERÍA	
	SISTEMA I	SISTEMA II
ESPESOR CAPA EXTERNA	 <p>Capa externa</p> <p>Capa intermedia (malla de refuerzo)</p> <p>Capa interna</p> <p><i>Espesor prom. = 2.44 mm (2437.48 μm)</i> <i>Aumento = 35x en campo oscuro.</i></p>	 <p>Capa externa</p> <p>Capa intermedia (malla de refuerzo)</p> <p>Capa interna</p> <p><i>Espesor prom. = 3.36 mm (3360.25 μm)</i> <i>Aumento = 35x en campo normal.</i></p>
	 <p>Capa externa</p> <p>Capa intermedia (malla de refuerzo)</p> <p>Capa interna</p> <p><i>Espesor prom. = 2.72 mm (2718.50 μm)</i> <i>Aumento = 35x en campo oscuro.</i></p>	 <p>Capa externa</p> <p>Capa intermedia (malla de refuerzo)</p> <p>Capa interna</p> <p><i>Espesor prom. = 6.09 mm (6093.58 μm)</i> <i>Aumento = 35x en campo oscuro.</i></p>
ESPESOR DE PARED TRICAPA	 <p>Capa externa</p> <p>Capa intermedia (malla de refuerzo)</p> <p>Capa interna</p> <p><i>Espesor prom. = 6.09 mm (6093.58 μm)</i> <i>Aumento = 35x en campo oscuro.</i></p>	 <p>Capa intermedia (malla de refuerzo)</p> <p>Capa externa</p> <p>Capa interna</p> <p><i>Espesor prom. = 13.03 mm (13032.58 μm)</i> <i>Aumento = 35x en campo normal.</i></p>

Tabla 12. Medidas del perímetro exterior por sistema de tubería.

SISTEMA DE TUBERIA											
SISTEMA I						SISTEMA II					
Puntos de medida Perímetro Exterior (in)					C_{De} (in)	Puntos de medida Perímetro Exterior (in)					C_{De} (in)
1	2	3	4	5		1	2	3	4	5	
7.46	7.48	7.47	7.47	7.48	7.47±0.01	12.17	12.20	12.20	12.17	12.19	12.19±0.02

Para determinar el diámetro exterior se utilizó la fórmula:

$$De = C_{De}/\pi \quad (10)$$

Donde: 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 13. Diámetro exterior por sistema de tubería.

SISTEMA DE TUBERIA	
SISTEMA I	SISTEMA II
$De = C_{De}/\pi$	$De = C_{De}/\pi$
$De = 7.47(in)/\pi$	$De = 12.19(in)/\pi$
$De = 2.38(in)$	$De = 3.88(in)$

Para determinar el diámetro interior se utilizó la fórmula:

$$d = De - 2T_a \quad (11)$$

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 14. Diámetro interior por sistema de tubería.

SISTEMA DE TUBERIA						
SISTEMA I			SISTEMA II			
Dato	Esesor pared tricapa (T_a) = 6.09 mm (0.24 in)			Dato	Esesor pared tricapa (T_a) = 13.03 mm (0.51 in)	
$d = De - 2T_a$ $d = 2.38$ (pulgadas) - 2(0.24 (in)) $d = 1.90$ (in)			$d = De - 2T_a$ $d = 3.88$ (pulgadas) - 2(0.51 (in)) $d = 2.86$ (in)			

Con base en los diámetros reportados por el fabricante (ver anexos B y C), se encontró que los valores obtenidos para el sistema I y II difieren aproximadamente en 1.0% del valor indicado. Así, se determina, que los resultados obtenidos son acordes a las especificaciones de la tubería, pues la mayoría de los datos se hallan dentro las dimensiones establecidas, según el manual del proveedor^{13, 14}.

4.2.1.4 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 norma¹⁹. En la tabla 15, se indican los resultados obtenidos del ensayo para los dos sistemas de tubería en estudio.

Tabla 15. Valores de dureza obtenidos.

Condiciones estándar de ensayo												
Carga:44.64 N			Tiempo:25 s			Temperatura: 24°C			Humedad: 58 %			
SISTEMA I						SISTEMA II						
Puntos de medida de Dureza (Shore D)					Dureza _{prom} (Shore D)	Puntos de medida de Dureza (Shore D)					Dureza _{prom} (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	

¹³ [Página Web], KISHNER, Israel. Pskcolombia. 2011.

<[http://pskcolombia.com.co/PSK_2012/PSK_RECursos_files/THERMOFLEXSPANOL\(2011\).pdf](http://pskcolombia.com.co/PSK_2012/PSK_RECursos_files/THERMOFLEXSPANOL(2011).pdf) (2011) >.

¹⁴ DALMOLEN, Bert. Reinforced Thermoplastic Pipeline (RTP) Systems. Amsterdam, For 23rd World Gas Conference. 2006.

¹⁹ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for rubber property—durometer hardness. Reapproved 2010. ASTM International, 2010. 13 p. ASTM D2240-05.

Los resultados obtenidos permiten establecer que 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 de la capa externa en cada uno de los sistemas, siendo de mayor dureza el Polipropileno (PP) que el Polietileno de Alta Densidad (PEAD)⁴⁴.

4.2.2 Obtención de muestras con daño superficial simulado. A continuación se presentan los resultados obtenidos en la caracterización por microscopía confocal de ambos sistemas de tubería afectados por rayaduras inducidas, siguiendo los parámetros descritos en la norma⁴³.

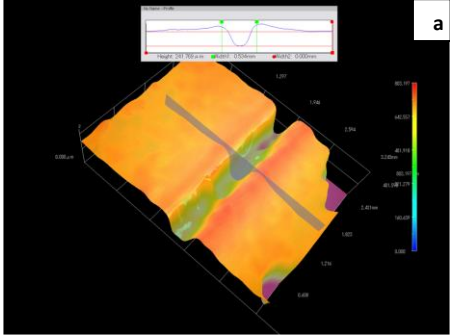
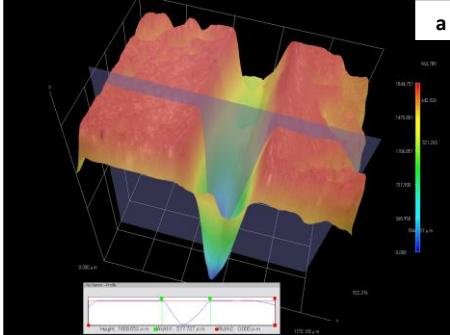
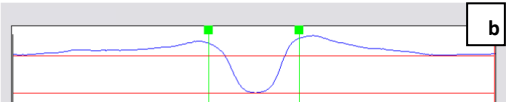
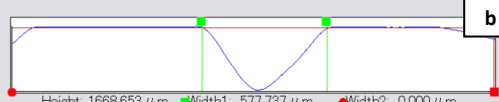

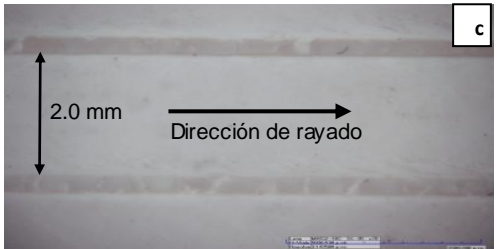
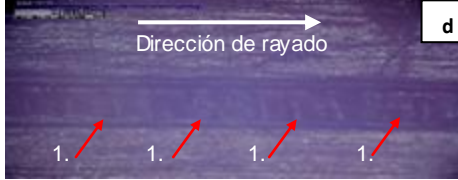
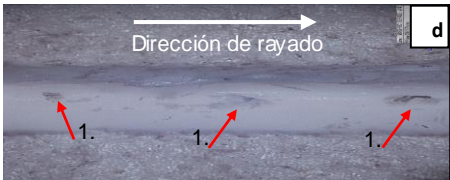
4.2.2.1 Caracterización de tubería afectada por microscopía cofocal: De acuerdo a los niveles de afectación establecidos en el diseño experimental (ver tabla 6 del capítulo tres) se sometieron a caracterización microscópica los sistemas de tubería, por medio del microscopio digital HIROX KH-7700. En la tabla 16 se presenta un ejemplo de los resultados obtenidos de las rayaduras inducidas en cada sistema de tubería.

Bajo las mismas condiciones en el sistema II, se obtuvo una profundidad de rayadura mayor, lo cual, muestra una mayor facilidad de penetración y alta ductilidad para este material. El comportamiento del sistema I se debe probablemente a la composición de la capa externa, la cual está fabricada en polipropileno.

⁴⁴ NICHOLSON, J. The chemistry of polymers. 3 ed. 2006.

⁴³ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for evaluation of scratch resistance of polymeric coatings and plastics using an instrumented scratch machine. ASTM International, 2005. 8 p. ASTM D7027-05.

Tabla 16. Características generales de las rayas inducidas en los sistemas de tubería.

		Sistema de tubería	
		SISTEMA I	SISTEMA II
Características generales de las rayaduras	Profundidad	 <p>Profundidad aprox. = 0.24 mm (241.769 μm) Aumento = 140x en campo oscuro.</p>	 <p>Profundidad aprox. = 1.67 mm (1668.653 μm) Aumento = 140x en campo normal</p>
	Altura de hombros y ancho del surco	 <p>Height: 241.769 μm Width1: 0.534mm Width2: 0.000mm</p> <p>Altura de hombros = Pronunciada Ancho del surco = 0.53mm</p>	 <p>Height: 1668.653 μm Width1: 577.737 μm Width2: 0.000 μm</p> <p>Altura de hombros = No se presenta. Ancho del surco = 0.58 mm (577.737 μm)</p>
	Espaciamiento y dirección de rayado	 <p>Espaciamiento entre rayaduras = 2.0 mm Aumento = 70x en campo oscuro.</p> <ol style="list-style-type: none"> Blanqueamiento en los contornos del surco. Proa (fin del rayado) Protuberancias procedentes de la matriz de polipropileno. 	 <p>Espaciamiento entre rayaduras = 2.0 mm Aumento = 70x en campo normal.</p>
	Forma superficial de la rayadura en el fondo del surco	 <p>Aumento = 140x en campo oscuro.</p> <ol style="list-style-type: none"> Marcas de playa en el fondo del surco. 	 <p>Aumento = 140x en campo normal.</p> <ol style="list-style-type: none"> Remoción y deslizamiento de partículas procedente de la matriz de polietileno.

Por efecto del rayado, se aprecia una notoria decoloración en las zonas de mayor deformación, con desprendimiento de material y presencia de mayor altura de hombros. Este fenómeno fue significativo para el sistema I, lo cual es característico de la rigidez y la poca recuperación que presenta el material. Para el sistema II, no hay presencia de hombros, lo cual es representativo de materiales dúctiles y con buena capacidad de deformación elástica, debido a las propiedades típicas del polietileno de alta densidad.

La forma superficial de la rayadura en el fondo del surco para el sistema I, mostró forma de marcas de playa, esto sugiere que a medida que avanza la raya, el material se estira en la dirección del rayado y se producen pequeñas grietas perpendiculares a la dirección del rayado. Esto podría dar inicio al crecimiento de grietas a lo largo de la tubería^{45, 46}. Para el sistema II se aprecia remoción y deslizamiento de partículas procedentes de la matriz de polietileno de alta densidad.

4.2.3 Aplicación de técnicas seleccionadas. En esta sección se presentan los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a la tensión por anillo muescado. Se incluyen los análisis pertinentes y evaluación física de las fallas ocurridas en las probetas por sistema de tubería, mediante registro fotográfico.

4.2.3.1 Ensayo de resistencia a la tensión por anillo muescado: Los valores obtenidos en esta etapa para la tubería no afectada de los sistemas estudiados se muestran en la tabla 17, los cuales, se utilizaron como datos de referencia para el análisis de las variaciones en las propiedades mecánicas de los sistemas de tubería afectada. En estas se presentan los valores promedio de tres (3) ensayos realizados para cada propiedad mecánica evaluada. Todos los valores obtenidos

⁴⁵ JIANG. Han, BROWNING. Robert and SUE. Hung-Jue. Understanding of scratch - induced damage mechanisms in polymers. Elsevier Science Technology. 2006. 10 p.

⁴⁶ ROSA SIERRA. Alberto, SANCHEZ SOTO. Miguel y GONZÁLEZ MADARIAGA. Francisco. Ensayo de rayado de los componentes plásticos bicapa rígido – flexibles usados en el diseño de electrodomésticos y herramientas tipo soft touch. Revista No. 5. Revista de arquitectura, diseño y urbanismo. 2008. 12 p.

en los ensayos se muestran en el anexo D. Así mismo, en los anexos E y F se presentan la secuencia de la deformación para un anillo sin daño inducido por cada sistema de tubería, durante la ejecución de este ensayo.

Tabla 17. Propiedades mecánicas promedio obtenidas para sistema de tubería no afectada.

SISTEMA DE TUBERÍA	PROPIEDADES MECÁNICAS			CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN
	Deformación unitaria (ϵ)	Grado de rigidez (L-bifin)	Esfuerzo último a la tensión (UTS) (psi)	
SISTEMA I	0.50±0.03	9027.33±574.12	3658.29±349.97	
SISTEMA II	1.45±0.18	7203.72±510.00	2896.58±208.20	

De la observación de los resultados de la tabla 17, se puede afirmar que los sistemas presentaron un comportamiento mecánico típico de los plásticos

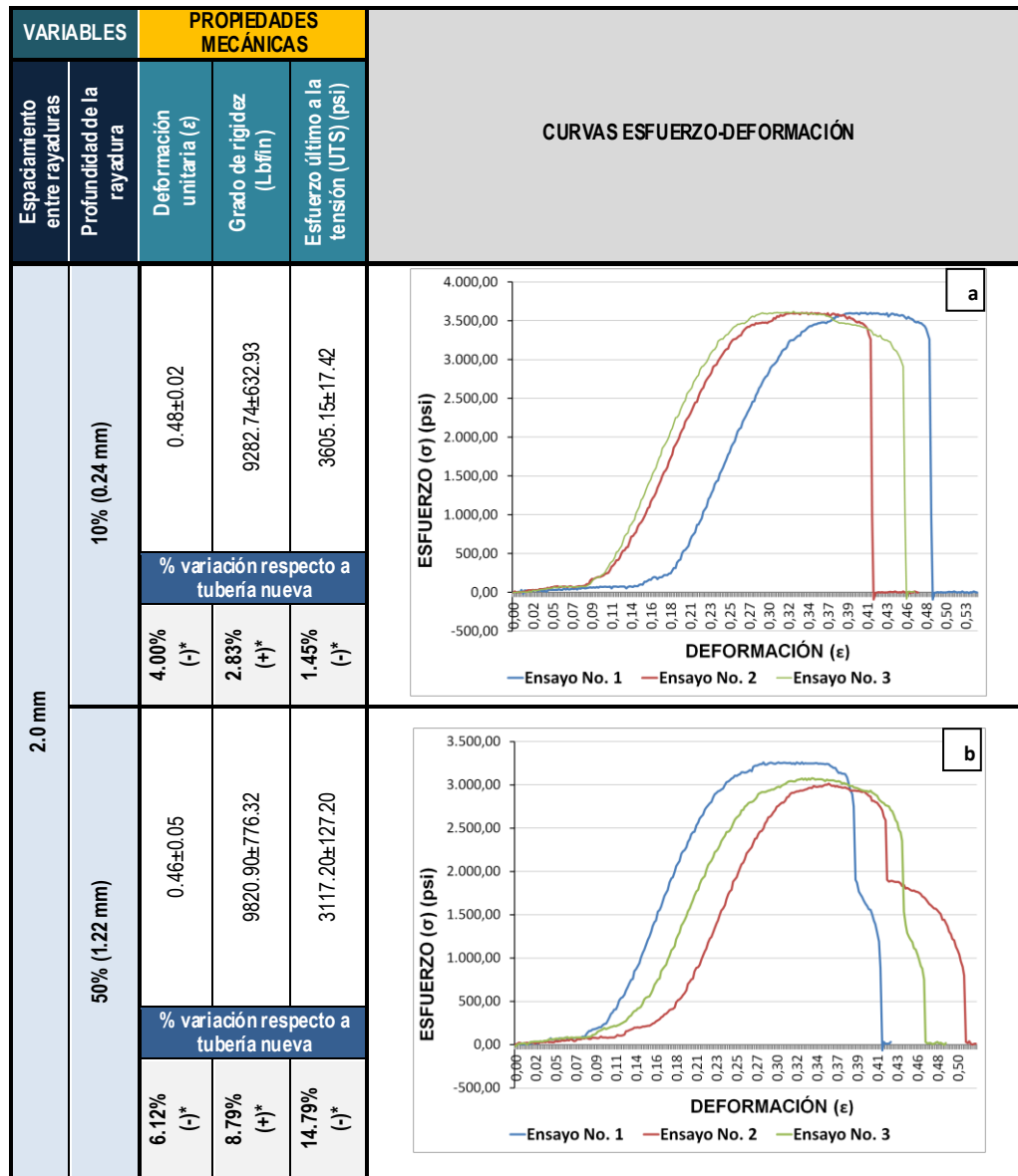
reforzados con fibras (ver tabla 2 del capítulo dos), siendo este más abrupto en el caso del sistema I (ver figura a.), en comparación con el sistema II, el cual presentó una deformación mayor (ver figura b.). El sistema I presentó mayor valor en cuanto al grado de rigidez y esfuerzo último a la tensión, en comparación con el sistema II, lo cual, está acorde con la constitución tricapa indicada para cada uno de estos sistemas en la tabla 5 del capítulo tres, así como las propiedades mecánicas de los materiales individuales indicadas en el marco teórico (ver tabla 1 del capítulo dos).

En las curvas esfuerzo - deformación se observan tres (3) cambios de 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 (ver anexos E y F).

En las tablas 18, 19, 20 y 21 se presentan los resultados obtenidos para los sistemas de tubería afectada, en ellas se aprecian los valores de espaciamiento entre las rayaduras, profundidad de rayado, las diferentes características mecánicas estudiadas (deformación unitaria (ϵ), grado de rigidez 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. De igual manera, en los anexos E y F se presentan la secuencia del ensayo para cada sistema de tubería afectada, en comparación con tubería no afectada de estos sistemas.

A continuación, en las tablas 18 y 19 se muestran los resultados promedio de las propiedades mecánicas para el sistema de tubería I afectado por rayaduras inducidas, con espaciamiento de 2.0 y 3.0 mm, respectivamente. Los demás resultados obtenidos en estos ensayos se muestran en los anexos G, H, I y J.

Tabla 18. Propiedades mecánicas promedio obtenidas para sistema de tubería I, afectado a 2.0 mm de espaciamento.



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

La profundidad en las rayaduras al 10% y 50% para un espaciamento 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. Por el contrario, se presentó un aumento en los resultados para el grado de rigidez, debido a la naturaleza

típica del material. Las variaciones fueron mayores para el 50% de profundidad en las rayas.

Tabla 19. Propiedades mecánicas promedio obtenidas para sistema de tubería I, afectado a 3.0 mm de espaciamento.

VARIABLES		PROPIEDADES MECÁNICAS			CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN
Espaciamento entre rayaduras	Profundidad de la rayadura	Deformación unitaria (ϵ)	Grado de rigidez (Lb/in)	Esfuerzo último a la tensión (UTS) (psi)	
3.0 mm	10% (0.24 mm)	0.47±0.06	9376.85±7.21	3616.66±175.45	
	% variación respecto a tubería nueva		4.08% (-)*	3.87% (+)*	
3.0 mm	50% (1.22 mm)	0.43±0.07	9819.67±774.20	3041.04±93.00	
	% variación respecto a tubería nueva		12.24% (-)*	8.77% (+)*	

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

Para una distancia entre rayas de 3.0 mm y con profundidades de rayado en 10% y 50%, los resultados mostraron una disminución de la deformación unitaria y el

esfuerzo último a la tensión, siendo más significativa la variación para el 50%. Por otra parte, el grado de rigidez aumentó en los dos casos, siendo más significativo el aumento para la profundidad al 50%. Los resultados presentados se pueden asociar a un aumento en la rigidez del material y disminución en la resistencia última a la tensión, cuando la profundidad de las rayaduras cambia del 10% al 50%. Esto se debe a la presencia de mayor daño, cuando la profundidad de rayado aumenta.

Por otra parte, la variación del espaciamiento en ambas profundidades de rayado modificó levemente las características mecánicas, con una tendencia constante en el orden del 4.00% en la deformación unitaria al 10% de profundidad de rayado, de 8.70% de variación en el grado de rigidez para una profundidad de 50%, y con una variación de 1.40% en el esfuerzo último a la tensión al 50% de rayado inducido, mostrando de esta manera menor influencia de esta variable, sobre las propiedades mecánicas analizadas.

En las tablas 20 y 21 se muestran los resultados promedio de las propiedades mecánicas para el sistema de tubería II afectado por rayaduras inducidas, con espaciamiento a 2.0 y 3.0 mm, respectivamente. Los demás resultados obtenidos en estos ensayos se muestran en los anexos G, H, I y J.

Tabla 20. Propiedades mecánicas promedio obtenidas para sistema de tubería II, afectado a 2.0 mm de espaciamiento.

VARIABLES		PROPIEDADES MECÁNICAS			CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN
Espaciamiento entre rayaduras	Profundidad de la rayadura	Deformación unitaria (ε)	Grado de rigidez (L.bffin)	Esfuerzo último a la tensión (UTS) (psi)	
2.0 mm	10% (0.34 mm)	1.08±0.14	7763.27±311.88	2781.09±209.79	
	% variación respecto a tubería nueva		25.52% (-)*	7.77% (+)*	
2.0 mm	50% (1.68 mm)	1.25±0.04	7886.19±209.96	2495.03±81.21	
	% variación respecto a tubería nueva		13.79% (-)*	9.47% (+)*	

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

La profundidad en las rayaduras al 10% y 50% con respecto al espesor 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. En cuanto al grado de rigidez, la presencia de este daño produjo un aumento, del

7.77% para profundidad de rayado de 10%, y 9.47% para profundidad correspondiente al 50%.

Tabla 21. Propiedades mecánicas promedio obtenidas para sistema de tubería II, afectado a 3.0 mm de espaciamiento.

VARIABLES		PROPIEDADES MECÁNICAS			CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN
Espaciamiento entre rayaduras	Profundidad de la rayadura	Deformación unitaria (ϵ)	Grado de rigidez (Lb/in)	Esfuerzo último a la tensión (UTS) (psi)	
3.0 mm	10% (0.34 mm)	1.12±0.18	7280.78±549.34	2600.18±445.22	
		% variación respecto a tubería nueva			
		22.76% (-)*	1.07% (+)*	10.23% (-)*	
3.0 mm	50% (1.68 mm)	1.07±0.10	6867.66±505.99	2174.20±316.25	
		% variación respecto a tubería nueva			
		26.21% (-)*	4.66% (-)*	24.94% (-)*	

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

Para una distancia entre rayaduras de 3.0 mm y con profundidades de rayado del 10% y 50%, los resultados mostraron una disminución considerable de la

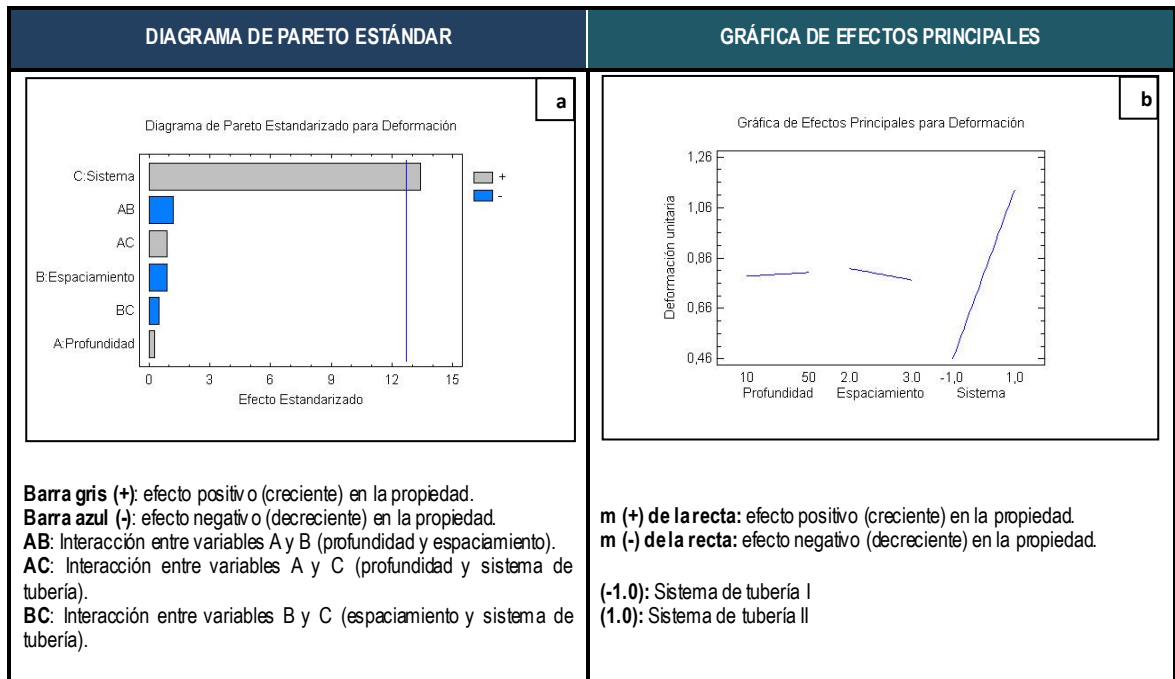
deformación unitaria, siendo más alta para una profundidad del 50%, así mismo, este comportamiento se presentó para el esfuerzo último a la tensión. Los resultados obtenidos para el grado de rigidez muestran un aumento del 1.07% para una profundidad del 10%, y una disminución de 4.66% para el 50% de profundidad.

Los resultados presentados para el 50% concuerdan con el mayor daño ocasionado en el material, por la profundidad de las rayas, siendo la variable de espaciamiento entre ellas poco relevante en la variación de las propiedades mecánicas.

4.2.3.2. Análisis estadístico de datos: Los datos de las propiedades mecánicas obtenidas experimentalmente para sistema de tubería afectada, se analizaron mediante el software estadístico STATGRAPHICS Centurion XVI.II, con un nivel de confiabilidad del noventa y cinco por ciento (95%) en el manejo de datos. Esto con el fin de conocer la influencia de las variables de profundidad de rayado, espaciamiento entre rayaduras y sistema de tubería, sobre las propiedades mecánicas.

A continuación, en las tablas 22, 23 y 24 se presentan las gráficas de modelos estimados (diagramas de Pareto estandarizado y gráficas de efectos principales) para las propiedades mecánicas de deformación unitaria (ϵ), grado de rigidez y esfuerzo último a la tensión (UTS), respectivamente.

Tabla 22. Gráficas de modelos estimados para deformación unitaria (ϵ).

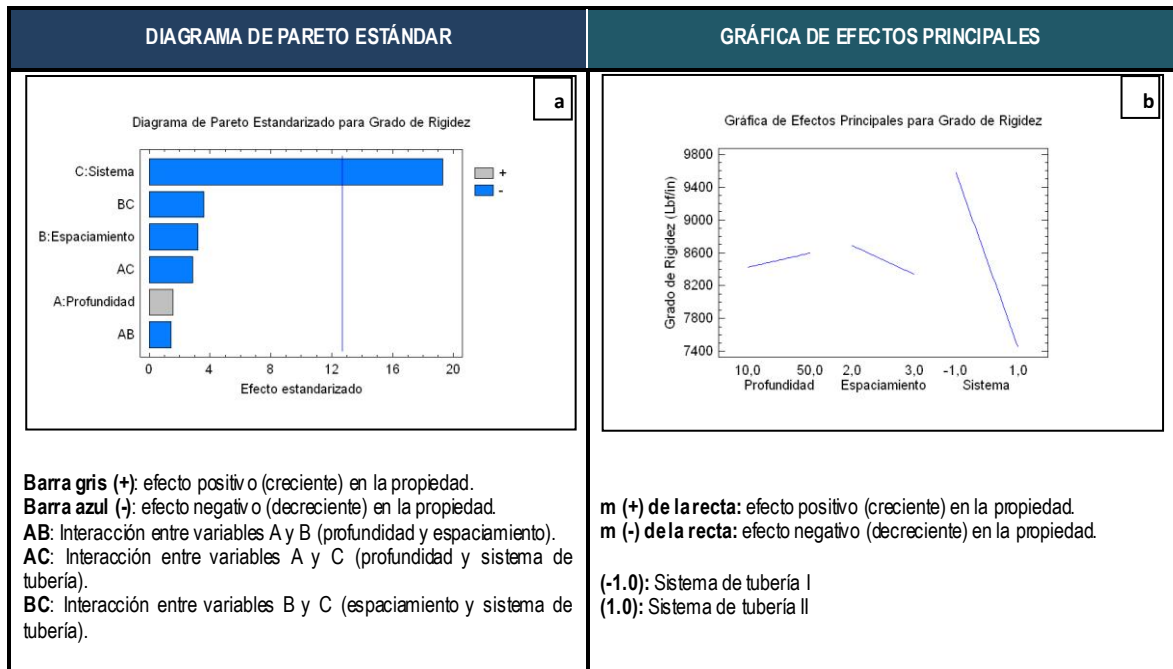


En la tabla 22, el diagrama de Pareto estandarizado (figura a.), indica una baja influencia (efecto negativo) tanto del espaciamiento entre rayas (variable B), así como la interacción entre las variables A-B y B-C, sobre la deformación unitaria. La profundidad de rayado (variable A) y el sistema de tubería (variable C) presentaron un efecto positivo (influyente), lo cual, indica que en el sistema tuvo efectos significativos, sobre la deformación unitaria.

Lo anterior se ratifica con la gráfica de efectos principales (figura b.), en la cual, se aprecia la baja influencia de las variables A y B, representada en las pendientes de las rectas con tendencias a ser constantes. La variable C (tipo de tubería) presentó un efecto positivo influyente, representado por la pendiente positiva de la recta (creciente), presentando una mayor deformación para el sistema de tubería II. Se demuestra que el sistema tiene efecto significativo sobre la variable de respuesta (deformación).

Como se indicó, este modelo de comportamiento mecánico para la deformación demostró una influencia significativa para los sistemas de tubería ensayados. Así mismo, el porcentaje de confiabilidad arrojado por el software estadístico fue de 99.46%, en la variabilidad de la deformación unitaria.

Tabla 23. Gráficas de modelos estimados para grado de rigidez.

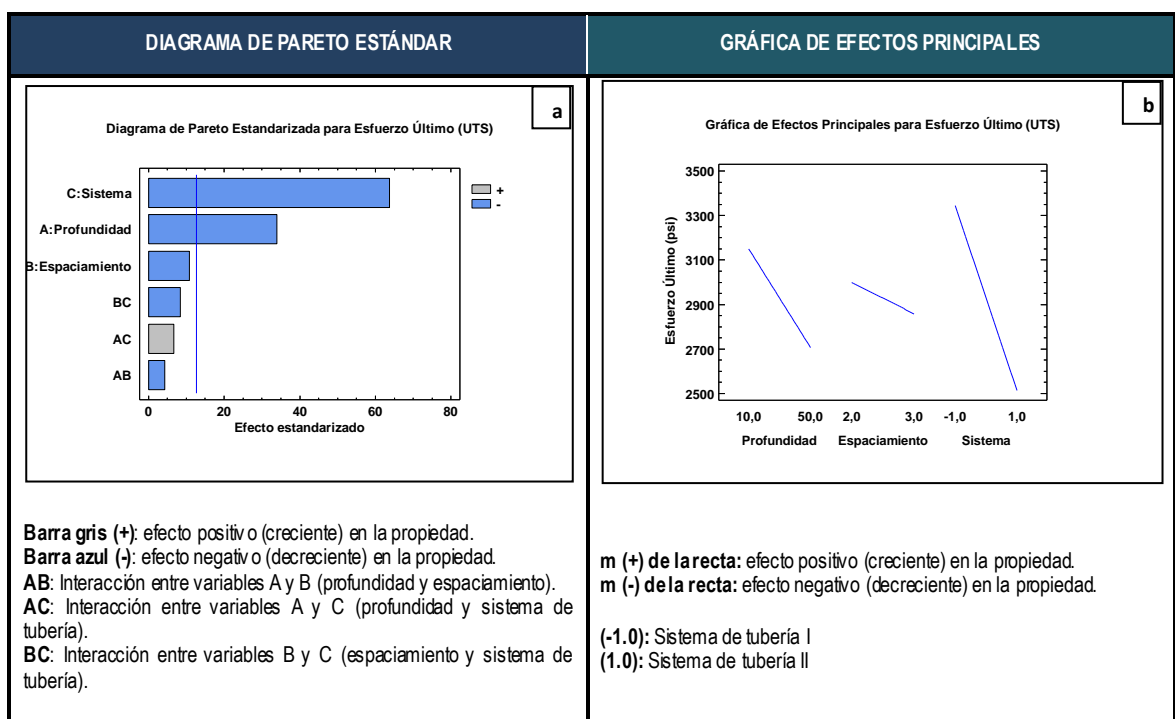


En la tabla 23, se aprecia en el diagrama de Pareto estándar junto con la gráfica de efectos principales, un efecto negativo significativo del sistema de tubería (variable C), sobre el grado de rigidez, debido a la diferencia en las propiedades mecánicas de los materiales componentes en cada sistema de tubería. El espaciamiento entre rayaduras (variable B) presentó un efecto negativo, pero no influyente, lo cual demuestra que la separación, así como la densidad o número de rayaduras presentes en la superficie de capa externa no influyeron sobre esta propiedad. Por el contrario, la profundidad de rayado (variable A) presentó un efecto positivo no influyente sobre esta propiedad.

Lo anterior se comprueba a partir de la gráfica de efectos principales (figura b.), donde se aprecia el marcado efecto de la variable C, representada por la pendiente negativa de la recta (decreciente), debido a la diferencia en la rigidez del material de fabricación en los sistemas de tubería. De igual manera, se comprobó que las variables A y B no fueron significativas para esta propiedad.

El porcentaje de confiabilidad para este modelo arrojó el 99,75% en la variabilidad en el grado de rigidez.

Tabla 24. Gráficas de modelos estimados para esfuerzo último a la tensión (UTS).



En la tabla 24, el diagrama de Pareto estándar (figura a.) muestra un gran efecto negativo del sistema de tubería (variable C) de manera significativa e influyente, mostrando que el esfuerzo último a la tensión se afecta por el tipo de sistema de tubería, debido a que se trata de materiales diferentes. De igual manera, para la profundidad de rayado (variable A), se presentó un efecto significativo e influyente

sobre el esfuerzo último a la tensión, a medida que esta aumenta. El espaciado entre rayaduras (variable B), así como la interacción de las variables B-C, presentaron un menor efecto negativo, los cuales, indican que estas no influyeron de manera tan significativa en la variación de esta propiedad.

Lo anterior se comprueba con la gráfica de efectos principales (figura b.), en donde se aprecia el alto efecto de la variable C representada por la pendiente negativa de la recta (decreciente), debido al material constituyente de cada uno de los sistemas de tubería (ver tablas 1 y 5). De igual forma, la variable A presentó el mismo comportamiento, causado por el incremento en la profundidad de las rayas. La variable B se mostró como un factor no significativo.

Este modelo de comportamiento mecánico indicó el efecto del sistema de tubería sobre el esfuerzo último a la tensión, como ya se ha indicado anteriormente, debido a las diferencia en las propiedades mecánicas de los materiales componentes de estos sistemas.

Para este caso, el porcentaje de confiabilidad arrojado por el software estadístico, fue del orden del 99,98% de la variabilidad en esfuerzo último a la tensión.

En general, en cuanto al manejo de datos en la variabilidad de las propiedades mecánicas, estos modelos arrojaron un porcentaje de confiabilidad promedio en el software estadístico del 99.73%.

5. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos experimentalmente en especímenes de tubería compuesta flexible con refuerzo no metálico, se derivan a continuación las siguientes conclusiones:

- La determinación de dimensiones, la dureza Shore D y la resistencia a la tensión por anillo muescado, fueron los ensayos fisicomecánicos seleccionados para aplicar a la tubería compuesta flexible con y sin daño superficial inducido, teniendo en cuenta criterios técnicos y económicos.
- Se realizó la caracterización de tubería nueva (sin daño inducido), mediante microscopía cofocal, y las pruebas fisicomecánicas de determinación de dimensiones, dureza Shore D y ensayo de tensión por anillo muescado, siguiendo las respectivas normas técnicas. Los resultados obtenidos se tomaron como referencia para el análisis y el planteamiento de los niveles de afectación por rayaduras inducidas, en el estudio de las propiedades de los sistemas de tubería afectada.
- A partir de las propiedades mecánicas obtenidas experimentalmente para los sistemas de tubería sin afectación, en relación a los porcentajes de variación para cada propiedad en los sistemas afectados, se demostró que el daño inducido por rayaduras en la superficie externa de los dos sistemas de tubería, a profundidades de rayado del 10% y 50%, y espaciamiento entre rayaduras de 2.0 mm y 3.0 mm, afectó sus propiedades mecánicas, presentándose disminución de la deformación y el esfuerzo último a la tensión. Se apreció un leve incremento del grado de rigidez del sistema, el cual, se puede asociar a un aumento en la rigidez del material constituyente de la capa externa.
- Se demostró que el espaciamiento entre rayaduras no fue significativo en la variación de las propiedades mecánicas para los sistemas de tubería

estudiados en esta investigación, siendo más influyente la profundidad de rayado sobre estas.

- Con base en el registro fotográfico de las secuencias presentadas en los anexos E y F, se observó que en la zona reducida (entre muescas) de los anillos afectados presentaron estricciones en menor tiempo, en comparación con el anillo sin daño, demostrando que la presencia de rayaduras, como concentradores de esfuerzos, influyen en la variación de las propiedades mecánicas de las tuberías.
- El comportamiento de las curvas esfuerzo - deformación mostró tres cambios de curvatura después del esfuerzo último a la tensión, debido a la ruptura de las capas constitutivas del material compuesto, siendo la capa externa la primera que rompe, asociado a la naturaleza típica del material.
- En el estudio estadístico, se demostró que el sistema de tubería es un factor importante, de manera que, estos resultados coinciden con lo establecido al comienzo de esta investigación, pues se trata de dos tuberías con diferentes materiales, aplicación y alcance.
- La variación de las propiedades mecánicas de los sistemas de tubería, depende directamente del estado superficial externo, especialmente, ante la presencia de entallas superficiales.

6. RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta la ejecución de la metodología experimental, así como los análisis de resultados, se especifican las principales recomendaciones derivadas del presente trabajo de investigación:

- Para el estudio de las variaciones de las propiedades mecánicas por daño mecánico inducido en las superficies de las tuberías compuestas flexibles, se recomienda estudiar los efectos de los daños por entallas superficiales en la capa interna, causados posiblemente por la alta velocidad de flujo de petróleo y gas en el interior de estas líneas, así como de la presencia de partículas abrasivas procedentes del yacimiento.
- Se recomienda afectar la capa a estudiar por inducción de rayaduras, empleando el *scratcher*, con sus respectivos parámetros descritos en la norma ASTM D7027-05⁴³.
- Se recomienda aumentar los porcentajes o niveles de afectación de las rayaduras en las capas externa o interna, de tal manera que comprometan parte o, en su totalidad, el daño en las fibras de refuerzo.
- Si se desea seguir con esta investigación, en relación a la evaluación de las capas constituyentes para ambos sistemas de tubería por ensayos mecánicos de tensión, se recomienda realizar la prueba de resistencia a la tensión por anillo muescado, siguiendo los lineamientos de la norma ASTM D2290-12 (Procedimiento A)⁴⁰, y no por la prueba de tracción de plásticos, con norma ASTM D638-10³⁷. Esto es debido a la separación que ocurre en la estructura multicapa no adherente durante la preparación y corte de las probetas, lo cual, conlleva a que sufran cambios en su estructura, causado por la pérdida de

⁴³ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for evaluation of scratch resistance of polymeric coatings and plastics using an instrumented scratch machine. ASTM International, 2005. 8 p. ASTM D7027-05.

⁴⁰ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for apparent hoop tensile strength of plastic or reinforced plastic pipe. ASTM International, 2012. 8 p. ASTM D2290-12.

³⁷ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for tensile properties of plastics. ASTM International, 2010. 16 p. ASTM D638-10.

material de malla de refuerzo, así como en sus propiedades mecánicas en general. En el anexo K se presentan imágenes de una probeta afectada por la separación de las capas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. FARSHAD, M. Plastic Pipe Systems: Failure investigation and diagnosis. United Kingdom, Elsevier Science Technology. 2006.
- [2]. [Página Web], ARROYAVE POSADA, Carlos Enrique. Corrosión: primer consumidor de acero en el mundo. Colombia. 2013. <<http://www.ecopetrol.com.co/especiales/RevistaInnova7ed/entrevista.htm>>
- [3]. EZRIN. Myer y LAVIGNE. Gary. Unexpected and unusual failures of polymeric Materials. Elsevier Science Technology. 2006.
- [4]. SMITH, William. Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales. 4 ed. McGraw Hill. 2004. 717 p.
- [5]. CALLISTER, William. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. 3 ed. Barcelona, Reverté. 1995. 803 p.
- [6]. ASKELAND, Donald. Ciencia e ingeniería de los materiales. 4 ed. Iberoamericana. 2005.
- [7]. PEACOCK A. J. Handbook of polyethylene: Structures, properties and applications. New York, Marcel Dekker Inc. 2000.
- [8]. KALPAKJIAN, Serope. Manufactura, ingeniería y tecnología. 4 ed. Pearson Education. 2005. 1154 p.
- [9]. HULL, Derek. Materiales compuestos. Barcelona, Reverté. 1987. 254 p.
- [10]. ASHBY. M y JONES. D. Materiales para ingeniería, introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño. Barcelona, Reverté. 2008.
- [11]. SEYMOUR. Raimond y CARRAHER. Charles. Introducción a la química de los polímeros. Barcelona, Reverté. 2002.
- [12]. DUARTE. Gloria Isabel y MANRIQUE. Miguel Antonio. Guía recomendada para selección y uso de tuberías de materiales compuestos para aplicación en líneas de flujo de la VPR. Piedecuesta, ECOPETROL S.A. 2012. 85 p.

- [13]. [Página Web], KISHNER, Israel. Pskcolombia. 2011. <[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)> (2011) >.
- [14]. DALMOLEN, Bert. Reinforced Thermoplastic Pipeline (RTP) Systems. Amsterdam, For 23rd World Gas Conference. 2006.
- [15]. [Página Web], FIBERSPAR CORPORATION, Line pipe engineering guide Fiberspar. United States. 2012. <http://www.fiberspar.com/sites/default/files/FibersparPresentation_October2012-US.pdf>
- [16]. BROWN. N and Bhattacharya. K. Journal of materials science. 1985. 20, 4553-4560 p.
- [17]. ZHOU. Z and BROWN, N. Journal of polymer science, part b: Polymer physics. 1992, 30, 5, 477-487 p.
- [18]. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard practice for determining dimensions of “fiberglass” (glass-fiber-reinforced thermosetting resin) pipe and fittings. Reapproved 2011. ASTM International, 2010. 4 p. ASTM D3567-97.
- [19]. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for rubber property—durometer hardness. Reapproved 2010. ASTM International, 2010. 13 p. ASTM D2240-05.
- [20]. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Plásticos y ebonita. Determinación de la dureza por penetración (indentación) mediante un durómetro (dureza shore). Primera actualización. Bogotá, D.C.: ICONTEC, 1997. 8 p. NTC 2524.
- [21]. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Plastics and ebonite. Determination of indentation hardness by means of a durometer (shore hardness). Genève: ISO, 1985. 3 p. ISO 868.
- [22]. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for indentation hardness of rigid plastics by means of a Barcol impressor. ASTM International, 2013. 4 p. ASTM D2583-13a.

- [23]. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for determination of the impact resistance of thermoplastic pipe and fittings by means of a tup (falling weight). Reapproved 2005. ASTM International, 2005. 8 p. ASTM D2444-99.
- [24]. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Thermoplastics pipes - determination of resistance to external blows - round-the-clock method. Genève: ISO, 1994. 18 p. ISO 3127:1994.
- [25]. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for time-to-failure of plastic pipe under constant internal pressure. Reapproved 2009. ASTM International, 2011. 4 p. ASTM D1598-02.
- [26]. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Tuberías termoplásticas para la conducción de fluidos. Resistencia a la presión interna. Método de ensayo. Primera actualización. Bogotá, D.C.: ICONTEC, 1998. 14 p. NTC 3578.
- [27]. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Qualification of spoolable reinforced plastic line pipe. Washington, D.C.: API Recommended Practice 15S, 2006. 30p. API RP 15S.
- [28]. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Thermoplastics pipes for the conveyance of fluids. Resistance to internal pressure. Test method. Genève: ISO, 1996. 9 p. ISO 1167:96.
- [29]. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Plastics piping and ducting systems - determination of the long-term hydrostatic strength of thermoplastics materials in pipe form by extrapolation. Genève: ISO, 2012. 11 p. ISO 9080: 2012.
- [30]. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for resistance to short-time hydraulic pressure of plastic pipe, tubing, and fittings. Reapproved 2011. ASTM International, 2011. 3 p. ASTM D1599-99.
- [31]. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Determinación de la presión hidráulica de rotura a corto plazo en tubos y

accesorios de plástico. Primera actualización. Bogotá, D.C.: ICONTEC, 2006. 13 p. NTC 3579.

[32]. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Specification for unbonded flexible pipe. Washington, D.C.: ANSI/API Specification 17J, 2008. 33p. API Spec 17J.

[33]. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for compressive properties of rigid plastics. ASTM International, 2010. 7 p. ASTM D695-10.

[34]. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Plastics-determination of compressive properties. Genève: ISO, 2002. 14 p. ISO 604: 2002.

[35]. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. ASTM International, 2010. 11 p. ASTM D790-10.

[36]. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Plastics-determination of flexural properties. Genève: ISO, 2010. 15 p. ISO 178: 2010.

[37]. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for tensile properties of plastics. ASTM International, 2010. 16 p. ASTM D638-10.

[38]. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Plastics-determination of tensile properties - part 1: General principles. Genève: ISO, 2012. 13 p. ISO 527-1:2012.

[39]. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Plastics-determination of tensile properties - part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics. Genève: ISO, 2012. 13 p. ISO 527-2:2012.

[40]. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for apparent hoop tensile strength of plastic or reinforced plastic pipe. ASTM International, 2012. 8 p. ASTM D2290-12.

[41]. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Método de ensayo para determinar la resistencia a la tensión aparente del anillo o de plásticos tubulares y plásticos reforzados mediante el método de disco muescado. Primera actualización. Bogotá, D.C.: ICONTEC, 2003. 12 p. NTC 4392.

- [42]. [Página Web], _____. Microscopía cofocal. 2014. <http://www.hirox-usa.com/products/microscope/kh7700_04.html>
- [43]. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for evaluation of scratch resistance of polymeric coatings and plastics using an instrumented scratch machine. ASTM International, 2005. 8 p. ASTM D7027-05.
- [44]. NICHOLSON, J. The chemistry of polymers. 3 ed. 2006.
- [45]. JIANG. Han, BROWNING. Robert and SUE. Hung-Jue. Understanding of scratch - induced damage mechanisms in polymers. Elsevier Science Technology. 2006. 10 p.
- [46]. ROSA SIERRA. Alberto, SANCHEZ SOTO. Miguel y GONZÁLEZ MADARIAGA. Francisco. Ensayo de rayado de los componentes plásticos bicapa rígido – flexibles usados en el diseño de electrodomésticos y herramientas tipo soft touch. Revista No. 5. Revista de arquitectura, diseño y urbanismo. 2008. 12 p.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Qualification of spoolable reinforced plastic line pipe. Washington, D.C.: API Recommended Practice 15S, 2006. 30p. API RP 15S.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Specification for unbonded flexible pipe. Washington, D.C.: ANSI/API Specification 17J, 2008. 33p. API Spec 17J.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard practice for determining dimensions of “fiberglass” (glass-fiber-reinforced thermosetting resin) pipe and fittings. Reapproved 2011. ASTM International, 2010. 4 p. ASTM D3567-97.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for rubber property—durometer hardness. Reapproved 2010. ASTM International, 2010. 13 p. ASTM D2240-05.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for indentation hardness of rigid plastics by means of a Barcol impressor. ASTM International, 2013. 4 p. ASTM D2583-13a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for determination of the impact resistance of thermoplastic pipe and fittings by means of a tup (falling weight). Reapproved 2005. ASTM International, 2005. 8 p. ASTM D2444-99.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for time-to-failure of plastic pipe under constant internal pressure. Reapproved 2009. ASTM International, 2011. 4 p. ASTM D1598-02.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for resistance to short-time hydraulic pressure of plastic pipe, tubing, and fittings. Reapproved 2011. ASTM International, 2011. 3 p. ASTM D1599-99.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for compressive properties of rigid plastics. ASTM International, 2010. 7 p. ASTM D695-10.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for tensile properties of plastics. ASTM International, 2010. 16 p. ASTM D638-10.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for apparent hoop tensile strength of plastic or reinforced plastic pipe. ASTM International, 2012. 8 p. ASTM D2290-12.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for evaluation of scratch resistance of polymeric coatings and plastics using an instrumented scratch machine. ASTM International, 2005. 8 p. ASTM D7027-05.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. ASTM International, 2010. 11 p. ASTM D790-10.

ARCINIEGAS, Javier. Instalación de tuberías no metálicas en líneas de superficie en los pozos del campo la Cira-Infantas. Bucaramanga, XI Congreso Nacional de Corrosión. 2011.

ARCINIEGAS. Javier, QUINTERO. Luz Amparo y MENESES. Jaime. Análisis de técnicas de inspección no destructiva en tubería flexible con refuerzo no metálico para el transporte de hidrocarburos. Medellín, VII Congreso Internacional de Materiales. 2013.

ARROYAVE POSADA, Carlos Enrique. Corrosión: primer consumidor de acero en el mundo. Colombia. 2013. Disponible en: <<http://www.ecopetrol.com.co/especiales/RevistaInnova7ed/entrevista.htm>>

ASHBY. M y JONES. D. Materiales para ingeniería, introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño. Barcelona, Reverté. 2008.

ASKELAND, Donald. Ciencia e ingeniería de los materiales. 4 ed. Iberoamericana. 2005.

BROWN. N and Bhattacharya. K. Journal of materials science. 1985. 20, 4553-4560 p.

CALLISTER, William. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. 3 ed. Barcelona, Reverté. 1995. 803 p.

DALMOLEN, Bert. Reinforced Thermoplastic Pipeline (RTP) Systems. Amsterdam, For 23rd World Gas Conference. 2006.

DOMÍNGUEZ, Carlos. Estudio del proceso de crecimiento lento de grieta en el polietileno de alta densidad para su aplicación en tubería. Trabajo de grado. Valencia, Universidad de Valencia. 2009. 233 p.

DUARTE. Gloria Isabel y MANRIQUE. Miguel Antonio. Guía recomendada para selección y uso de tuberías de materiales compuestos para aplicación en líneas de flujo de la VPR. Piedecuesta, ECOPEPETROL S.A. 2012. 85 p.

EZRIN. Myer y LAVIGNE. Gary. Unexpected and unusual failures of polymeric Materials. Elsevier Science Technology. 2006.

FARSHAD, M. Plastic Pipe Systems: Failure investigation and diagnosis. United Kingdom, Elsevier Science Technology. 2006.

FIBERSPAR CORPORATION, Line pipe engineering guide Fiberspar. United States. 2012. Disponible en: <http://www.fiberspar.com/sites/default/files/FibersparPresentation_October2012-US.pdf>

FORERO, Álvaro. Metalurgia práctica. 4 ed. Bogotá, D.C., Universidad Nacional de Colombia. 2010. 391 p.

GUTIÉRREZ PULIDO. Humberto y DE LA VARA SALAZAR. Román. Análisis y diseño de experimentos. 2 ed. México, D.F., Mc Graw Hill. 2008. 594 p.

HULL, Derek. Materiales compuestos. Barcelona, Reverté. 1987.254 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Determinación de la presión hidráulica de rotura a corto plazo en tubos y accesorios de plástico. Primera actualización. Bogotá, D.C.: ICONTEC, 2006. 13 p. NTC 3579.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Método de ensayo para determinar la resistencia a la tensión aparente del anillo o de plásticos tubulares y plásticos reforzados mediante el método de disco muescado. Primera actualización. Bogotá, D.C.: ICONTEC, 2003. 12 p. NTC 4392.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Plásticos y ebonita. Determinación de la dureza por penetración (indentación) mediante un durómetro (dureza shore). Primera actualización. Bogotá, D.C.: ICONTEC, 1997. 8 p. NTC 2524.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Tuberías termoplásticas para la conducción de fluidos. Resistencia a la presión interna. Método de ensayo. Primera actualización. Bogotá, D.C.: ICONTEC, 1998. 14 p. NTC 3578.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Plastics and ebonite. Determination of indentation hardness by means of a durometer (shore hardness). Genève: ISO, 1985. 3 p. ISO 868.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Plastics-determination of compressive properties. Genève: ISO, 2002. 14 p. ISO 604: 2002.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Plastics-determination of flexural properties. Genève: ISO, 2010. 15 p. ISO 178: 2010.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Plastics-determination of tensile properties - part 1: General principles. Genève: ISO, 2012. 13 p. ISO 527-1:2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Plastics-determination of tensile properties - part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics. Gèneve: ISO, 2012. 13 p. ISO 527-2:2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Plastics piping and ducting systems - determination of the long-term hydrostatic strength of thermoplastics materials in pipe form by extrapolation. Gèneve: ISO, 2012. 11 p. ISO 9080: 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Thermoplastics pipes - determination of resistance to external blows - round-the-clock method. Gèneve: ISO, 1994. 18 p. ISO 3127:1994.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Thermoplastics pipes for the conveyance of fluids. Resistance to internal pressure. Test method. Gèneve: ISO, 1996. 9 p. ISO 1167:96.

JIANG. Han, BROWNING. Robert and SUE. Hung-Jue. Understanding of scratch - induced damage mechanisms in polymers. Elsevier Science Technology. 2006. 10 p.

KALPAKJIAN, Serope. Manufactura, ingeniería y tecnología. 4 ed. Pearson Education. 2005. 1154 p.

KISHNER, Israel. Pskcolombia. 2011. Disponible en: <[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)> (2011) >.

Microscopía cofocal. 2014. Disponible en: <http://www.hirox-usa.com/products/microscope/kh7700_04.html>

NICHOLSON, J. The chemistry of polymers. 3 ed. 2006.

PEACOCK A. J. Handbook of polyethylene: Structures, properties and applications. New York, Marcel Dekker Inc. 2000.

ROSA SIERRA. Alberto, SANCHEZ SOTO. Miguel y GONZÁLEZ MADARIAGA. Francisco. Ensayo de rayado de los componentes plásticos bicapa rígido – flexibles usados en el diseño de electrodomesticos y herramientas tipo soft touch. Revista No. 5. Revista de arquitectura, diseño y urbanismo. 2008. 12 p.



SEYMOUR. Raimond y CARRAHER. Charles. Introducción a la química de los polímeros. Barcelona, Reverté. 2002.

SMITH, William. Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales. 4 ed. McGraw Hill. 2004. 717 p.

ZHOU. Z and BROWN, N. Journal of polymer science, part b: Polymer physics. 1992, 30, 5, 477-487 p.

ANEXOS

ANEXO A. Formato de la inspección realizada en las tuberías flexibles.

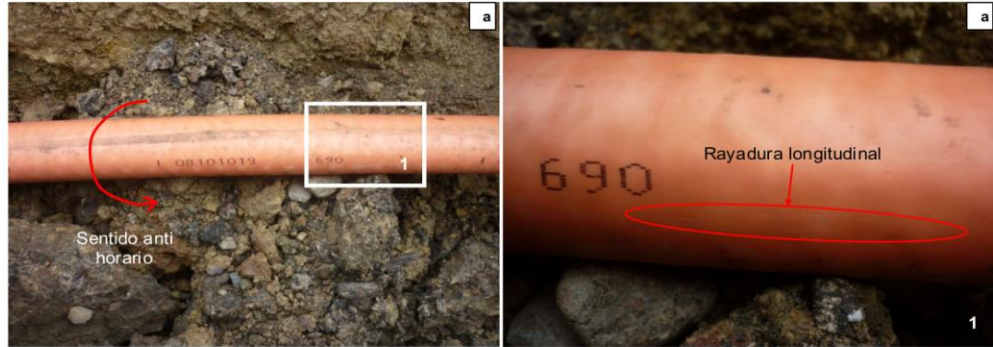
		INFORMACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA TUBERÍA ENROLLABLE	
		ESPECIFICACIONES	
		Referencia del producto:	Fecha de instalación: 26/09/13
Área a evaluar: CAPA EXTERNA		Tipo de fluido que transporta: CRUDO DE PETRÓLEO	
CONDICIONES DE TRABAJO			
Propósito del ensayo:			
Criterio/norma de aceptación:			
Normas usadas:			
Fecha y resultados último examen visual (operario):			

CARACTERÍSTICAS SUPERFICIALES DE LAS RAYADURAS	Observaciones
Dimensión	¿Es posible medir su espesor o anchura?, si lo es indicarlo
	¿Cuál es el máximo y mínimo espaciamiento entre cada rayadura?
	¿Se puede medir la profundidad de la rayadura?, ¿Cuál es?
	Indique la máxima y mínima longitud de rayadura por metro de tramo de tubería
Densidad	¿Cuál es la cantidad de rayas presentes por metro de tramo de tubería?
	¿Las rayas se afectan entre sí?
Geometría de la rayadura	¿Qué forma presentan las rayas?
	¿Cuál es la forma de rayadura más frecuente?
Visibilidad	¿Cambia el color la tubería con la presencia de rayas?
	¿Es visible la altura de los hombros?
Homogeneidad	¿Se evidencia desgaste alrededor de la raya?
	¿Cómo se muestra el contorno de las rayas?
Orientación	Indique orientación
Control	¿Cuáles son los criterios de aceptación y rechazo, antes de instalación (en relación a la presencia de rayaduras)?
	¿Se repite con frecuencia este defecto?

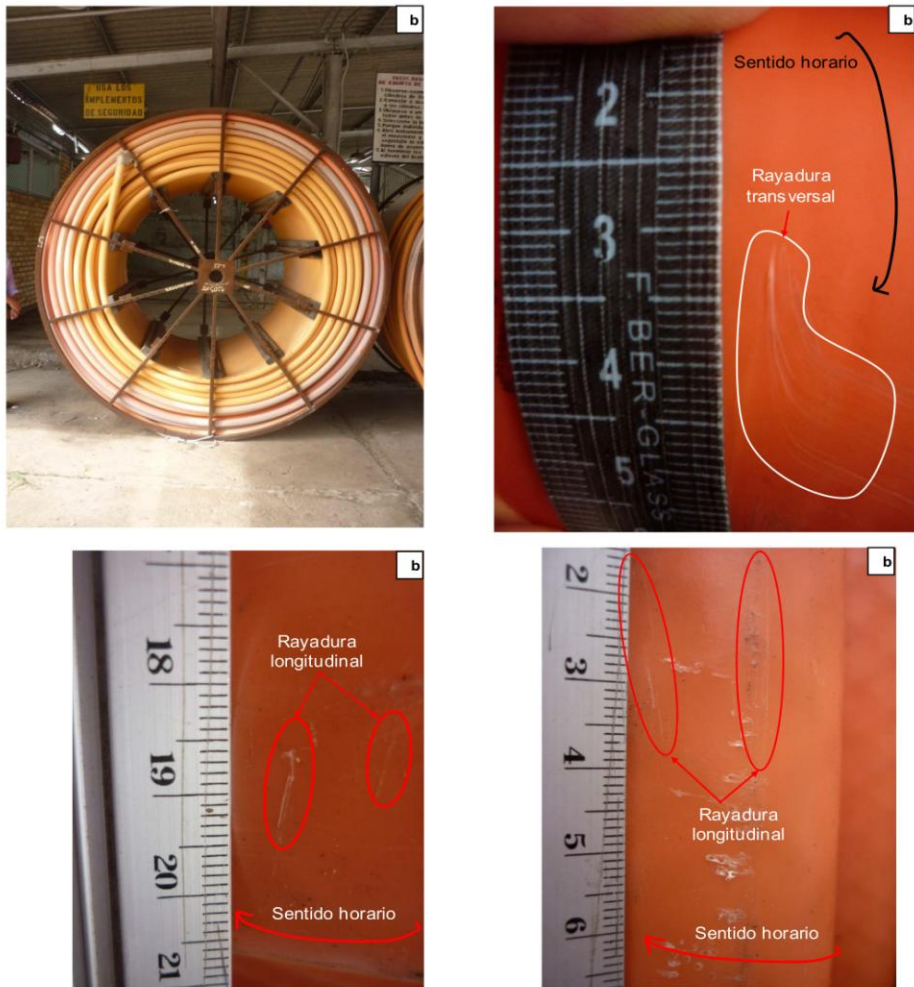
OBSERVACIONES GENERALES:	
Realizado por:	Fecha de entrega:

REGISTRO FOTOGRÁFICO OBTENIDAS EN CAMPO "LA CIRA-INFANTAS" - BARRANCABERMEJA (SISTEMA I)

A. En zanja (instalación):

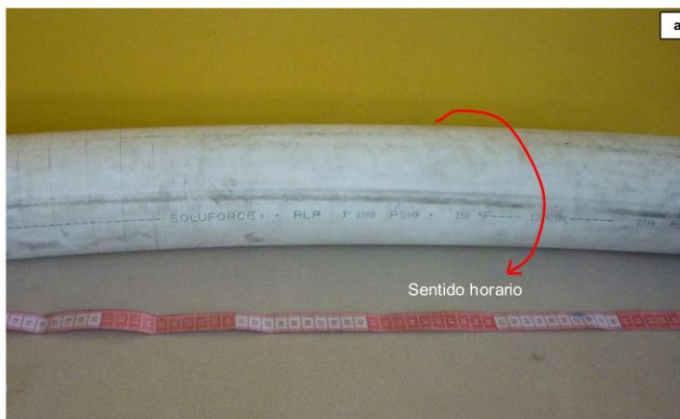


B. En almacenamiento (bodega):



REGISTRO FOTOGRÁFICO OBTENIDAS EN CAMPO "LA CIRA-INFANTAS" - BARRANCABERMEJA (SISTEMA II)

A. En almacenamiento (bodega):



ANEXO B. Información técnica de diámetro exterior e interior correspondiente a sistema de tubería I.

Diámetro nominal (in)	Diámetro exterior (in)	Diámetro interior (in)
2 3/8	2.375	1.880

Fuente: KISHNER, Israel¹³.

¹³ [Página Web], KISHNER, Israel. Pskcolombia. 2011.
<[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) >.

ANEXO C. Información técnica de diámetro exterior e interior correspondiente a sistema de tubería II.

Diámetro nominal (in)	Diámetro exterior (in)	Diámetro interior (in)
3.0	3.85	2.87


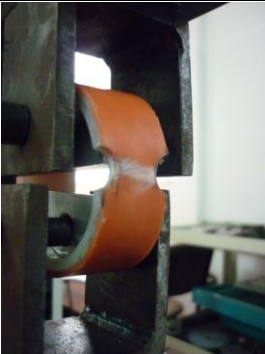
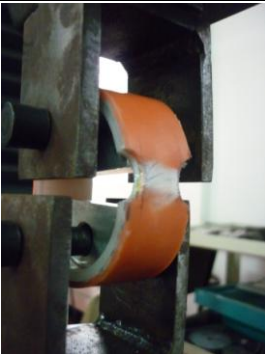
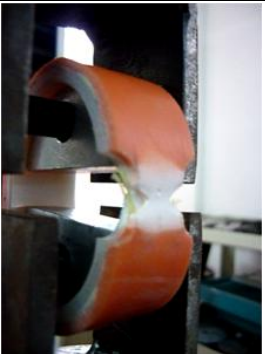
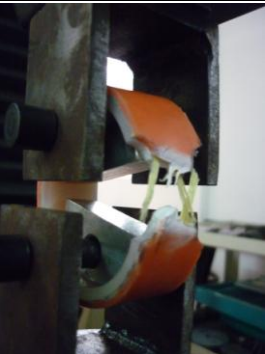





Fuente: DALMOLEN, Bert¹⁴.

¹⁴ DALMOLEN, Bert. Reinforced Thermoplastic Pipeline (RTP) Systems. Amsterdam, For 23rd World Gas Conference. 2006.

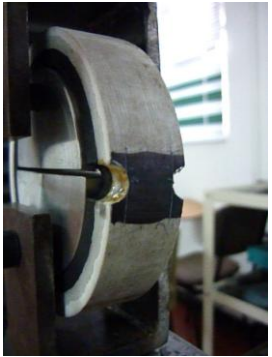
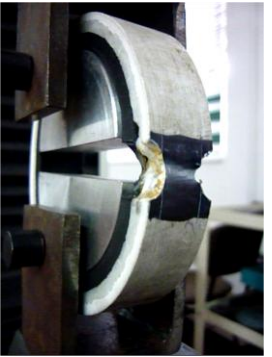








ANEXO D. Propiedades mecánicas y curvas de tracción obtenidas para cada sistema de tubería no afectado.

Condición estándar de ensayo	Velocidad de ensayo: 0.4 in/min				Temperatura: 20°C			
Estado superficial	NO AFECTADO							
Sistema de tubería	SISTEMA I				SISTEMA II			
Área sección transversal del anillo	0.1322 (in ²)				0.2828 (in ²)			
Longitud inicial (sección reducida) (L ₀)	0.70 (in)				0.70 (in)			
Datos obtenidos	Número de ensayos de tensión			Valor promedio	Número de ensayos de tensión			Valor promedio
	1	2	3		1	2	3	
Carga máxima (P _{máx}) (Lbf)	1000.97	863.00	1040.00	967.99±92.99	1771.54	1595.27	1548.16	1638.32±117.75
Elongación máxima (Δl) (in)	0.37	0.33	0.34	0.35±0.18	1.13	0.88	1.03	1.01±0.13
Deformación unitaria (ε)	0.53	0.47	0.49	0.50±0.03	1.61	1.26	1.48	1.45±0.18
Grado de rigidez (Lbf/in)	9372.69	8337.99	9371.32	9027.33±574.12	7492.63	6614.85	7503.68	7203.72±510.00
Esfuerzo último a la tensión (UTS) (psi)	3785.81	3262.44	3926.61	3658.29±349.97	3132.14	2820.41	2737.20	2896.58±208.20
Curvas esfuerzo-deformación								

ANEXO E. Secuencia de la estricción de un anillo no afectado 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 SISTEMA I			Temperatura: 20°C	
Secuencia	1	2	3	4	5	
ESTADO SUPERFICIAL	NO AFECTADO	 Tiempo = 0 s	 Tiempo = 24 s	 Tiempo = 42 s	 Tiempo = 47 s	 Tiempo = 49 s
	AFECTADO	 Tiempo = 0 s	 Tiempo = 12 s	 Tiempo = 20 s	 Tiempo = 27 s	 Tiempo = 29 s

ANEXO F. Secuencia de la estricción de un anillo no afectado 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		
ESTADO SUPERFICIAL	NO AFECTADO	 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	

ANEXO G. Propiedades mecánicas y curvas de tracción obtenidas, según el diseño experimental planteado para cada sistema de tubería.

Condiciones estándar de ensayo	Velocidad de ensayo: 0.4 in/min				Temperatura: 20°C			
Estado superficial	AFECTADO							
Sistema de tubería	SISTEMA I				SISTEMA II			
Combinación de variables	1				C			
Profundidad de la rayadura	10% espesor de la capa externa (0.24 mm)				10% espesor de la capa externa (0.34 mm)			
Espaciamento entre rayaduras	2.0 mm				2.0 mm			
Área sección transversal del anillo	0.1322 (in ²)				0.2828 (in ²)			
Longitud inicial (sección reducida) (L ₀)	0.70 (in)				0.70 (in)			
Datos obtenidos	Número de ensayos de tensión			Valor promedio	Número de ensayos de tensión			Valor promedio
	1	2	3		1	2	3	
Carga máxima ($P_{máx}$) (Lbf)	952.50	949.90	958.12	953.51±4.20	1552.38	1465.98	1700.59	1572.98±118.65
Elongación máxima (Δl) (in)	0.34	0.34	0.32	0.33±0.01	0.74	0.67	0.86	0.76±0.10
Deformación unitaria (ϵ)	0.49	0.49	0.46	0.48±0.02	1.06	0.95	1.23	1.08±0.14
Grado de rigidez (Lbf/in)	10000.00	8802.62	9045.60	9282.74±632.93	8106.22	7686.96	7496.62	7763.27±311.88
Esfuerzo último a la tensión (UTS) (psi)	3602.50	3589.21	3623.75	3605.15±17.42	2744.66	2591.90	3006.70	2781.09±209.79
Curvas esfuerzo-deformación								

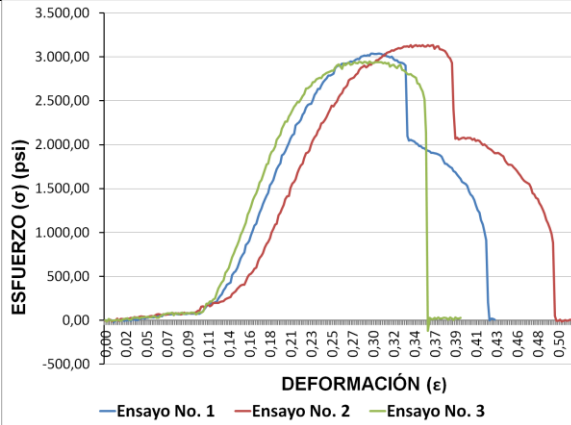
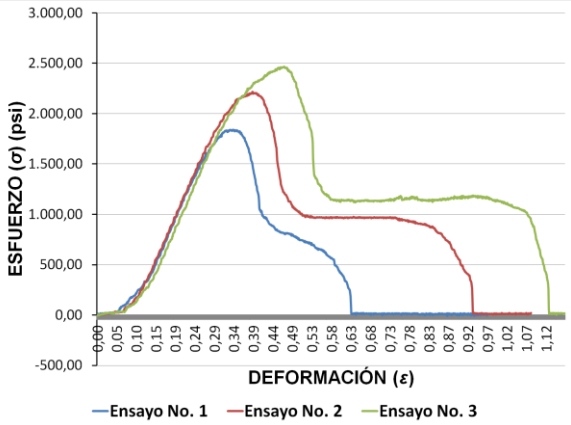
ANEXO H. Propiedades mecánicas y curvas de tracción obtenidas, según el diseño experimental planteado para cada sistema de tubería.

Condiciones estándar de ensayo	Velocidad de ensayo: 0.4 in/min				Temperatura: 20°C			
Estado superficial	AFECTADO							
Sistema de tubería	SISTEMA I				SISTEMA II			
Combinación de variables	A				AC			
Profundidad de la rayadura	50% espesor de la capa externa (1.22 mm)				50% espesor de la capa externa (1.68 mm)			
Espaciamiento entre rayaduras	2.0 mm				2.0 mm			
Area sección transversal del anillo	0.1322 (in ²)				0.2828 (in ²)			
Longitud inicial (sección reducida) (L ₀)	0.70 (in)				0.70 (in)			
Datos obtenidos	Número de ensayos de tensión			Valor promedio	Número de ensayos de tensión			Valor promedio
	1	2	3		1	2	3	
Carga máxima ($P_{m\acute{a}x}$) (Lbf)	861.89	797.26	813.42	824.19±33.63	1463.17	1394.33	1376.06	1411.19±45.94
Elongación máxima (Δl) (in)	0.29	0.36	0.33	0.33±0.04	0.90	0.85	0.87	0.87±0.03
Deformación unitaria (ϵ)	0.41	0.51	0.47	0.46±0.05	1.29	1.22	1.24	1.25±0.04
Grado de rigidez (Lbf/in)	10717.31	9372.69	9372.69	9820.90±776.32	8099.23	7679.46	7879.88	7886.19±209.96
Esfuerzo último a la tensión (UTS) (psi)	3259.78	3015.36	3076.47	3117.20±127.20	2586.93	2465.22	2432.93	2495.03±81.21
Curvas esfuerzo-deformación								

ANEXO I. Propiedades mecánicas y curvas de tracción obtenidas, según el diseño experimental planteado para cada sistema de tubería.

Condiciones estándar de ensayo	Velocidad de ensayo: 0.4 in/min				Temperatura: 20°C			
Estado superficial	AFECTADO							
Sistema de tubería	SISTEMA I				SISTEMA II			
Combinación de variables	B				BC			
Profundidad de la rayadura	10% espesor de la capa externa (0.24 mm)				10% espesor de la capa externa (0.34 mm)			
Espaciamiento entre rayaduras	3.0 mm				3.0 mm			
Área sección transversal del anillo	0.1322 (in ²)				0.2828 (in ²)			
Longitud inicial (sección reducida) (L ₀)	0.70 (in)				0.70 (in)			
Datos obtenidos	Número de ensayos de tensión			Valor promedio	Número de ensayos de tensión			Valor promedio
	1	2	3		1	2	3	
Carga máxima ($P_{máx}$) (Lbf)	908.95	958.12	1001.57	956.21±46.34	1199.05	1516.55	1696.38	1470.66±251.82
Elongación máxima (Δl) (in)	0.28	0.32	0.37	0.32±0.05	0.71	0.30	0.22	0.41±0.26
Deformación unitaria (ϵ)	0.41	0.46	0.53	0.47±0.06	1.01	1.02	1.33	1.12±0.18
Grado de rigidez (Lbf/in)	9372.69	9385.18	9372.69	9376.85±7.21	6818.79	7135.34	7888.21	7280.78±549.34
Esfuerzo último a la tensión (UTS) (psi)	3437.78	3623.75	3788.46	3616.66±175.45	2119.97	2681.32	2999.25	2600.18±445.22
Curvas esfuerzo-deformación								

ANEXO J. Propiedades mecánicas y curvas de tracción obtenidas, según el diseño experimental planteado para cada sistema de tubería.

Condiciones estándar de ensayo	Velocidad de ensayo: 0.4 in/min				Temperatura: 20°C			
Estado superficial	AFECTADO							
Sistema de tubería	SISTEMA I				SISTEMA II			
Combinación de variables	AB				ABC			
Profundidad de la rayadura	50% espesor de la capa externa (1.22 mm)				50% espesor de la capa externa (1.68 mm)			
Espaciamiento entre rayaduras	3.0 mm				3.0 mm			
Área sección transversal del anillo	0.1322 (in ²)				0.2828 (in ²)			
Longitud inicial (sección reducida) (L ₀)	0.70 (in)				0.70 (in)			
Datos obtenidos	Número de ensayos de tensión			Valor promedio	Número de ensayos de tensión			Valor promedio
	1	2	3		1	2	3	
Carga máxima ($P_{m\acute{a}x}$) (Lbf)	803.58	828.87	779.70	804.05±24.59	1040.30	1253.14	1395.74	1229.73±178.87
Elongación máxima (Δl) (in)	0.30	0.35	0.25	0.30±0.05	0.68	0.76	0.81	0.75±0.07
Deformación unitaria (ϵ)	0.42	0.50	0.36	0.43±0.07	0.97	1.08	1.16	1.07±0.10
Grado de rigidez (Lbf/in)	9372.69	9372.69	10713.64	9819.67±774.20	7309.35	6978.03	6315.60	6867.66±505.99
Esfuerzo último a la tensión (UTS) (psi)	3039.27	3134.91	2948.94	3041.04±93.00	1839.29	2215.60	2467.71	2174.20±316.25
Curvas esfuerzo-deformación								

ANEXO K. a. Cortes efectuados en una probeta, según norma ASTM D638–10³⁷; b. Separación de capas no adherentes de la tubería.



³⁷ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for tensile properties of plastics. ASTM International, 2010. 16 p. ASTM D638-10.