

**Análisis de la integridad estructural mediante elementos finitos en tuberías de material
compuesto tejido**

Sergio Augusto Peña Serrano, Nikol Andres Prada Patiño

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Mecánico

Director

Octavio Andrés Gonzáles Estrada

PhD. en Escuela de Ingeniería

Codirector

Juan Sebastián León Becerra

Ingeniero Mecánico

Msc. en Ingeniería mecánica

Oscar Rodolfo Bohórquez Becerra

Ingeniero Mecánico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería mecánica

Bucaramanga

2020

A Dios por darme salud, amor por la carrera, fortaleza en los momentos difíciles, paciencia y sabiduría para la culminación de mi carrera profesional.

A mi familia en especial a mi madre Angela Janeth Serrano, a mi padre Uriel Augusto Peña y mi hermano Luis Felipe Peña Serrano por el apoyo, amor, paciencia y la confianza brindada, porque son el motivo de lucha y felicidad en mi día a día.

Al semillero de investigación SIMA por permitirme ser integrante y coordinador de esta gran experiencia investigativa.

A los codirectores Oscar Bohórquez y Juan Sebastián León que sin el esfuerzo y trabajo de ellos no se cumpliría la realización del proyecto.

A mis jefes Sergio Alberto Forero y Olga Acevedo por abrirme las puertas para formar parte de COMFAMICAR SAS y su familia, por el cariño, apoyo y tiempo brindado.

Sergio Augusto Peña Serrano.

A Dios por darme lucidez, salud y fortaleza para la culminación de mi carrera profesional.

A mi familia en especial a mi madre Giomar Patiño y a mi padre Carlos Julio Prada por el apoyo, paciencia y la confianza brindada, porque son la razón de que siga hacia adelante.

A los codirectores Oscar Bohórquez y Juan Sebastián León que sin el esfuerzo y trabajo de ellos no se cumpliría la realización del proyecto.

A mis compañeros William Medina, Julián Jauregui, Katherine Ramírez, Carlos Lázaro, Luis Carlos Parada y Joseph Camacho por su amistad durante toda la carrera y el apoyo brindado en la realización de este proyecto.

Nikol Andrés Prada Patiño

Contenido

	pág.
Introducción	14
1. Objetivos	18
1.1 Objetivo General	18
1.2 Objetivos Específicos.....	18
2. Metodología	19
2.1 Modelo geométrico	19
2.1.1 Geometría.....	19
2.1.2 Selección del material.....	19
2.1.3 Mallado.....	20
2.1.4 Modelo de daño.....	21
2.2 Procedimiento experimental	22
2.2.1 Diseño de probetas.....	23
2.2.2 Micrografía del material compuesto.....	24
2.2.3 Ensayo de tracción, compresión y Open Hole.....	24
Resultados	25
3.1 Resultados experimentales.....	26
3.2 Modelo numérico	30
3.2.1 Dimensiones y condiciones de contorno.....	30

3.2.2 Esfuerzos internos resultantes en tuberías.	31
3.2.3 Cálculo de la carga vertical para la tubería enterrada.	33
3.2.4 Condiciones de operación en el transporte de crudo.	35
3.2.5 Análisis ensayo Open Hole.	37
3.2.6 Daño progresivo.	40
4. Conclusiones	44
5. Recomendaciones	46
Referencias Bibliográficas	47

Lista de Tablas

	pág.
Tabla 1. Dimensiones de las probetas según las normas	23
Tabla 2. Propiedades mecánicas de la fibra de vidrio mediante ensayos de tracción.....	27
Tabla 3. Propiedades mecánicas de ensayo de compresión.	28
Tabla 4. Resultados de las fibras para el ensayo de Open Hole	29
Tabla 5. Dimensiones tubería material compuesto	30
Tabla 6. Esfuerzos registrados para las fibras de vidrio	31
Tabla 7. Propiedades del tipo de suelo.....	33
Tabla 8. Especificaciones de la tubería.....	34
Tabla 9. Respuesta del Volan 232 en función del número de capas y la profundidad	35
Tabla 10. Respuesta del Volan 325 en función del número de capas y la profundidad	36
Tabla 11. Respuesta del Woven Roving en función del número de capas y la profundidad	36
Tabla 12. Valores experimentales y simulados de ensayo Open Hole	38
Tabla 13. Errores promediados generales en la predicción de las fuerzas uniaxiales por diferentes modelos.....	39
Tabla 14. Resultados del modelo de daño	40

Lista de Figuras

	pág.
Figura 1. Tubería de material compuesto. Fuente. www.fiberflex.com.ex	15
Figura 2. Mallado.	21
Figura 3. Discretización de malla.....	21
Figura 4. Elaboración de probetas.....	23
Figura 5. Micrografía fibra Volan 325.	24
Figura 6. Ensayo de compresión.	25
Figura 7. Probetas ensayo a tracción.....	27
Figura 8. Grafica Esfuerzo vs Deformación material Volan 232.....	28
Figura 9. Probetas ensayo de compresión.	29
Figura 10. Probetas Woven Roving ensayo Open Hole.....	30
Figura 11. Desplazamiento vs Número de capas	32
Figura 12. Diagrama de Pareto.....	37
Figura 13. Resultado de daño para ensayo Open Hole	39
Figura 14. Análisis del fallo de la primera.	41
Figura 15. Fallo de la primera capa.....	42
Figura 16. Fallo completo en la capa.	42
Figura 17. Estallido total de la tubería.	43

Resumen

TÍTULO: ANÁLISIS DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS EN TUBERÍAS DE MATERIAL COMPUESTO TEJIDO*

AUTORES: SERGIO AUGUSTO PEÑA SERRANO, NIKOL ANDRES PRADA PATIÑO**

PALABRAS CLAVE: Tubería de material compuesto, análisis de elementos finitos, simulación, criterios de falla, Norma ASTM 3039, ASTM 5766, ASTM 695.

RESUMEN

Las tuberías de material compuesto presentan numerosas ventajas respecto a otros materiales de transporte de fluido, uno de es por sus propiedades mecánicas, debido a que es la unión de dos o más materiales y están siendo usadas en industrias como la petroquímica. En este trabajo se realizó el análisis del daño progresivo mediante ensayos de tracción, compresión y el método de elementos finitos para una tubería de material tejido de fibra de vidrio bajo cargas, presiones y temperaturas habituales para este componente en servicio, además se realizó una independencia de malla para determinar la calidad a trabajar. Se caracterizó experimentalmente el material compuesto (fibras de vidrio Volan 232, Volan 325 y Woven Roving con matriz polimérica en base a resina epóxi) mediante ensayos de tracción ASTM D3039 y ASTM D5766 para compresión, se usó un modelo no lineal de daño progresivo basado en la mecánica del daño continuo. Además, se estudia la influencia del diámetro interno, el número de capas de fibras enlazadas, las presiones internas, temperatura del fluido interior y la distancia bajo suelo en la distribución de esfuerzos y el factor de seguridad. Este modelo es de gran utilidad para realizar estimaciones de vida remanente en tuberías enterradas.

* trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director Octavio Andrés González Estrada Ingeniero Mecánico, Phd. Codirectores Oscar Rodolfo Bohórquez Becerra y Juan Sebastián León Becerra

Abstract

TITLE: ANALYSIS OF STRUCTURAL INTEGRITY THROUGH FINITE ELEMENTS IN PIPES OF COMPOSITE FABRIC MATERIAL*

AUTHORS: SERGIO AUGUSTO PEÑA SERRANO, NIKOL ANDRES PRADA PATIÑO**

KEYWORDS: Composite pipe, finite element analysis, simulation, failure criteria, Standard ASTM 3039, ASTM 5766, ASTM 695.

DESCRIPTION:

Composite-based pipes have numerous advantages over other fluid transport materials and are being used in industries such as petrochemicals, one of which is due to its mechanical properties, because it is the union of two or more materials and are being used in industries such as petrochemicals. In this work, the progressive damage analysis was carried out by means of tensile, compression and the finite element method for a pipe of woven fiberglass material under usual loads, pressures and temperatures for this component in service. The composite material was experimentally characterized by tensile tests ASTM D3039 and ASTM D5766 for compression, a nonlinear progressive damage model based on the continuous damage mechanics was used. In addition, the influence of the internal diameter, the number of layers of bonded fibers, the internal pressures, temperature of the inner fluid and the distance underground in the stress distribution and the safety factor are studied. This model is very useful for estimating remaining life in buried pipe. This model are very useful for estimating remaining life in buried pipes.

* Degree work

** Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director Octavio Andrés González Estrada Mechanical Engineer, Phd. Codirectores Oscar Rodolfo Bohorquez Becerra y Juan Sebastián León Becerra

Introducción

Los materiales compuestos representan un avance e innovación en el desarrollo de nuevos materiales, donde se definen como la unión de dos o más elementos que buscan combinar las propiedades mecánicas que no tienen los materiales originales. En este caso, se tiene como agente reforzante la fibra de vidrio y como matriz polimérica resina epóxica (Guillermo Latorre & Vargas, 2009). Dichos materiales han sido utilizados en diferentes industrias por su buena respuesta al desgaste.

En una industria como la del petróleo y gas, las condiciones en las que se encuentra la tubería que transporta el fluido (alta humedad, variación en la temperatura, cambios en la presión de operación e irregularidades en el terreno)(León Becerra, González-Estrada, Pertuz Comas, & Pertuz, 2016), pueden generar abolladuras y daños en la tubería(Aparicio & Durán, 2000). Estas alteraciones en la condición de operación, tienen como consecuencia una disminución en la producción, que generarían altas pérdidas de dinero (G Latorre & Vargas, 1999).

En los últimos años, Colombia ha realizado investigaciones con tuberías de material compuesto, para observar el comportamiento al desgaste que tienen estos ductos al transportar gran cantidad de hidrocarburos(Leal & Reyes, 2016).

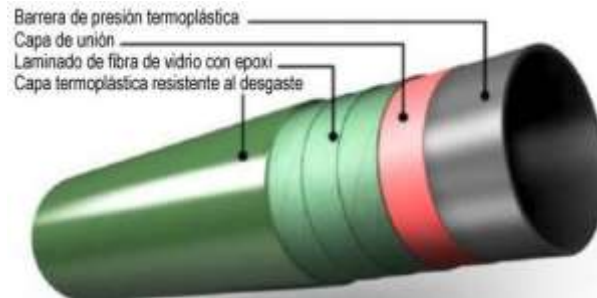


Figura 1. Tubería de material compuesto. Nota. Adaptado de Fiberflex Recuperado de: www.fiberflex.com.ex

La composición del material de la tubería es factor fundamental en el estudio y desarrollo del transporte del crudo (Gómez P. José, 2009). Con el fin de proteger la tubería de daños por desgaste y corrosión, se construyen tuberías de material compuesto (laminado de fibra de vidrio con matriz de resina epoxi) con una capa interna que soporte los cambios en la presión y temperatura, ver Figura 1, además de una capa externa de refuerzo, la cual ayudara a disminuir los efectos anteriormente expuestos (G. Latorre, Mora, Mejía U, Martínez, & Suárez, 1998).

Por medio de los elementos finitos realizados en tuberías multicapa, con aplicaciones en oleoductos, se ha obtenido los esfuerzos equivalentes para cada una de las capas, demostrando así la mayor representación de los esfuerzos de operación en la capa media (Perillo, Vacher, Grytten, Sørbo, & Delhay, 2014).

La cantidad de hidrocarburos y presión en la que está expuesta una tubería continuamente, puede generar que el material que compone este proceso, tienda a dañarse (Sánchez, 2018). Bajo estos parámetros Manoj (Manoj Prabhakar et al., 2019) realizó un análisis de estallido en tuberías de material compuesto, donde reveló que el ángulo entre los tejidos de la fibra y la matriz debe ser de $\pm 55^\circ$ para disminuir el mecanismo de falla, como lo es un agrietamiento, fugas y fracturas en el material.

Este proceso de análisis de falla y desgaste generados en las tuberías siempre han sido objetos de estudio, basado en los grandes efectos que tiene en los costos del transporte del petróleo, para ello, Degahn y Heidari (Sahami & Mohammad, 2020) en su trabajo hicieron un análisis paramétrico del efecto del taladrado en las tuberías de material compuesto de fibra de vidrio, mostrando que la delaminación es un mecanismo de daño bastante común cuando se encuentran agujeros.

Además de los esfuerzos internos, las tuberías se encuentran sometidas a cargas externas, como la presión hidrostática en tuberías submarinas y la carga vertical ejercida por el subsuelo en tuberías enterradas. Este cálculo de las cargas generadas por las capas del subsuelo que actúa sobre las tuberías, vienen siendo realizado desde los años 90, por medio de la teoría de Marston (González & Reyes, 1999).

Como objetivo de este proyecto, se busca estudiar el daño progresivo que tienen las tuberías de material compuesto, sometiendo el sistema a esfuerzos externos, generados por las capas del suelo y las presiones internas dadas por el fluido ya (Toscano & Assanelli, 2000).

Estos elementos han sido caracterizados bajo la normas ASTM D3039 y ASTM D695 (propiedades de tracción y compresión de materiales compuestos en matriz polimérica, respectivamente) (International, 2014), dando como resultado la respuesta mecánica del material a evaluar (ASTM International, 2014).

Para el estudio de la integridad de la tubería, se parte de los resultados experimentales y del uso de métodos finitos (FEM), con el fin de observar los efectos en los materiales al sufrir fuerzas externas (Abdelouahed, Mokhtari, & Benzaama, 2019).

Se usó el software de simulación ingenieril ANSYS con el fin de obtener los esfuerzos y desplazamientos que se pueden generar en la tubería a estudiar (Amini, 2015), simulando las

cargas y estableciendo condiciones de contorno donde se pueda obtener una respuesta aproximada del sistema.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Analizar los parámetros que influyen en la resistencia de las tuberías diseñadas con material de fibra de vidrio enterradas para uso de transporte en la industria de petróleo.

1.2 Objetivos Específicos

Realizar un modelo numérico en el programa ANSYS donde se tenga en cuenta la tipología del material tejido (fibra de vidrio) determinando la matriz elástica.

Encontrar la influencia de la variación del número de capas de material tejido en la respuesta estructural (distribución de esfuerzos y el factor de seguridad).

Caracterizar y determinar la energía disipada por unidad de área de un material compuesto tejido, mediante ensayos de tracción según la norma ASTM D3039.

Validar el modelo numérico utilizando ensayos de tracción OPEN HOLE según la norma ASTM D5766.

Identificar las condiciones en la variación de: cargas (externas e internas), profundidad (0 a 5 metros, con respecto a la Teoría de Marston), geometría (variación en el número de capas de fibra de vidrio tejido) y material compuesto para tubería transportadora de crudo.

2. Metodología

El análisis que se desea realizar parte del estudio de las propiedades mecánicas que tienen los materiales compuestos, esto con el fin de determinar los beneficios que pueden desarrollar estos materiales en la industria del petróleo. Basado en lo anterior se realizó un modelo computacional que busca representar el comportamiento de las tuberías a presiones nominales establecidas para el transporte de hidrocarburos, además de estudiar el daño progresivo generado por estas presiones en cada una de las capas de la tubería.

2.1 Modelo geométrico

2.1.1 Geometría. En la mayoría de los casos la geometría que se determina es cilíndrica, debido a que las pérdidas por fricción son menores y requiere menor material para su construcción, que otras formas. Esta consideración determina el modelo que debe ser realizado en la simulación. Esto se especifica debido a que pueden existir tuberías con diferentes geometrías a la cilíndrica.

2.1.2 Selección del material. En el proceso de selección de materiales implica realizar un análisis entre las propiedades físicas y químicas que conforman al material, donde se pueda soportar las condiciones a las que está sometido el sistema. Posteriormente el factor a seleccionar

en un material es su facilidad y disponibilidad para encontrarse en el mercado, para finalmente dar un criterio basado en su costo comercial.

En esta investigación los elementos a estudiar son los materiales compuestos, donde se tendrá como material reforzante la fibra de vidrio y una matriz epóxica con base polimérica, esto debido a los factores anteriormente descritos. Los materiales seleccionados en la elaboración de las probetas como material reforzante fueron las fibras de vidrio Woven Roving, Volan 232 y Volan 325 con el fin de realizar los ensayos anteriormente expuestos.

La fibra de vidrio Woven Roving se caracteriza por ser telas bidireccionales, tejidas de vidrio E, con un peso promedio de 800 g/m². El tipo de fibra Volan se caracteriza por fabricarse a partir de hilos de fibra de vidrio, los cuales se tejen para conformar un tejido plano de excelentes propiedades aislantes y resistencia térmica. el valor que acompaña al tipo de fibra Volan hace referencia al peso por unidad de área que tiene el tejido.

2.1.3 Mallado. El tipo de mallado es el encargado de controlar el error de discretización, para ello se realizaron pruebas de independencia de malla, para verificar la convergencia de la solución. Los resultados se observan en la Figura 3. El refinamiento se realizó para la capa de refuerzo, hasta obtener una variación entre el esfuerzo equivalente y el número de elementos menor al 5%. El mallado se realiza con elementos hexaédricos para la capa epóxica-fibra de vidrio, con un valor de 17000 elementos. El mallado mostrado en la figura 2 se aplica para cada uno de los materiales. Como condiciones de contorno para cada una de las capas se determinó una malla uniforme, que permita una calidad aceptable y de mediano costo computacional, para así no verse afectado en el diseño. Este tipo de malla se realizó para cada uno de los materiales, esto con el fin no tener variaciones y así facilitar el estudio del material.



Figura 2. Mallado.

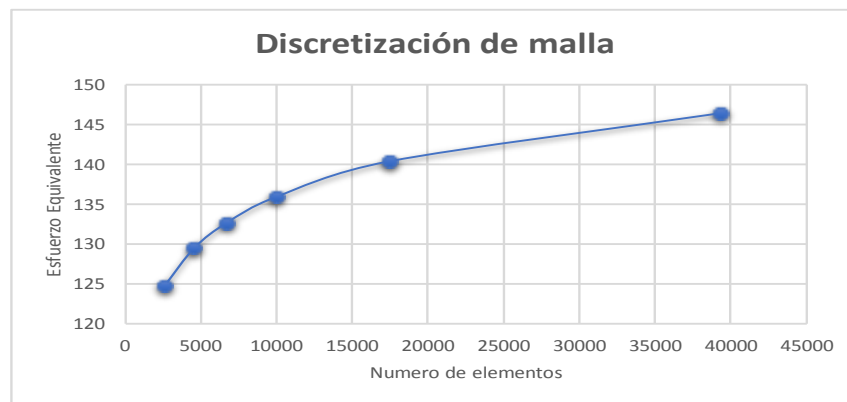


Figura 3. Discretización de malla.

2.1.4 Modelo de daño. En la elaboración del modelo de daño, se parte por seleccionar un criterio que satisfaga el comportamiento que tiene la tubería respecto al desgaste progresivo que se vaya generando. En este caso se seleccionó el criterio de Hashin debido a su resolución, eficiencia y medio grado de confiabilidad (Arias & Vanegas, 2004). Este se basa en el empleo de principios variacionales para establecer límites en las propiedades de materiales macroscópicamente homogéneos e isotropos, además de ser un método general que no tiene en cuenta la microestructura del compuesto (Castro, 2018). Por lo tanto, es útil para obtener los

valores máximo y mínimo de las propiedades de materiales compuestos por inclusiones de cualquier tipo.

Para evaluar la evolución del daño que tiende a generarse en la tubería, se parte por encontrar el valor de la energía total disipada que tiene el material, con el fin de entender la relación esfuerzo deformación que puede soportar el sistema. Este comportamiento se describe para materiales isotrópicos mediante la matriz elástica mostrada a continuación:

$$[D]_d = \begin{bmatrix} \frac{c_{11}}{(1-d_f)} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{21} & \frac{c_{22}}{(1-d_m)} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{31} & c_{32} & \frac{c_{33}}{(1-d_m)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{c_{44}}{(1-d_s)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c_{55}}{(1-d_s)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c_{66}}{(1-d_s)} \end{bmatrix}^{-1} \quad (1)$$

Donde:

C_{ij} = Coeficientes de la matriz elástica

d_f, d_m, d_s = fibra, matriz y variable de daño cortante

Válido para valores de la variable de daño entre 0 y 1, donde 0 revela que no hay daño en el sistema y 1 establece pérdida total de rigidez en el material.

2.2 Procedimiento experimental

Se establecen los materiales necesarios para la elaboración de las probetas en base de fibras tejidas de vidrio Woven Roving, Volan 232 y 325, basado en las normas ASTM D3039

(International, 2014), ASTM D5766 (ASTM International, 2014) Y ASTM 695, con el fin de llevar a cabo el ensayo de tracción, compresión y Open Hole.

2.2.1 Diseño de probetas. Se construyeron las probetas mediante el método de laminado a mano con molde abierto con las medidas recomendadas por las normas ASTM D3039, ASTM D5766 Y ASTM D695, mostradas en la siguiente tabla:

Tabla 1.

Dimensiones de las probetas según las normas

Norma	Longitud promedio (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Diámetro (mm)
Astm 5766	183	25	2	4,2
Astm 3039	183	25	2	Ninguno
Astm 695	79,4	19	12	Ninguno

En la figura 4 se visualiza la elaboración de algunas probetas con el fin de realizar el ensayo de tracción, estableciendo las dimensiones mediante la norma.



Figura 4. Elaboración de probetas.

2.2.2 Micrografía del material compuesto.

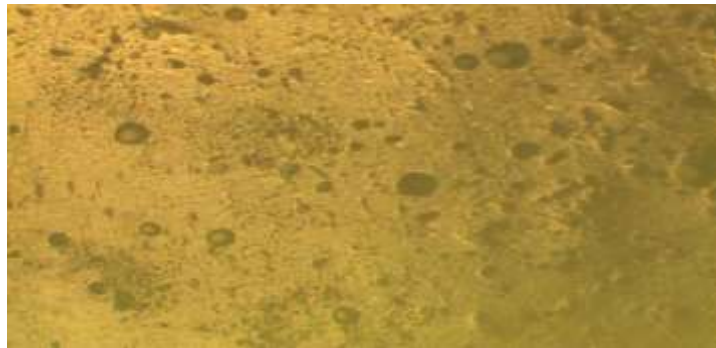


Figura 5. Micrografía fibra Volan 325.

En la Figura 5 se observa la micrografía de la capa superficial de una probeta de fibra de vidrio con matriz epóxica. En las características de esta probeta se describe alta porosidad en la matriz, además de discontinuidad en toda la estructura interna de la probeta. Estos son factores de vital importancia en la obtención de resultados, debido a que estos tamaños de poro no generan fuerza de adhesión para contrarrestar la fuerza de tracción generada durante el ensayo, disminuyendo el esfuerzo ultimo y la rigidez del material. Especificando que no se realizaron nuevas probetas debido a la falta de material y fondos para la compra de nuevos materiales.

2.2.3 Ensayo de tracción, compresión y Open Hole. Para obtener las propiedades mecánicas de los diferentes tipos de materiales compuestos, se realiza el ensayo de material reforzado con fibras de vidrio (Woven Roving, Volan 232 y 325), establecido por la norma ASTM D3039, ASTM D5766 Y ASTM D596 llevado a cabo en el banco MTS Bionix Servo hydraulic test system modelo 370, ver Figura 6, que consta con una celda de carga de 25 kN, estableciendo una velocidad de 3,7 mm/min para los ensayos de tracción y Open Hole y una

velocidad de 1.3 mm/min para el ensayo de compresión, con el fin de obtener los datos de carga axial aplicada durante el experimento y la deformación axial generada en la probeta.



Figura 6. Ensayo de compresión.

Resultados

A continuación, se observa y describe el modelo numérico realizado para el análisis de la integridad estructural de materiales compuestos desarrollado en fibras de vidrio Volan 232, 325 y Woven Roving como agente reforzante y con matriz polimérica basada en resina epóxica.

3.1 Resultados experimentales

A continuación, se muestra en la Tabla 2, los valores experimentales promedios de los esfuerzos de tracción obtenidos bajo la norma ASTM D3039 para los cinco ensayos realizados en las probetas diseñadas con fibra de vidrio Woven Roving, Volan 232 y 325, que actúan sobre el área transversal de la probeta. Con una velocidad de 1.7 mm/min para los ensayos de tracción y 1.3 mm/min para ensayos de compresión, tal que proyecte un valor aproximado de la carga máxima soportada por la probeta, su esfuerzo último, el módulo de elasticidad y la energía total disipada. En ecuación 2, se describe la relación esfuerzo, deformación con el fin de obtener la energía total disipada.

$$G_c = \int_0^{u_e^f} \sigma_e du_e \quad (2)$$

Donde:

$G_c =$ Energía total disipada por unidad de area

$u_e^f =$ Desplazamiento ultimo equivalente

$\sigma_e =$ Esfuerzo equivalente

$u_e =$ Desplazamiento equivalente

Tabla 2.

Propiedades mecánicas de la fibra de vidrio mediante ensayos de tracción.

Material	Área (mm ²)	Carga Máxima (N)	Esfuerzo Último (MPa)	Módulo de Elasticidad (MPa)	Energía total disipada
Volan 232	25	2801,77	120,61	8464,04	251,49
Woven Roving	25	4799,62	191,50	11337,2	802,04
Volan 325	25	3228,52	129,80	9464,50	288,64

En la Figura 7, se observa el comportamiento de las probetas de fibra de vidrio Volan 232 sometidas al ensayo de tracción, donde cada uno de los elementos tiende a variar el punto de rotura, y la forma de fallo, es específico en materiales frágiles.



Figura 7. Probetas ensayo a tracción.

Respecto al procedimiento experimental realizado, en la Figura 8 se determina el comportamiento esfuerzo vs deformación, que tienen cada uno de los materiales estudiados, con el fin de encontrar el módulo de elasticidad que caracteriza a cada uno de ellos.



Figura 8. Grafica Esfuerzo vs Deformación material Volan 232

Respecto al análisis desarrollado por la norma ASTM D596, se realizó el experimento de compresión para las probetas de fibra de vidrio Woven Roving, Volan 232 y 325, estableciendo los valores aproximados de carga máxima de deformación, esfuerzo ultimo de compresión, módulo de elasticidad y energía total disipada de deformación. A continuación, se muestran las probetas elaboradas y los resultados. Ver Tabla 3.

Tabla 3.

Propiedades mecánicas de ensayo de compresión.

Tipo de Fibra	Carga Máxima (N)	Módulo de Elasticidad (MPa)	Energía Disipada	Esfuerzo Último (MPa)
Volan 232	6370,82	57423,30	114,01	212,36
Woven Roving	8023,56	81814,75	152,72	267,45
Volan 325	6852,15	59426,32	121,35	228,41

En la Figura 9 se observa la tendencia de fallo que tienen cada uno de los materiales estudiados (Volan 232, Volan 325 y Woven Roving) sometidos al ensayo de compresión. Observado el daño solamente en la matriz de resina epóxica.



Figura 9. Probetas ensayo de compresión.

Para desarrollar los ensayos de Open Hole, se realizaron las probetas de acuerdo con la norma ASTM D5766, que establece la geometría y velocidad de tracción necesaria, para obtener resultados válidos. Estos resultados se ven establecidos en la Tabla 4.

Tabla 4.

Resultados de las fibras para el ensayo de Open Hole

Material	Fuerza Máxima (N)	Deformación Máxima (mm/mm)
Volan 232	1873,98	0,0091
Woven Roving	5482,44	0,0089
Volan 325	2009,54	0,0113

En la Figura 10, se muestra la tendencia de fallo que tiende a tener las probetas Woven Roving bajo el ensayo Open hole.



Figura 10. Probetas Woven Roving ensayo Open Hole.

3.2 Modelo numérico

En esta sección se describe el modelo numérico desarrollado por elementos finitos. Se define la geometría de la tubería a estudiar, además de las condiciones de contorno para realizar el análisis de la integridad estructural de la tubería.

3.2.1 Dimensiones y condiciones de contorno. Las dimensiones del modelo geométrico de la tubería se describen en función a los valores estándares dados para el transporte de hidrocarburos. Estos son descritos en la siguiente tabla:

Tabla 5.

Dimensiones tubería material compuesto

Geometría	Diámetro interno (cm)	Espesor por capa (mm)	Longitud (m)
Cilíndrica	15,24	1	2

Se estableció un valor fijo en la longitud de la tubería, aclarando que los valores de las longitudes utilizados en el transporte de hidrocarburos son mayores. Las condiciones

preestablecidas por el software son limitadas, para ello se toma un valor pequeño, con el fin observar un fragmento del entorno al que se encuentra expuesta esta geometría.

Respecto al estudio de la tipología del material tejido, se realiza la simulación de cargas, comparando así los esfuerzos y deformaciones a los que está sometido cada material. Los valores para cargas muertas en tuberías enterradas son basadas en la teoría de Marston y las presiones nominales internas son establecidas para 2 MPa con una temperatura de 61 grados Celsius, siendo está la condición normal de operación en oleoductos.

Se restringe el valor del desplazamiento a 0, en dirección axial, radial y circunferencial en una de las caras laterales de la tubería, además de establecer un soporte fijo en la cara contraria, esto con el fin de describir las condiciones de una brida, para posteriormente simular el comportamiento de un recipiente a presión, llevando a desarrollar el proceso en el modelo más crítico. Denotando alteraciones en la tensión longitudinal calculada, en donde el valor más alto de esfuerzos va a estar dado en una de las caras de la tubería.

3.2.2 Esfuerzos internos resultantes en tuberías. Los valores obtenidos para cada una las fibras de vidrio con variación en el número de capas son descritas en la Tabla 6.

Tabla 6.

Esfuerzos registrados para las fibras de vidrio

Número de capas	Von mises (MPa)	Desplazamiento (mm)	Esfuerzo y (MPa)	Esfuerzo x (MPa)	Esfuerzo z (MPa)
Volan 232					
3 capas	56,6	4,27	28,19	8,36	31,8
4 capas	48,2	3,51	23,42	6,89	25,8
5 capas	42,8	2,31	17,43	5,21	20,51

Número de capas	Von mises (MPa)	Desplazamiento (mm)	Esfuerzo y (MPa)	Esfuerzo x (MPa)	Esfuerzo z (MPa)
Volan 325					
3 capas	55,7	3,94	28,19	8,36	31,8
4 capas	46,9	3,12	23,54	6,15	25,8
5 capas	41,3	2,25	16,89	4,57	20,8
Woven Roving					
3 capas	52,5	3,45	27,62	5,89	32,87
4 capas	45,8	2,86	22,45	5,12	26,89
5 capas	39,5	2,01	16,8	4,39	21,39

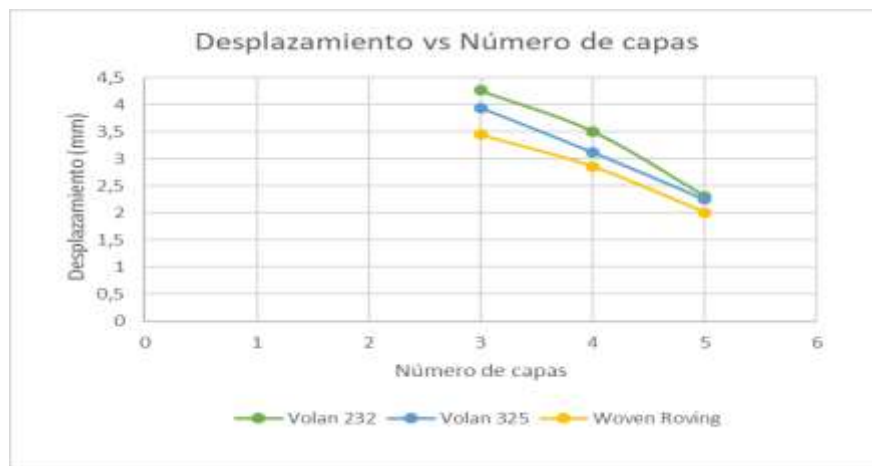


Figura 11. Desplazamiento vs Número de capas

Observando los resultados dados en la simulación para desplazamiento de la tubería, ver Figura 11, en donde las condiciones en la que se exponen cada uno de los materiales y sus diferentes capas son las mismas, se puede establecer que la fibra de vidrio Woven Roving es el material con mayor resistencia, debido a que los esfuerzos y desplazamientos son menores respecto a los otros materiales. Además, se indica la tendencia de la capacidad en la tubería, a medida que varía el número de capas, estableciendo la disminución en el desplazamiento y

esfuerzos a mayor número de capas. Bajo este criterio se establece al Volan 232 como el material de menor resistencia a la elasticidad y al fallo. Como un parámetro importante, la tubería se encuentra en superficie, donde no está sometida a ningún tipo de fuerza externa, su presión de operación es de 2 Mpa con una temperatura de 62 grados Celsius.

3.2.3 Cálculo de la carga vertical para la tubería enterrada. Cuando se desea analizar las propiedades de los materiales, se debe observar el comportamiento del material cuando está sometido a diferentes tipos de fuerza. En este caso las condiciones a las que está expuesta la tubería estudiada son cargas muertas, debido a la profundidad a la que se encuentra enterrada este material. A continuación, en la Tabla 7 se describe el tipo de suelo, las propiedades del terreno y el diámetro interno al que está sometido la tubería.

Tabla 7.

Propiedades del tipo de suelo

Tipo de Suelo	Densidad (Kg/m³)	Coefficiente de presión lateral de tierras	Coefficiente de Fricción	Diámetro interno (m)
Arena Seca	1605	0,33	0,5	15,24

Para el estudio de la capacidad y resistencia que tiene la tubería, se desarrolla una geometría con un aumento en las capas con el fin de reforzar la carga que puede soportar tanto internamente como externamente la tubería. Además, se varia la profundidad en la que se encuentra enterrado el sistema, para observar el cambio que tiene la carga en diferentes condiciones. Esto se puede observar en la Tabla 8.

El cálculo de la carga muerta vertical que actúa sobre tuberías enterradas viene siendo realizado desde el siglo XX por medio de la teoría de Marston. El éxito y la popularidad de esta teoría radican principalmente en su simplicidad de aplicación y en su grado de conservatismo, lo cual ha permitido la instalación de miles de kilómetros de tuberías alrededor del mundo. Esta teoría establece el valor de la carga vertical muerta mediante la ecuación 3:

$$W_R = \gamma * B_d^2 * \frac{1 - e^{-2*k*\mu*(H/B_d)}}{2 * k * \mu} \quad (3)$$

W_R = Carga total transmitida a la corona de un tubo rígido (kg/m).

γ = Peso unitario del relleno (kg/m³)

B_d = Ancho de la zanja (m)

H = Altura del relleno (m)

k = Coeficiente de presión lateral de tierras.

μ' = Fricción en la pared

Tabla 8.

Especificaciones de la tubería

Número de capas	Diámetro Externo (cm)	Profundidad (m)	Carga Muerta (Kg/m)	Área (cm ²)	Esfuerzo (Pa)
3	15,44	3	364,3	48,51	35342
3	15,44	5	388,4	48,51	37680
4	15,64	3	398,6	49,13	39170
4	15,64	5	425,0	49,13	41764
5	15,84	3	432,9	49,76	43085
5	15,84	5	461,6	49,76	45941

La tubería estudiada se construye para 2 metros de longitud con el fin de establecer los parámetros de frontera y simular los criterios de falla. Desarrollando los valores de carga muerta para diferentes capas y profundidades, se observa un aumento significativo, obteniendo así los esfuerzos a los que está sometida la tubería. En la tabla 8, se puede observar los valores de los esfuerzos para las diferentes capas y profundidades.

3.2.4 Condiciones de operación en el transporte de crudo. Para proponer condiciones y materiales en las que debe estar sometida las tuberías que transportan los hidrocarburos, se deben relacionar todos los valores anteriores encontrados. Para ellos se hace la comparación entre todas las variables significativas (profundidad, tipo de material y número de capas), Ver Tabla 9,

y

Tabla 11, que puedan alterar en gran medida las condiciones de operación.

Tabla 9.

Respuesta del Volan 232 en función del número de capas y la profundidad

Volan 232			
Número de capas	Profundidad (m)	Von Mises (MPa)	Desplazamiento (mm)
3	3	55,92	4,12
3	5	56,65	4,27
4	3	47,33	3,43
4	5	48,21	3,51
5	3	42,12	2,34
5	5	42,85	2,41

Tabla 10.

Respuesta del Volan 325 en función del número de capas y la profundidad

Volan 325			
Número de capas	Profundidad (m)	Von Mises (MPa)	Desplazamiento (mm)
3	3	54,60	3,85
3	5	55,70	3,94
4	3	46,12	2,98
4	5	46,90	3,12
5	3	40,71	2,18
5	5	41,30	2,25

Tabla 11.

Respuesta del Woven Roving en función del número de capas y la profundidad

Woven Roving			
Número de capas	Profundidad (m)	Von Mises (MPa)	Desplazamiento (mm)
3	3	51,22	3,32
3	5	52,56	3,45
4	3	44,31	2,69
4	5	45,84	2,86
5	3	38,85	1,95
5	5	39,52	2,01

En el caso de la comparación entre el tipo de material, el número de capas y la profundidad a la que está expuesta la tubería, se desarrolla un diseño factorial mediante el programa estadístico Minitab (licencia estudiantil), estableciendo un criterio de 3 factores con 3 niveles, generando así un sistema de 27 permutaciones, ver Figura 12, con el fin de encontrar la variable más significativa entre las tres variables estudiadas.

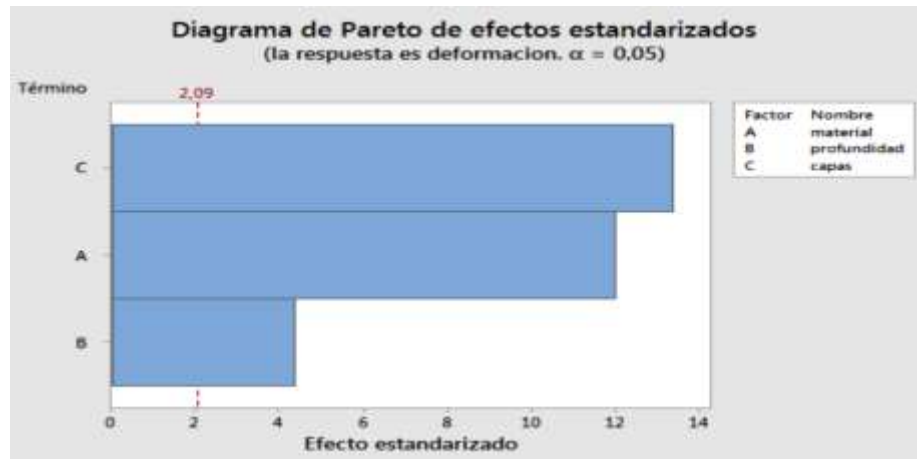


Figura 12. Diagrama de Pareto.

El diagrama de Pareto establece la relación entre las variables de entrada (material, profundidad y número de capas) en función de la deformación total generada en la tubería al ser sometida a las cargas anteriormente expuestas. En este caso el modelo estadístico utiliza un nivel de significancia del 5%, demostrando un valor aceptable en la respuesta dada. En este caso se puede observar que la variable más significativa es el número de capas que conforman a la tubería.

3.2.5 Análisis ensayo Open Hole. Teniendo en cuenta los valores obtenidos en forma experimental y simulada, se busca realizar una comparación entre los valores de fuerza máxima y deformación total para cada uno de los materiales estudiados (Volan 232,325 y Woven Roving). Ver

Tabla 12.

Tabla 12.

Valores experimentales y simulados de ensayo Open Hole

Tipo de fibra	Experimental		Simulación		Error	
	Fuerza máxima (N)	Desplazamiento Total (mm)	Fuerza máxima (N)	Deformación Total (mm)	% Error Fuerza	% Error Desplazamiento
Volan 232	1873,98	1,562	1220,25	0,939	34,88	39,88
Volan 325	2009,54	1,627	1342,26	1,092	33,21	32,88
Woven Roving	5482,44	2,285	3645,63	1,624	33,50	28,93

Al analizar los datos obtenidos por el ensayo de Open Hole, se debe tener en cuenta los factores que pueden generar variaciones en los resultados. Para ello se describe anteriormente la elaboración de las probetas, con el fin de especificar los cambios que se generan cuando el material contiene discontinuidad estructural en su matriz. Respecto al ensayo de tracción, se establece que los valores obtenidos son específicamente para una dirección, donde no se representa todo el campo de esfuerzos, generando cambios respecto a los resultados de la simulación. Bajo estas condiciones los valores obtenidos tienden a tener una desviación del 30%, siendo este un valor ineficiente, pero es un valor estándar debido a las condiciones en las que se realizaron los ensayos y el criterio de falla utilizado (criterio de Hashin). En la Tabla 13 se puede observar el valor de la desviación entre modelos experimentales y los diferentes tipos de modelos de daño (Fajardo et al., 2016).

Tabla 13

Errores promediados generales en la predicción de las fuerzas uniaxiales por diferentes modelos.

Model	N	Averaged error*	Error ratio	Rank	Model	N	Averaged error*	Error ratio	Rank
Bridging model	53	21.1%	1.0	1	Mori-Tanaka method	53	30.2%	1.43	8
Double inclusion (Digimat)	53	21.9%	1.04	2	Modified rule of mixture	53	30.7%	1.45	10
FE-square	53	23.1%	1.09	3	FE-square diagonal	53	31.9%	1.51	11
Chamis model	53	25.4%	1.20	4	FE-hexagonal	53	32%	1.52	12
FE-random	53	28.5%	1.30	5	Self-consistent method	53	32.7%	1.54	13
Hill-Hashin-C-L model	18	30.1%	1.43	6	Rule of mixture method	53	44.5%	2.11	14
Halpin-Tsai formulae	53	30.1%	1.43	6	Eshelby's method	53	45.1%	2.14	15
Generalized self-consistent	53	30.2%	1.43	8					

* $=\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{abs}(\text{error})_i$.

La Figura 13 muestra el punto máximo de daño que se ejerce a una probeta de material compuesto para los ensayos de open hole, donde se visualiza que comienza el daño en el perímetro del agujero.

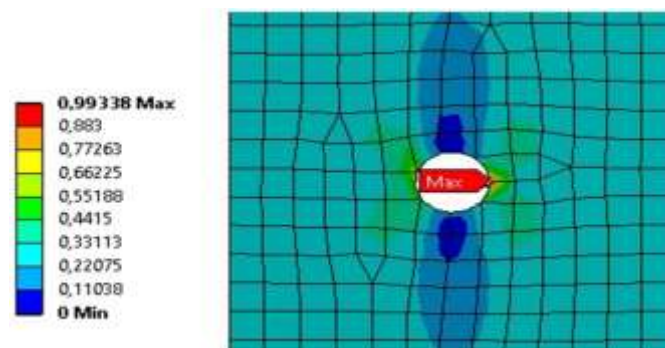


Figura 13. Resultado de daño para ensayo Open Hole

3.2.6 Daño progresivo. Para analizar el daño progresivo que se va generando en cada una de las capas de la tubería, se parte por simular el daño en la primera capa, donde empieza el desgaste del material, promoviendo así el daño continuo hasta el punto de estallido consecutivo de cada una de las capas. En la Tabla 14 se observa los valores de la matriz de daño, para cada uno de los materiales seleccionados variando el número de capas que componen al sistema.

Tabla 14.

Resultados del modelo de daño (Criterio Hashin)

Número de capas	Von mises (MPa)	Deformación (mm)	Esfuerzo daño primera capa (MPa)	Esfuerzo en etapa de estallido (MPa)
Volan 232				
3 capas	179,7	6,52	8,10	8,90
4 capas	154,3	5,46	8,91	9,63
5 capas	122,3	4,66	9,95	10,7
Volan 325				
3 capas	173,8	6,45	8,35	9,10
4 capas	150,2	5,32	9,42	10,0
5 capas	118,5	4,59	10,3	11,1
Woven Roving				
3 capas	165,4	6,21	8,91	9,41
4 capas	142,6	5,19	9,83	10,3
5 capas	113,5	4,33	10,6	11,8

En la Figura 14 se visualiza el comportamiento del daño para la primera capa en cada uno de los materiales, donde el material Woven Roving es el más resistente al daño.

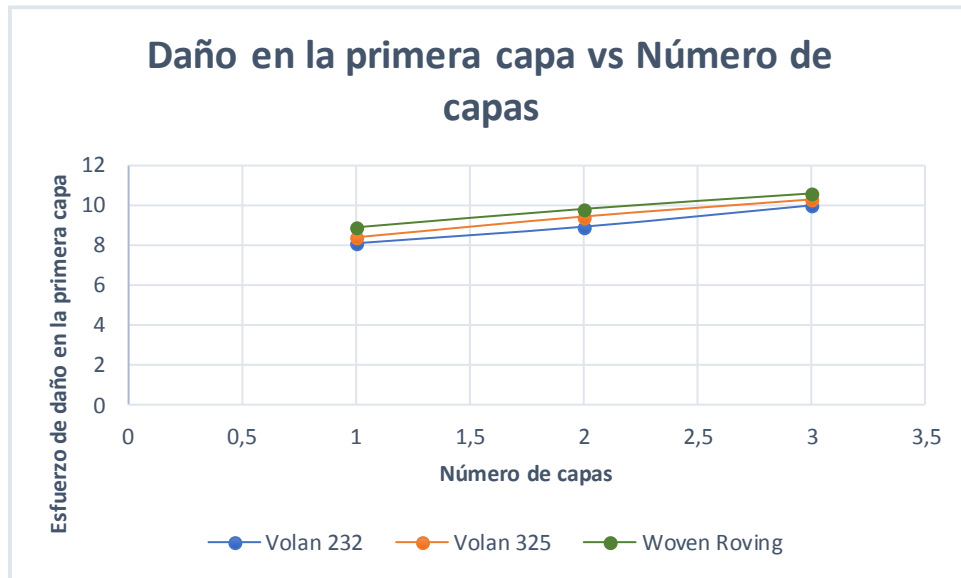


Figura 14. Análisis del fallo de la primera.

La energía total disipada que puede desarrollar cada uno de los materiales, especifica los modos de daño que se generan en la tubería con el fin de conocer cuál es el criterio de falla para el material. En este caso la matriz epóxica es el punto crítico de falla en la tubería simulada. A continuación, se muestran los valores del estado de daño que se producen en la matriz en condiciones de tensión para el material Volan 232, con 4 capas, mostrando así el daño progresivo generado desde la primera capa hasta la última capa en la que se da el estallido de la tubería. Los valores establecidos por la matriz de daño para el desgaste en el material usado varían entre 0 y 1. Estableciendo el valor 0 como ningún daño y el valor 1 como daño total en el sistema.

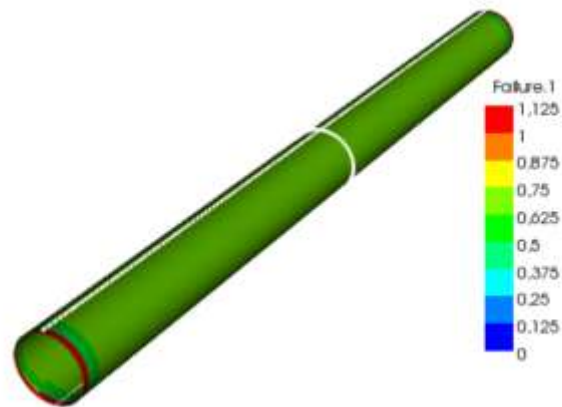


Figura 15. Fallo de la primera capa.

En la Figura 15. Fallo de la primera capa, se observa el daño generado en la primera capa de la tubería, en este caso se denota que el daño va proyectado respecto a la matriz polimérica, siendo la fibra de vidrio más resistente al desgaste. En este caso la falla se genera en los puntos de fijación y no desplazamiento, donde no refleja el área verdadera de daño, pero sí establece la condición crítica en la cual se puede diseñar la tubería.

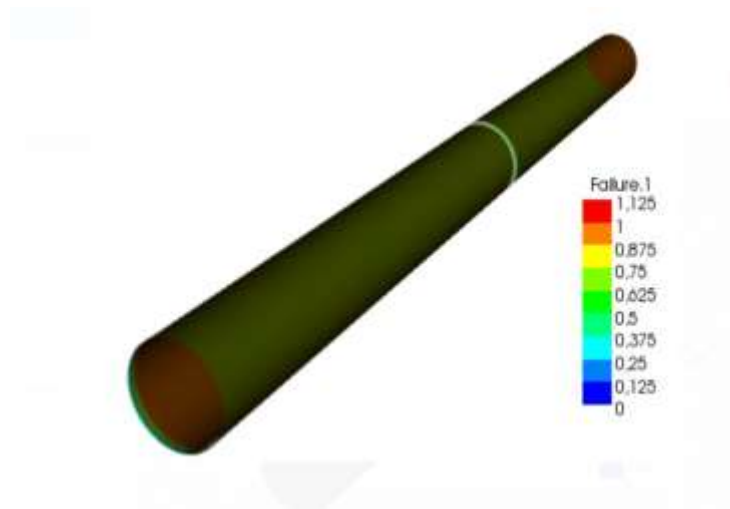


Figura 16. Fallo completo en la capa.

En la Figura 16, se observa el daño completo generado en la primera capa, denotando el daño progresivo que se va desarrollando a través de las capas siguientes.

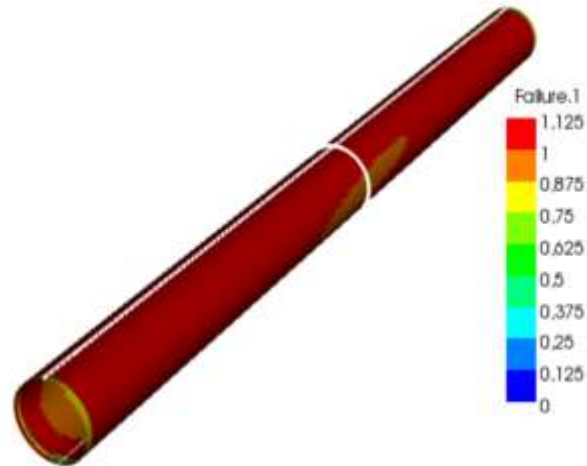


Figura 17. Estallido total de la tubería.

En la Figura 17. Estallido se observa el estallido final de la tubería, en este caso la capa más resistente tiende a fallar por completo.

4. Conclusiones

Se encontró cada uno los coeficientes que componen la matriz constitutiva elástica, para materiales compuesto en fibra de vidrio Woven Roving, Volan 232 y Volan 325, con el fin de introducirlos en un modelo numérico, donde se evaluó el comportamiento de estos elementos, sometiéndolos a diferentes tipos de cargas.

Desarrollando la caracterización mecánica (Esfuerzo último y módulo de elasticidad) para cada una de las probetas realizadas en fibra de vidrio Woven Roving, Volan 232 y Volan 325, se establece a la fibra de vidrio Woven Roving, como el agente reforzante con mayor resistencia a la fractura, bajo los ensayos realizados por las normas ASTM D3039 y ASTM D596.

El modelo numérico utilizado para validar los ensayos de Open Hole, establece una desviación promedio del 30% respecto a los datos obtenidos experimentalmente, esto debido a las irregularidades en la elaboración de las probetas, además de la concentración de esfuerzos generados por el banco de ensayos mecánicos y las condiciones de contorno en la que se simuló el programa, dando como resultado un valor inaceptable, que no representa las propiedades reales del material.

Se elaboró un diseño factorial (modelo estadístico) bajo el software Minitab, con el fin de comparar cada una de las variables estudiadas (material, número de capas y profundidad) especificando la variable más significativa a la que está expuesta la tubería. En este caso, se observa que, aunque el material y la profundidad del sistema son variables significantes de operación, el número de capas es el estado determinante entre estas tres variables.

Para el análisis del daño progresivo en una tubería sometida a variación en el número de capas, se observó el deterioro del material compuesto en un rango entre 3 y 5 capas, mediante un modelo numérico realizado en el software ANSYS, estableciendo a la matriz polimérica como condición crítica al fallo (daño inicial), hasta determinar la condición total de estallido de la tubería para cada uno de los materiales seleccionados (Woven Roving, Volan 232 y Volan 325). Estableciendo a la fibra de vidrio Woven Roving bajo una configuración de cinco capas, como la mejor condición para distribuir hidrocarburos respecto a cualquier estado anteriormente estudiado.

5. Recomendaciones

Aunque las condiciones simuladas, determinan el comportamiento que puede tener una tubería de material compuesto, se enfatiza para posteriores investigaciones, el estudio de los efectos que sufren las tuberías en condiciones variantes a la temperatura.

Los parámetros de contorno en la simulación pueden ser variantes según el estudio que se desee realizar, en el caso de los puntos de sujeción y fijación de la tubería, se puede establecer diferentes parámetros que modelen con mayor precisión el comportamiento de la tubería.

En la realización de las probetas, es de vital importancia observar que en el proceso de construcción de estas geometrías, en ellas, se van generando defectos estructurales que afectan la respuesta del sistema, por ello es bueno buscar la manera de homogenizar esas irregularidades, con un método más profesional.

Referencias Bibliográficas

- Abdelouahed, E., Mokhtari, M., & Benzaama, H. (2019). Finite Element Analysis of the thermo-Mechanical Behavior of composite Pipe Elbows under Bending and Pressure loading. *Frattura Ed Integrità Strutturale*, 13(49), 698–713. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.49.63>
- Amini, A. (2015). Modeling and experimental evaluation of functional failure pressures in glass fiber reinforced polyester pipes. *Computational Materials Science*, 96, 579–588. <https://doi.org/10.1016/J.COMMATSCI.2014.03.036>
- Aparicio, M., & Durán, A. (2000). Materiales compuestos C/SiC para aplicaciones estructurales de alta temperatura. Parte I: estabilidad termodinámica y química. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 39(6), 687–698. <https://doi.org/10.3989/cyv.2000.v39.i6.767>
- Arias, L. S., & Vanegas, L. (2004). Falla de los materiales compuestos laminados. *Scientia et Technica*, (25), 113–118.
- ASTM International. (2014). ASTM D5766/D5766M-11 Standard Test Method for Open-Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite. In *Annual Book of ASTM Standards* (Vol. 11). <https://doi.org/10.1520/D5766>
- Castro, A. (2018). *Modelización micromecánica de materiales compuestos: comparativa entre modelos analíticos y numéricos (MEF)*. Universidad de Sevilla.
- Fajardo, S., García-Galvan, R., F., Barranco, V., Galvan, J. C., & Batlle, S. F. (2016). We are IntechOpen , the world ’ s leading publisher of Open Access books Built by scientists , for scientists TOP 1 %. *Intech*, i(tourism), 13. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5772/57353>

- Gómez P. José. (2009). *Diseño de un material compuesto natural para surtir la utilización de la fibra de vidrio* (Universidad EAFIT; Vol. 2). Retrieved from ???
- González, H., & Reyes, Á. (1999). Análisis comparativo de la teoría de Martson para tuberías enterradas y la modelación numérica con elementos finitos. *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 1–13.
- International, A. (2014). Astm D3039/D3039M, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. In *Annual Book of ASTM Standards*. <https://doi.org/10.1520/D3039>
- Latorre, G., Mora, R., Mejía U, F., Martínez, A., & Suárez, R. (1998). Análisis estructural de tuberías de oleoductos abolladas for carga explosiva. *CT y F - Ciencia, Tecnología y Futuro*, 1(4), 101–110.
- Latorre, G, & Vargas, F. (1999). Materiales compuestos orgánicos utilizados como refuerzo. *C.T.F Cienc. Tecnol. Futuro*, 1(5), 113–124. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/ctyf/v1n5/v1n5a10.pdf>
- Latorre, Guillermo, & Vargas, F. (2009). Materiales compuestos reforzados con cerámicos amorfos para aplicaciones a altas temperaturas. *CTyF - Ciencia, Tecnología y Futuro*, 3(5), 175–188.
- Leal, J., & Reyes, J. D. (2016). *Analisis de la integridad estructural de tuberias de material compuesto fiberspar para transporte de crudo mediante elementos finitos*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- León Becerra, J. S., González-Estrada, O. A., Pertuz Comas, A. D., & Pertuz, A. (2016). Tubería de material compuesto : Revisión del estado del arte , análisis de esfuerzos y fallo de la primera capa. *8 Congreso Internacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas (CHES 2016)*, 1–6. Retrieved from <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01575924>
- Manoj Prabhakar, M., Rajini, N., Ayirmis, N., Mayandi, K., Siengchin, S., Senthilkumar, K., ... Ismail, S. O. (2019). An overview of burst, buckling, durability and corrosion analysis of lightweight FRP composite pipes and their applicability. *Composite Structures*, 230, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111419>

- Perillo, G., Vacher, R., Grytten, F., Sørbo, S., & Delhay, V. (2014). Material characterisation and failure envelope evaluation of filament wound GFRP and CFRP composite tubes. *Polymer Testing*, 40, 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2014.08.009>
- Sahami, D., & Mohammad, H. (2020). Parametric study on drilling of GFRP composite pipe produced by filament winding process in different backup condition. *Composite Structures*, 234, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111661>
- Sánchez, A. (2018). *Estudio y caracterización de materiales compuestos como hidrocarburos*. Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia.
- Toscano, R., & Assanelli, A. (2000). Colapso y post-colapso de tuberías de conducción submarinas. *ENIEF-XI Congreso Sobre Métodos Numéricos y Sus Aplicaciones*, 435–440.