

**ANÁLISIS DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE TUBERÍAS DE MATERIAL
COMPUESTO FIBERSPAR PARA TRANSPORTE DE CRUDO MEDIANTE
ELEMENTOS FINITOS**

**JOAQUIN LEAL ENCISO
JUAN DAVID REYES HERRERA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2016

**ANÁLISIS DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE TUBERÍAS DE MATERIAL
COMPUESTO FIBERSPAR PARA TRANSPORTE DE CRUDO MEDIANTE
ELEMENTOS FINITOS**

JOAQUÍN LEAL ENCISO

JUAN DAVID REYES HERRERA

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

DIRECTOR

OCTAVIO ANDRÉS GONZÁLEZ ESTRADA

Ingeniero Mecánico, PhD.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2016

*A DIOS el cual es el que da sabiduría e inteligencia
a quien la pide (proverbios 2:6)*

*A mis padres por todo el apoyo que dieron en este proceso
de aprendizaje y porque nunca desfallecieron
hasta ver cumplido mi sueño, gracias por
ser el motor de mi camino.*

Juan David Reyes Herrera.

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

A mi madre Elena por su incondicional apoyo e infinita paciencia, por entenderme y creer en mí, gracias por sus palabras de amor que me llenaron de fuerza y me motivaron a seguir adelante.

A mis hermanos Edgar y Jose por su respaldo y ayuda durante estos años de estudio, que Dios los bendiga.

Y en especial a mi Padre Joaquín Leal Duarte a quien llevo en mi corazón por siempre.

Joaquín Leal Enciso.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander, especialmente a los profesores y personal de la Escuela de Ingeniería Mecánica por formarnos como profesionales integrales.

A nuestro director Octavio Andrés Gonzales Estrada por sus valiosas contribuciones en la realización de este proyecto de grado.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	20
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	20
1.2 JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA	21
2. OBJETIVOS DEL PROYECTO DE GRADO.....	24
2.1 OBJETIVO GENERAL	24
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	24
3. INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE LA TUBERÍA FIBERSPAR	26
3.1 CONDICIONES COMUNES DE OPERACIÓN	27
3.2 ESFUERZOS EN TUBERÍAS COMPUESTAS	28
3.3. LAMINADO	30
3.4 MODELO DE ELASTICIDAD PARA MATERIALES COMPUESTOS.	30
3.4.1 Rigidez plana de laminados simétricos.....	32
3.4.2 Solución de elementos finitos.	36
3.5 CRITERIOS DE FALLA	36
3.5.1 Criterio de Tsai-Hill.	37
3.5.2 Criterio de Tsai-Wu.....	38
4. RESULTADOS.....	40
4.1 RESISTENCIA A LA TENSIÓN APARENTE	40
4.2 MODELO NUMÉRICO	41
4.2.1 Dimensiones y modelo del material.	41

4.2.2	Mallado	43
4.2.3	Norma ASTM D2290.....	45
4.2.4	Condiciones de contorno a la presión de trabajo nominal.....	46
4.2.5	Esfuerzos a la presión de trabajo nominal.	47
4.2.6	Evaluación de criterios de Tsai-Hill y Tsai-Wu.....	50
5.	CONCLUSIONES	52
6.	REFERENCIAS	53
	BIBLIOGRAFIA.....	57
	ANEXO	62

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Resultados de las pruebas de laboratorio a cinco muestras de tubería Fiberspar para carga máxima.	41
Tabla 2. Características geométricas de las capas de la tubería Fiberspar.....	42
Tabla 3. Características de la capa de laminado epoxi-fibra de vidrio requeridas para el modelamiento de la tubería Fiberspar.....	42
Tabla 4. Propiedades físicas de cada capa de la tubería Fiberspar	43
Tabla 5. Convergencia de los esfuerzos circunferenciales máximos del laminado.	44
Tabla 6. Comparación del resultado experimental y de la simulación.	46
Tabla 7. Esfuerzos registrados sobre la tubería Fiberspar a la presión de operación.	48
Tabla 8. Resultados de los análisis de criterios de fallo Tsai-Hill Tsai -Wu	51

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Orientación de las fibras de la capa material compuesto.....	26
Figura 2. Tubería Fiberspar.	27
Figura 3. Curvas de esfuerzo vs diferentes ángulos de arrollamiento para tuberías de epoxi-fibra de vidrio o carbono [16]......	28
Figura 4. Curvas de esfuerzo deformación en una tubería de fibra de vidrio epoxi con una relación de carga 1 Hoop: 0 axial.	29
Figura 5. Esquema de la capa de laminado epoxi-fibra de vidrio, donde 1 es la dirección de la fibra y 2 la dirección transversal de la fibra.	33
Figura 6. Geometría de la probeta del ensayo ASTM D2290.	40
Figura 7. Convergencia de los esfuerzos sobre la capa epoxi-fibra de vidrio.	44
Figura 8. Modelo de EF: (a) Isométrico y (b) vista frontal Modelo de EF.	45
Figura 9. Resultado de la simulación en el área de concentración de esfuerzos. .	46
Figura 10. Esfuerzos circunferenciales y axiales sobre la tubería en función del espesor para una presión de 5,75 MPa	48
Figura 11. Esfuerzos circunferenciales obtenidos mediante el software Heliux con un valor máximo de 61,4 MPa (8910 psi).	49
Figura 12. Esfuerzos longitudinales obtenidos mediante el software Heliux con un valor máximo de 4,5 MPa (602 psi).	50

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO	62

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE TUBERÍAS DE MATERIAL COMPUESTO FIBERSPAR PARA TRANSPORTE DE CRUDO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS.¹

AUTORES:

Joaquín Leal Enciso

Juan David Reyes Herrera.²

PALABRAS CLAVES: Tubería material compuesto, análisis de elementos finitos, simulación, criterios de falla, Norma ASTM D2290.

DESCRIPCIÓN:

En este trabajo se realiza un análisis por elementos finitos (MEF) para caracterizar el comportamiento mecánico de la tubería compuesta Fiberspar con el fin de estudiar la integridad estructural de tuberías compuestas para el transporte de petróleo y gas en Colombia. La tubería Fiberspar está conformada por una capa compuesta de epoxi reforzada de fibra de vidrio tipo E (sub-capas) y dos capas protectoras (interna y externa) de polietileno. Se realizaron ensayos de laboratorio de acuerdo con la norma ASTM D2290 en el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) con el objetivo de determinar la resistencia a la tensión última y comparar los resultados con el modelo numérico realizado. El modelado fue realizado utilizando el software de elementos finitos ANSYS®, con el fin de analizar los esfuerzos y las deformaciones sobre la tubería, teniendo en cuenta las propiedades características de los materiales. Además, se estudiaron las ecuaciones que rigen el comportamiento elástico para materiales compuestos, y que definen las tensiones y deformaciones. Se utilizaron los criterios de fallo de Tsai-Wu y Tsai-Hill para materiales compuestos cuando la tubería trabaja a 3 diferentes presiones presentadas en el sector operacional, incluyendo la presión nominal y estallido, determinando valores para el fallo e identificando las capas críticas.

¹ Trabajo de grado

² Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director Dr. Octavio Andrés González Estrada, PhD, Ingeniero Mecánico.

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS OF THE STRUCTURAL INTEGRITY OF FIBERSPAR COMPOSITE PIPES FOR THE TRANSPORT OF CRUDE OIL BY FINITE ELEMENTS.³

AUTHORS:

Joaquin Leal Enciso

Juan David Reyes Herrera.⁴

KEYWORDS: Composite pipe, finite element analysis, simulation, failure criteria, Standard ASTM D2290.

DESCRIPTION:

In this work, we performed a finite element analysis (FEA) to characterize the mechanical behavior of the composite pipe Fiberspar in order to investigate the structural integrity of composite pipes for crude oil transport in Colombia. The Fiberspar pipe is fabricated of a type E fiber glass reinforced epoxy composite layer and two protective layers (internal and external) polyethylene. For this purpose, tests according to ASTM D2290 standard were performed in the laboratory of the Colombian Petroleum Institute (ICP) in order to determine the tensile ultimate strength and compare the results with the numerical model. The simulation was performed using the finite element software ANSYS®, we analyzed the stresses and strains in the pipe taking into account the characteristic material model. We studied the governing equations for the elasticity problem for composites, which define the stresses and strains. Failure criteria Tsai-Wu and Tsai-Hill for composite materials were considered for the pipes working at different pressures, including operational pressure and, thus, the failure values and critical layers were identified.

³ Bachelor thesis.

⁴ Faculty of Physico-Mechanical Engineering, School of Mechanical Engineering. Advisor: Dr. Octavio Andrés González Estrada, PhD, Mechanical Engineer.

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, diferentes tipos de tuberías de material compuesto se han empleado con éxito en los campos de petróleo y gas debido a que sus propiedades mecánicas resultan muy atractivas, en especial su relación peso/resistencia y su resistencia a la corrosión [1]. Otras características como facilidad de instalación, alta durabilidad y facilidad de mantenimiento las hacen más deseables que las tuberías de acero. Diferentes estudios sobre las propiedades mecánicas y ensayos de laboratorio han sido llevados a cabo para su caracterización [2], [3].

Lima et al. [4] obtuvieron resultados de esfuerzos para la tubería compuesta tipo Riser, que contiene capas metálicas y termoplásticas, a partir de modelos teóricos y modelos numéricos. Anping et al. [5] realizaron un análisis de elementos finitos para determinar las propiedades mecánicas sobre dos tipos de tuberías compuestas reforzadas con alambres de acero.

Recientemente, Yu et al. [6] realizaron estudios de análisis numérico a tuberías compuestas termoplásticas RTP (reinforced thermoplastic pipes) reforzados con fibra de aramida. Los resultados relacionaron la falla por pandeo con los ángulos entre las capas de refuerzo. Yu et al. [7] realizaron un análisis numérico para la tubería RTP y concluyeron que la mejor resistencia al pandeo se obtiene cuando las fibras de la tubería están orientadas a $[\pm 65^\circ / \pm 75^\circ]$, también identificaron las mejores relaciones diámetro/espesor de la tubería.

En Colombia se han realizado algunos estudios de las tuberías compuestas para el transporte de hidrocarburos mediante ensayos de laboratorio y así examinar el efecto de las ralladuras sobre la superficie de las tuberías [8].

Yu et al. [9] investigó un modelo matemático y numérico para analizar el colapso de la tubería RTP y los resultados de la simulación con FEM reflejan un porcentaje de error muy mínimo con respecto al análisis teórico. Reutov [10] estudio mediante elementos finitos las tuberías multicapa “Soluforce” para aplicaciones de Oil & Gas, obteniendo los esfuerzos equivalentes para cada capa, donde se determinó que la capa media de refuerzo presenta los máximos esfuerzos para presiones de operación. En [11] Se investigó en una herramienta analítica para tuberías termoplásticas compuestas con el objetivo de correlacionar los resultados con ensayos laboratorio como tensión, compresión, presión interna y externa.

En [12] se analizan tuberías compuestas de filamentos enrollables expuestas a cargas termomecánicas debido al fluido caliente que circula dentro de ellas. En [13] desarrollan modelos analíticos para dar una solución aproximada para tubos compuestos de filamento enrollado de varias capas bajo flexión.

Soden et al. [14] realizaron ensayos de rotura con muestras tubulares de laminados de fibra de vidrio E y epoxi, con 60% de resina y con ángulos de arrollamiento de $\pm 55^\circ$, obteniendo una tensión de rotura de 595 MPa. Las curvas de esfuerzo deformación mostraron comportamientos no lineales.

En este trabajo se realiza el análisis estructural de la tubería compuesta de fibra de vidrio Fiberspar, mediante el uso de elementos finitos, utilizando las condiciones de

contorno dadas por la operación. Además, se comparan los resultados experimentales de acuerdo a la norma ASTM D2290, realizadas en el laboratorio del Instituto Colombiano de Petróleos (ICP), con los resultados del modelo numérico. Se estudian los criterios de fallo de Tsai- Hill y Tsai-Wu para el análisis de la tubería a diferentes presiones, incluyendo la presión de operación.

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos años, el uso de materiales compuestos en ingeniería ha estado creciendo de manera importante en sectores industriales muy sensibles, como es el caso del sector Oil & Gas. Las primeras aplicaciones fueron para desarrollar estructuras que protegieran las estructuras de metal contra eventos como el fuego, explosiones e impacto. A partir de ahí, el número de aplicaciones ha aumentado hasta cubrir elementos como, por ejemplo, sistemas de tubería en tierra y mar adentro, contenedores y tanques de almacenamiento, refuerzos estructurales de plataformas, entre otras.

Las tuberías de material compuesto tienen numerosas ventajas competitivas frente a las tuberías metálicas para el transporte de gas, petróleo o fluidos multifásicos, así como también en aplicaciones que requieren la inyección a alta presión de agua o CO₂. Los costos de instalación, operación y mantenimiento se reducen considerablemente ya que se comercializan en rollos de hasta 2740 m, que requieren menos personal y equipos para la instalación, no utilizan soldadura, recubrimientos o rayos X y, muy importante, no presentan corrosión. El montaje de esta tecnología ha sido diseñado para ser más rápido, seguro y con un menor impacto al medio ambiente.

A pesar de las ventajas de la tubería compuesta, se tienen registros a nivel internacional de rupturas inesperadas ocurridas varios años después de instalada la tubería, realizándose algunos estudios sobre las posibles fallas, ya que esto ocasiona el derrame del material transportado como hidrocarburo o gas, reduciéndose así la productividad. Los diferentes tipos de falla generados a nivel superficial tales como grietas, ralladuras, poros, deformación excesiva se han

registrado en la literatura en forma general y estos afectan las propiedades mecánicas de la tubería que conllevan fugas del hidrocarburo.

Actualmente, en Colombia no se encuentran estudios relacionados que permitan ajustar los modelos de daño de la nueva tecnología a las condiciones locales. En el país aún se necesitan más avances, estudios y directrices acerca del comportamiento de las tuberías enrollables compuestas como, por ejemplo, respuesta al impacto, fatiga, desgaste, etc., especialmente en ambientes hostiles como en el mar o ambientes de mucha erosión. Existen normas internacionales en relación a las pruebas del material como la ISO 14692, ISO 24817 y la especificación API 15HR que ofrecen una descripción muy completa de pruebas y evaluación de plástico reforzado con vidrio (GRP) pero aún se necesita especificar procedimientos más detallados para el uso en campos petroleros.

1.2 JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA

El uso de materiales compuestos ha ido creciendo rápidamente en la última década a nivel mundial y esto se debe principalmente a su atractiva relación de resistencia/peso con respecto a las tuberías metálicas convencionales, con múltiples aplicaciones en extracción, transporte de petróleo y gas, inclusive extendiéndose en la industria petrolera de altamar (offshore). La demanda mundial de tubos a base de epoxi se ha estimado en 216.000 toneladas al año y se prevé que la tendencia siga en aumento. Por tanto, la industria de Oil & Gas en Colombia no va ser ajena a la implementación de este tipo de tecnología y con los años se verá un elevado incremento de este tipo de tubería en campos y pozos petroleros nacionales.

En Colombia, desde hace cerca de 6 años empresas del sector petrolero vienen introduciendo tuberías de material compuesto para reemplazar las tuberías

metálicas ya existentes e instalar nuevas líneas. Se estima que en el mediano plazo, el porcentaje de uso de materiales compuestos supere la tecnología de tubería convencional para el transporte de hidrocarburos. Sin embargo, la mayoría de estudios y pruebas que se tienen como referencia para el comportamiento mecánico de estos elementos han sido elaborados en el extranjero, teniendo en cuenta mecanismos de daño que no se ajustan del todo a las condiciones de operación locales. Resulta fundamental la identificación de alternativas, planteamiento de modelos o posibles soluciones tecnológicas, que permitan reducir las fallas y estimar correctamente la vida útil de las nuevas tuberías de transporte de crudo y refinados en la industria de Oil & Gas a nivel nacional.

Como las tuberías compuestas se consideran una tecnología relativamente nueva, actualmente productores tales como Ecopetrol, a través del convenio UIS- ICP, están interesados en obtener modelos para los esfuerzos y deformaciones de las tuberías cuando estas soportan presión interna y externa, fuerzas axiales, los efectos de las altas temperaturas, formas de falla, vida útil, etc. Es difícil encontrar soluciones utilizando métodos analíticos, debido a que se trata de una tubería multicapa, haciéndose muy complejo el problema. Por ello, el método de elementos finitos puede ser la mejor manera de analizar el comportamiento integral de las tuberías compuestas enrollables en las condiciones de operación de Colombia, en especial la tubería Fiberspar.

En esta misma línea, se busca dirigir los esfuerzos del grupo de investigación GIEMA hacia la investigación aplicada. En particular, la incorporación y transferencia de tecnología para la línea de Integridad Estructural mediante la evaluación y/o incorporación de materiales aplicados al sector de Oil & Gas, selección de materiales, tecnologías de inspección-monitoreo y simulación para su efectiva aplicación en los campos de producción a nivel nacional de tal manera que los resultados del proyecto puedan ser usados como base de conocimiento para

extender el uso de tuberías de material compuesto a otros sectores industriales donde son muy relevantes: industria de la minería, química, alimentos, civil, etc.

2. OBJETIVOS DEL PROYECTO DE GRADO

2.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar modelos numéricos para tuberías enrollables de materiales compuestos para el transporte de combustible (Oil & Gas), con el fin de predecir la integridad estructural de la tubería mediante el uso de un software de elementos finitos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir condiciones de contorno basadas en las condiciones comunes de operación en el sector Oil & Gas nacional, las cuales oscilan entre 750 y 2500 psi, en diámetros de 2 a 6.5 pulgadas. La información específica referente a las condiciones de operación será obtenida dentro del marco del Acuerdo de Cooperación - Área Tecnológica Integridad de la Infraestructura, AC003, Convenio Marco de Cooperación Tecnológica y Científica 5222395 UIS – ICP
- Definir el modelo anisótropo característico del material de tuberías enrollables Fiberspar de cuatro capas: barrera de presión termoplástica, capa de unión, laminado reforzado con fibra de vidrio, capa termoplástica resistente al desgaste.
- Realizar un análisis del modelo mecánico considerando las condiciones de contorno y características del material, a través de un análisis numérico de esfuerzo-deformación de la tubería Fiberspar sometida a cargas de presión por medio del software ANSYS®.

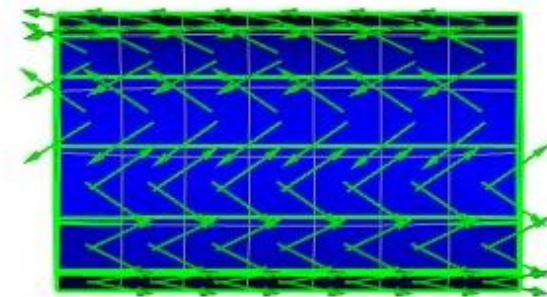
- Determinar las condiciones y criterios de falla Tsai-Hill y Tsai-Wu, para analizar el comportamiento de la tubería Fiberspar respecto a las propiedades mecánicas para condiciones de operación típicas en la región.

3. INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE LA TUBERÍA FIBERSPAR

Las tuberías flexibles de material compuesto de tecnología de filamentos enrollables tienen un comportamiento anisótropo debido a los diferentes ángulos que presentan las capas de refuerzo. Las tuberías pueden estar expuestas a cargas termomecánicas debido al fluido circulante, y se caracterizan por tener una baja rigidez a la flexión comparadas con tuberías de acero.

La tubería Fiberspar está constituida por 3 capas principales: capa interior y exterior de polietileno de alta densidad PE 3408 [15] y un refuerzo de epoxi y fibra de vidrio tipo E (dividido en 2 Subcapas 55°, subcapas -55°) de refuerzo, las cuales están apiladas de manera simétrica, las fibras de cada refuerzo corresponde al orden de [+55,-55,+55,-55], la Figura 1 ilustra la forma de las orientaciones de la fibras.

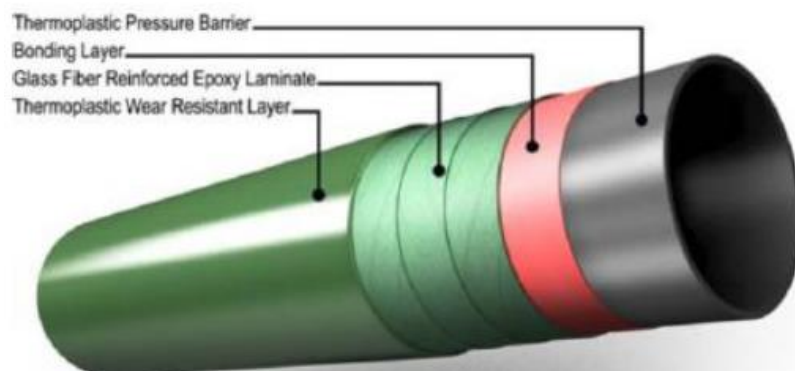
Figura 1. Orientación de las fibras de la capa material compuesto.



La Figura 2 ilustra la forma integral de la tubería, donde la primera capa de material corresponde a una capa termoplástica resistente al desgaste (thermoplastic wear resistant layer) la cual protege a la tubería de las condiciones externas a ellas, la segunda capa son fibras de vidrio reforzadas con epoxi (glass fiber reinforced epoxy

laminated layers) que permite mayor resistencia y flexibilidad de la tubería, la tercera capa es una capa de unión (bonding layer) la cual refuerza la fibra de vidrio y está unida con la cuarta capa (thermoplastic pressure barrier) que funciona como una barrera de presión termoplástica, esta es la que entra en contacto con el fluido que circula por ella.

Figura 2. Tubería Fiberspar.



Fuente: www.fiberflex.com.ex

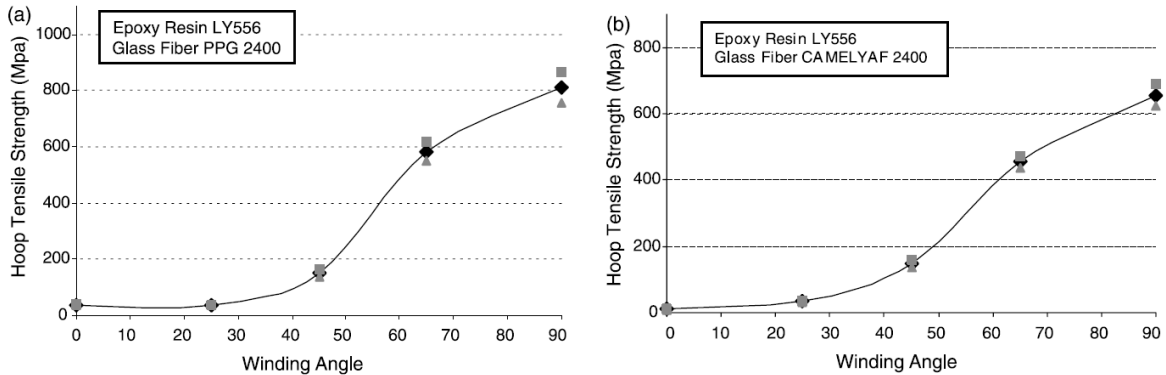
3.1 CONDICIONES COMUNES DE OPERACIÓN

La tubería Fiberspar en su catálogo presenta una variedad de condiciones de operación, las cuales oscilan entre 750 psi y 2500 psi, estas presiones se conocen como presión nominal o presión de funcionamiento. La tubería enrollable en el sector petrolero colombiano trabaja con una presión nominal de 750 psi (5,17 MPa). Se han realizado pruebas de estallido para la tubería, las cuales oscilan entre 3940,6 psi (27,17 MPa) y 4800 psi (31 MPa). Esta prueba hace referencia a la máxima presión a la cual la tubería falla, también es conocida como prueba de explosión.

3.2 ESFUERZOS EN TUBERÍAS COMPUESTAS

Kaynak et al. [16] realizaron un ensayo de acuerdo a la norma de ASTM D2290 para tuberías compuestas enrollables con fibras de vidrio o carbono unidas con resina epoxi con el objetivo de medir la resistencia última a la tracción aparente. Se observó una fuerte dependencia de la resistencia a la tensión tangencial y el módulo de elasticidad con respecto al ángulo de enrollamiento (ver Figura 3). Con el ensayo ASTM D2290 se concluyó que las muestras de aro de fibra de vidrio con epoxi para ángulos de arrollamientos entre $\pm 45^\circ$ y $\pm 65^\circ$ presentan resistencia de tensión a la rotura entre 180 MPa y 600 MPa, respectivamente.

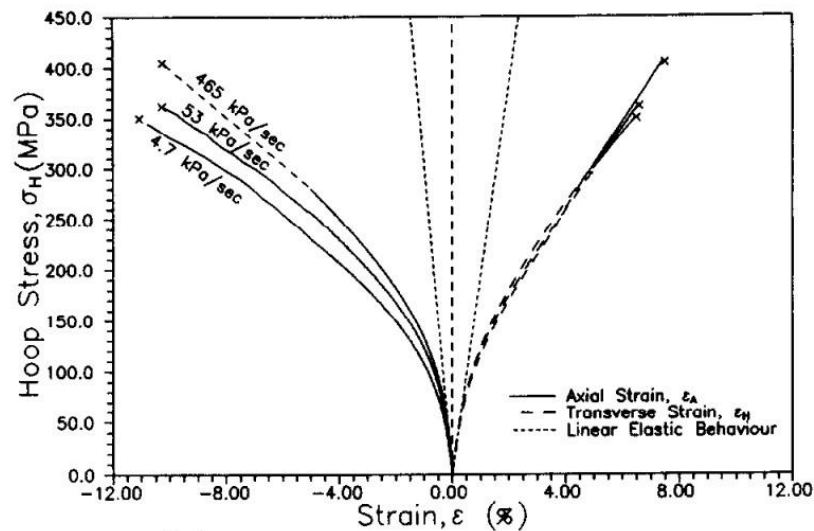
Figura 3. Curvas de esfuerzo vs diferentes ángulos de arrollamiento para tuberías de epoxi-fibra de vidrio o carbono [16].



Las tuberías de fibra de vidrio se consideran ortótropas por naturaleza. Las propiedades mecánicas en los tres ejes perpendiculares en los tubos GRP son distintos. Para las tuberías GRP de transporte de fluidos se prefiere que el ángulo ideal de bobinado o enrollamiento de la fibra sea de $\pm 55^\circ$ con respecto a la dirección axial.

Carroll et al. [17] realizaron un estudio experimental de tubos de fibra de vidrio y epoxi con ángulos de arrollamiento de $\pm 55^\circ$ con diámetro interno de 2 in. Se utilizó una máquina de ensayo que permite diferentes relaciones de cargas radial y axial. Las curvas de esfuerzo-deformación resultantes mostraron un comportamiento complejo de los tubos. La Figura 4 muestra los esfuerzos circunferenciales hasta la rotura cuando es aplicada una carga de presión pura (1 Hoop: 0 Axial) registrando esfuerzos máximos de 402 MPa en dirección circunferencial.

Figura 4. Curvas de esfuerzo deformación en una tubería de fibra de vidrio epoxi con una relación de carga 1 Hoop: 0 axial.



El comportamiento en las tuberías de fibra de vidrio es elástico-lineal al inicio, seguido de un comportamiento no lineal cerca a la falla, primero por pequeñas fugas y segundo por rupturas. En la práctica las tuberías están sometidas a esfuerzos longitudinales y circunferenciales, esto implica que el esfuerzo longitudinal podría ser Poisson veces el esfuerzo circunferencial, para el caso de presión interna. Si la tubería se encuentra fija y cerrada en los extremos, la relación es 0.5.

Generalmente, la respuesta no lineal es debida a la formación de grietas en la matriz, a mayor carga estas grietas se incrementan. La ISO 14692 es el estándar principal para predecir la presión máxima de servicio para tuberías GRP [18].

3.3. LAMINADO

Un laminado es un conjunto de láminas apiladas unas sobre otras y que, su proceso de fabricación, garantiza la continuidad de la matriz en la dirección ortogonal al plano de las láminas. En otras palabras, cada lámina trabaja conjuntamente con las otras.

Un tipo de apilamiento del laminado que suele utilizarse con mucha frecuencia, y que corresponde al modelo de la tubería Fiberspar, son los denominados laminados simétricos. Para definirlos, es necesario establecer el concepto de plano medio o plano de simetría que separa en dos mitades, del mismo espesor, el laminado. En este plano se consideran los ejes x e y , y un eje z , ortogonal al plano. Cada una de las láminas se define por sus coordenadas z_i , de su cara inferior (más próxima al plano medio), y z_{i+1} , de su cara superior (más alejada del plano medio) y por la orientación de las fibras en su interior respecto a una dirección de referencia que, usualmente, coincide con el eje x definido anteriormente. Un laminado es simétrico cuando la secuencia de apilamiento de las láminas a uno y otro lado del plano medio son idénticas.

3.4 MODELO DE ELASTICIDAD PARA MATERIALES COMPUESTOS.

Consideremos los vectores de tensiones $\boldsymbol{\sigma} = \{\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}\}^T$, desplazamientos \mathbf{u} y deformaciones $\boldsymbol{\epsilon}$, definidos sobre el dominio $\Omega \subset \mathbb{R}^2$. Tomemos \mathbf{b} como las cargas

volumétricas, \mathbf{t} las tracciones de Neumann y $\bar{\mathbf{u}}$ las condiciones de Dirichlet. El problema de elasticidad se define como encontrar \mathbf{u} tal que cumpla:

$$\mathbf{L}^T \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} = 0 \text{ en } \Omega \quad (1)$$

$$\mathbf{G}\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{t} \text{ en } \Gamma_N \quad (2)$$

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} \text{ en } \Gamma_D \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}) = \mathbf{L}\mathbf{u} \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}), \quad (5)$$

Donde \mathbf{L} es un operador diferencial, \mathbf{G} es un operador que proyecta las tensiones para el equilibrio en el contorno y \mathbf{C} es la matriz con la elasticidad del material.

El problema anterior expresado en su forma variacional se escribe:

Encontrar $\mathbf{u} \in \mathcal{V}$ tal que $\forall \mathbf{v} \in \mathcal{V}$:

$$\int_{\Omega} \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{v})^T \mathbf{D}\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}) d\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{v}^T \mathbf{b} d\Omega + \int_{\Gamma_N} \mathbf{v}^T \mathbf{t} d\Gamma, \quad (6)$$

Donde $\mathcal{V} = \{\mathbf{v} | \mathbf{v} \in [\mathbf{H}^1(\Omega)]^2, \mathbf{v}_{\Gamma} = \mathbf{0}\}$.

En un material compuesto las fibras pueden estar orientadas en múltiples direcciones arbitrarias. Dependiendo de su disposición, el material presenta comportamientos marcadamente diferenciados en sus respectivas direcciones. Considerando los planos de simetría ortogonales del modelo, el material es de tipo

ortótropo. La relación tensión deformación de la ley constitutiva en (5) se puede expresar en términos de la matriz de rigidez **C** como:

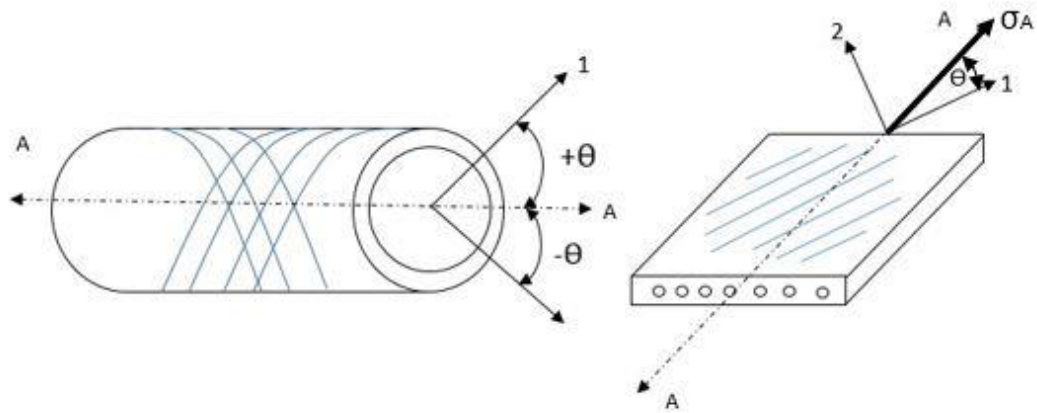
$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

Donde el comportamiento del material puede ahora definirse mediante 9 constantes independientes. Las constantes C_{ij} se obtienen a partir de la teoría clásica de laminados considerando las propiedades elásticas de la fibra y la matriz. Se puede apreciar que las deformaciones angulares y las deformaciones longitudinales están desacopladas de las tensiones normales y las tensiones tangenciales, respectivamente, debido a los términos nulos. Además, no hay interacción entre las tensiones tangenciales y las deformaciones angulares en los diferentes planos.

3.4.1 Rigidez plana de laminados simétrico. Los laminados simétricos se caracterizan por tener un plano de simetría, que separa las dos mitades de laminado con el mismo espesor de lámina y orientación de las fibras, tal es el caso de la tubería Fiberspar. La Figura 5 representa una capa de material compuesto de la tubería Fiberspar, donde se puede observar cómo están enrolladas las láminas de fibra de vidrio y epoxi, además de la identificación de las coordenadas según la dirección de la fibra en la lámina, donde el ángulo de orientación de las fibras es con respecto al eje axial (z).

Las propiedades en dirección de la fibra difieren de las propiedades en dirección de los ejes principales del cilindro (axial, radial, circunferencial). Para identificar las propiedades de la tubería es necesario conocer y establecer las relaciones con respecto a las direcciones del material compuesto.

Figura 5. Esquema de la capa de laminado epoxi-fibra de vidrio, donde 1 es la dirección de la fibra y 2 la dirección transversal de la fibra.



Dadas las características geométricas de la lámina, se asume un estado de tensión plana. La relación deformación tensión para una lámina unidireccional se puede expresar en función de la matriz de flexibilidad $\mathbf{S} = \mathbf{C}^{-1}$ como:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{11} & 0 \\ S_{11} & S_{11} & 0 \\ 0 & 0 & S_{11} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Donde las componentes de las matrices de flexibilidad y rigidez se han sustituido por las correspondientes relaciones con las constantes elásticas de la lámina E_1 , E_2 , G_{12} , ν_{12} , cuyos valores pueden estimarse a partir de las propiedades de los materiales constituyentes.

Las láminas unidireccionales tienen sin embargo unas direcciones preferentes asociadas a la orientación de la fibra del refuerzo o a la simetría de los planos. Por ello es conveniente utilizar dos sistemas de coordenadas: uno para definir los ejes locales (1, 2) cuya dirección primera coincide con la dirección de la fibra, y otro para definir los ejes globales (x, y, z).

Cada orientación de lámina utiliza un sistema de coordenadas local, siendo preciso referir la respuesta individual de cada lámina al sistema de coordenadas global o viceversa. Para la transformación de las componentes de tensión y deformación entre los sistemas de coordenadas de ecuaciones globales y los del material compuesto se emplea la matriz de rotación de tensiones:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = T_\sigma(\theta) \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}, \quad (9)$$

$$T_\sigma(\theta) = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & 2\sin\theta\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & -2\sin\theta\cos\theta \\ -\sin\theta\cos\theta & \sin\theta\cos\theta & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{bmatrix}$$

Para el caso de las deformaciones se tiene

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = T_\varepsilon(\theta) \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}, \quad (10)$$

$$T_{\varepsilon}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & \sin\theta\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & -\sin\theta\cos\theta \\ -2\sin\theta\cos\theta & 2\sin\theta\cos\theta & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{bmatrix}$$

Las relaciones tensión deformación conllevan ciertas transformaciones contenidas en la ecuación (11) :

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} &= T_{\sigma}^{-1}(\theta) \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} T_{\varepsilon}(\theta) \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

Y por tanto las relaciones de esfuerzo y deformación en una lámina ortótropa pueden ser escritos como:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} &= T_{\varepsilon}^{-1}(\theta) \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} T_{\sigma}(\theta) \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

Siendo las matrices \bar{Q} y \bar{S} las denominadas matrices reducidas transformadas (o no orientadas) de rigidez y flexibilidad, respectivamente, referenciadas ahora en ejes globales.

3.4.2 Solución de elementos finito. Usando una formulación convencional para la discretización de elementos finitos (FEM) mediante Galerkin en el problema anterior, se busca la solución $\mathbf{u}^h \in \mathbf{V}^h$ tal que $\forall \mathbf{v} \in \mathbf{V}^h$:

$$\int_{\Omega} \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{v})^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}^h) d\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{v}^T \mathbf{b} d\Omega + \int_{\Gamma_N} \mathbf{v}^T \mathbf{t} d\Gamma, \quad (13)$$

la cual se resuelve utilizando la teoría clásica de elementos finitos [19], dando como resultado el sistema lineal $\mathbf{KU} = \mathbf{F}$, siendo \mathbf{K} la matriz de rigidez, \mathbf{U} el vector de desplazamientos, y \mathbf{F} el vector de fuerzas equivalentes.

3.5 CRITERIOS DE FALLA

Los materiales compuestos no son homogéneos, son anisótropos y quebradizos. Esto determina los diferentes modos de falla del material, algunos relacionados con la falla de los constituyentes y otros relacionados con la falla de la interfase.

En las fibras se pueden considerar dos modos de falla diferentes: relacionado con una carga a tracción, relacionado con una carga a compresión. Una característica de la fibra es que no suele mostrar deformación plástica, estando relacionada la falla con un fenómeno de redistribución de esfuerzos a las fibras vecinas. Esta redistribución puede causar una nueva ruptura de fibras. En el caso de una carga a compresión, el micropandeo progresivo de las fibras tiene lugar hasta que las fibras se rompen.

En la matriz la microfisuración es el principal modo de falla. Esto equivale a grietas de la matriz paralelas a la dirección de la fibra sobre el espesor completo de la lámina y especialmente para aquellas láminas en las que el refuerzo no está en la misma dirección de la carga aplicada.

Otro modo de falla común es la desunión, que equivale a una pérdida de adhesión y un deslizamiento relativo entre la fibra y la matriz debido a las diferencias en los esfuerzos cortantes de deformación en la interfase fibra-matriz [20].

Para el diseño con materiales compuestos se suelen considerar criterios interactivos de falla que tienen en cuenta las interacciones de las tensiones. Entre los criterios interactivos más comunes están Tsai-Hill y Tsai-Wu [21].

3.5.1 Criterio de Tsai-Hill. Este es un criterio basado en los criterios de falla polinomiales y es uno de los criterios más usados y con resultados más ajustados a valores experimentales [21], [22]. La siguiente ecuación representa el criterio de Tsai-Hill

Este es un criterio basado en los criterios de falla polinomiales y es uno de los criterios más usados y con resultados más ajustados a valores experimentales [21], [22]. La siguiente ecuación representa el criterio de Tsai-Hill

$$\left(\frac{\sigma_1}{S_{1u}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{S_{2u}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12u}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_1\sigma_2}{S_{1u}^2}\right) < 1 \quad (14)$$

Donde S_{1u} es la resistencia de la lámina a tracción en dirección longitudinal, S_{2u} en dirección transversal y S_{12u} la resistencia de la lámina por cortadura en el plano. Los

subíndices 1, 2 y 12 representan los esfuerzos de tensión paralelos y transversales a la dirección de la lámina compuesta y el esfuerzo cortante respectivamente al ser el material transversalmente isótropo. La ecuación indica que la falla no ocurrirá mientras sea menor que uno. La desventaja de Tsai-Hill es que no diferencia entre resistencia a la tensión de fallo y de compresión durante al evaluación. Para el caso de carga uniaxial fuera de ejes orientados se tiene:

$$\frac{1}{\sigma_{\phi}^2} > \frac{\cos^2 \varphi^2 (\cos^2 \varphi - \text{sen}^2 \varphi)}{S_{1u}^2} + \frac{\text{sen}^4 \varphi}{S_{2u}^2} + \frac{\cos^2 \varphi \text{sen}^2 \varphi}{S_{12u}^2} \quad (15)$$

Donde φ representa el ángulo entre las fibras y la dirección de la carga.

3.5.2 Criterio de Tsai-Wu. Basado en la teoría de fallo de la energía total de deformación de Beltrami, el fallo está determinado por la siguiente expresión [21], [22]:

Basado en la teoría de fallo de la energía total de deformación de Beltrami, el fallo está determinado por la siguiente expresión [21], [22]:

$$f_1 \sigma_1 + f_2 \sigma_2 + f_6 \tau_{12} + f_{11} \sigma_1^2 + f_{22} \sigma_2^2 + 2f_{12} \sigma_1 \sigma_2 + f_{66} \tau_{12}^2 < 1 \quad (16)$$

Donde $f_1, f_2, f_6, f_{11}, f_{22}, f_{66}$ son descritos en términos de las resistencias últimas en las direcciones principales y f_{12} es determinado experimentalmente bajo carga de tensión biaxial. Este criterio puede ser aplicado a una lámina para encontrar la primera falla en la capa. Tsai-Wu es ampliamente usado en el análisis de modelos

progresivos de daño para laminados ya que permite determinar los fallos tridimensionales bajo una misma expresión.

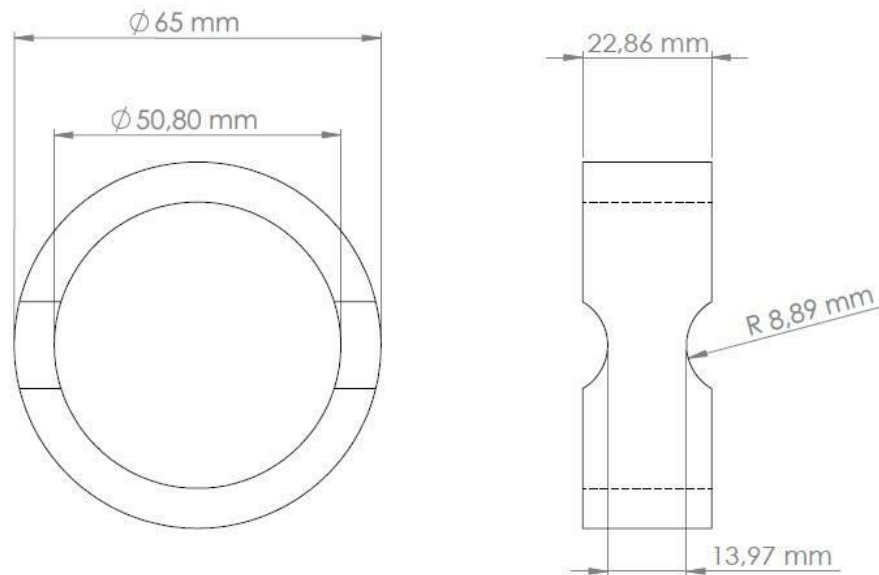
4. RESULTADOS

A continuación se explica el procedimiento experimental y los resultados de simulación numérica para validar los resultados.

4.1 RESISTENCIA A LA TENSIÓN APARENTE

Se realizó en laboratorio la prueba de resistencia a tracción para obtener valores de la tensión normal aparente bajo la norma ASTM D-2290 [23] utilizando un segmento de anillo partido. La probeta es una muestra de tubería tal como se observa en la Figura 6, el número de probetas ensayadas fueron cinco en total. La norma es aplicable a tuberías compuestas de resina termoestable reforzada con fibras.

Figura 6. Geometría de la probeta del ensayo ASTM D2290.



En la Tabla 1 se muestran los valores experimentales de los esfuerzos de tensión aparente que actúa sobre el área mínima de la probeta de ensayo realizados a cinco muestras en total, también es registrada la carga máxima necesaria para la rotura y su desviación estándar.

Tabla 1. Resultados de las pruebas de laboratorio a cinco muestras de tubería Fiberspar para carga máxima.

Muestra	Área de probeta (mm²)	Carga máxima (N)	Esfuerzo último a la tensión (MPa)
1	88,135	13377	75,88
2	88,87	15305	85,12
3	87,96	13046	74,15
4	98,35	15501	78,8
5	90,11	16809	93,26
Promedio	90,885	14807	81,442
s	4,286	1.571	7,815

4.2 MODELO NUMÉRICO

En esta sección se describe el modelo numérico realizado por elementos finitos. Se define el modelo del material y las diferentes condiciones de contorno utilizadas para los análisis de la integridad estructural de la tubería.

4.2.1 Dimensiones y modelo del material. Para la definición de la geometría del modelo, la Tabla 2 registra las dimensiones de las diferentes capas constitutivas.

Tabla 2. Características geométricas de las capas de la tubería Fiberspar.

Capas	Diámetro interno		Diámetro externo		Espesor	
	[in]	[mm]	[in]	[mm]	[in]	[mm]
Polietileno interior	2	50,8	2,196	55,78	0,09	2,3
Laminado epoxi-fibra de vidrio	2,196	55,78	2,354	59,79	0,09	2,3
Polietileno exterior	2,354	59,79	2,55	64,77	0,098	2,5

La capa de refuerzo está compuesta por 4 láminas apiladas con orientaciones de $\pm 55^\circ$, las características de la configuración de dicho apilamiento mostrada en la Tabla 3 se puede observar el espesor para cada lámina y espesor total de la capa de refuerzo.

Tabla 3. Características de la capa de laminado epoxi-fibra de vidrio requeridas para el modelamiento de la tubería Fiberspar.

	Ángulo de las fibras por lámina (°)	Espesor por lámina		Espesor total	
		In	mm	in	mm
Epoxy/Fibra de vidrio	[55/-55/55/-55]	0.0226	0.575	0.09	2.3

Las propiedades mecánicas de las capas empleadas en la simulación se encuentran en la Tabla 4. Los resultados para los módulos de Young, coeficientes de Poisson y módulos de rigidez a cizalladura para la capa de refuerzo corresponden a los valores calculados a partir de la teoría clásica de laminados, según se indica en las secciones anteriores.

Tabla 4. Propiedades físicas de cada capa de la tubería Fiberspar

Capa	Modulo de Young			Coeficiente de Poisson			Modulo de cizalladura			Densidad [kg/m ³]
	E1 [Mpa]	E2 [Mpa]	E3 [Mpa]	v12	v23	v13	G12 [MPa]	G23 [MPa]	G13 [Mpa]	
Capa Interior de HDPE	862	/	/	0,4	/	/	303,5	/	/	949
Refuerzo Epoxy/fibra de vidrio	35000	9000	9000	0,28	0,4	0,28	4700	3500	4700	1,85E-09
Capa exterior de HDPE	862	/	/	0,4	/	/	303,5	/	/	949

El subíndice 1 indica la dirección de la fibra, el subíndice 2 indica la dirección transversal a la fibra y el subíndice 3 hace referencia a la dirección perpendicular al plano 12.

La capa de polímero HDPE tiene comportamiento isótropo, sus propiedades son las mismas en todas las direcciones, así que las propiedades en la dirección 1 son las mismas para todas las direcciones. EL HDPE se caracteriza por tener una alta capacidad de resistencia térmica y también resistente al impacto. El refuerzo epoxi-fibra de vidrio es un material ortótropo, por eso sus propiedades cambian en las direcciones principales, tal como se observa en la Tabla 4. La capa de refuerzo está diseñada para soportar los altos esfuerzos y presiones generados en la tubería. Estos materiales fueron consultados e identificados de acuerdo a la patente de la tubería y catálogos de fabricantes [15], [24].

4.2.2 Mallado. Con el fin de controlar el error de discretización, se realizaron pruebas de independencia de malla para verificar la convergencia de la solución al rango asintótico. Los resultados se observan en la Figura 7 y en la Tabla 5. El refinamiento se realizó para la capa de refuerzo, hasta obtener una variación del esfuerzo circunferencial menor al 1%. El mallado se realiza con elementos hexaédricos lineales para la capa de epoxi-fibra de vidrio y para las capas interior

y exterior de polietileno. Entre las capas se definieron condiciones de contacto lineales tipo penalti.

Figura 7. Convergencia de los esfuerzos sobre la capa epoxi-fibra de vidrio.

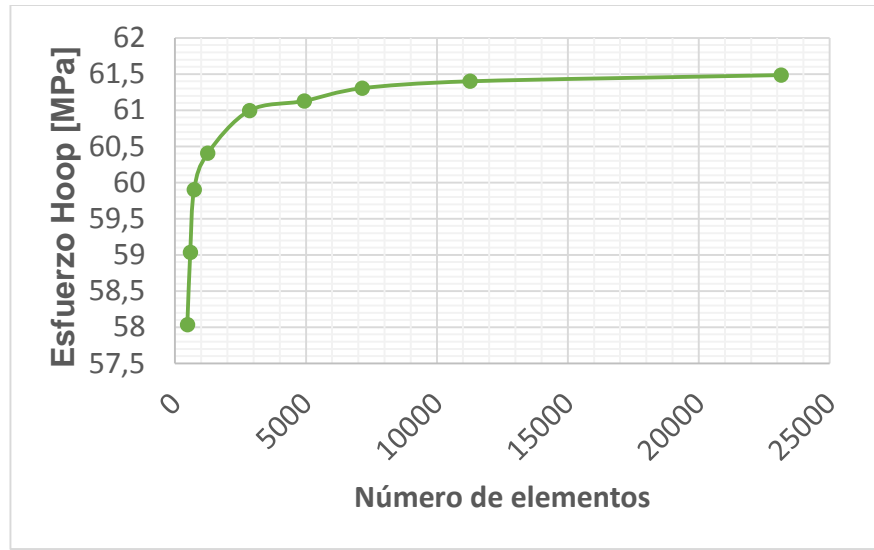
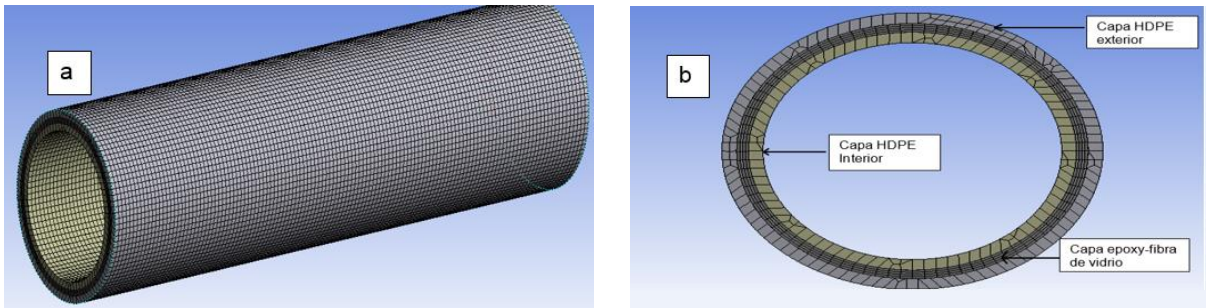


Tabla 5. Convergencia de los esfuerzos circunferenciales máximos del laminado.

Número de elementos	Esfuerzos Max[MPa]	Error
468	58.034	1.723%
580	59.034	1.467%
726	59.9	0.841%
1247	60.404	0.977%
2837	60.994	0.220%
4930	61.128	0.288%
7140	61.304	0.157%
11264	61.4	0.140%
23145	61.486	

La Figura 8 muestra el mallado final obtenido para el ensamble con una longitud de 10 in. El mallado final total de la tubería contiene 74112 elementos y 241215 nodos.

Figura 8. Modelo de EF: (a) Isométrico y (b) vista frontal Modelo de EF.



4.2.3 Norma ASTM D2290. Para la simulación de la norma se tuvo en cuenta la carga promedio que actúa sobre el área mínima utilizada en la prueba experimental (ver Tabla 1) correspondiente a un valor de 14807 N sobre al área mínima, se modela media tubería considerando las condiciones de simetría.

La Figura 9 muestra los resultados de la tensión circunferencial presentados sobre la tubería, que para la sección transversal considerada coincide con la tensión normal, con un valor máximo de 346 MPa. El esfuerzo aparente calculado sobre el área mínima de la muestra corresponde a 82,312 MPa (ver Tabla 6). Teniendo en cuenta los resultados de laboratorio para la tensión aparente promedio de 81.442 MPa, se puede obtener el porcentaje de error relativo que existe entre la prueba experimental y el modelo numérico con un valor igual a 1,06%. Dichos resultados permiten validar el modelo del material y las condiciones de contorno consideradas en el modelo numérico para la tubería Fiberspar.

Figura 9. Resultado de la simulación en el área de concentración de esfuerzos.

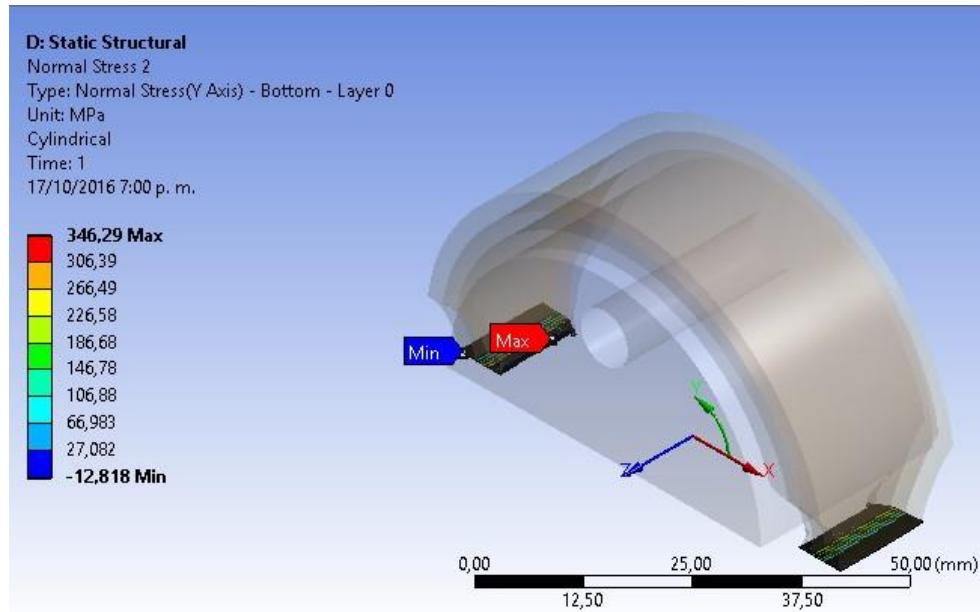


Tabla 6. Comparación del resultado experimental y de la simulación.

Área [mm ²]	Carga máxima Promedio [N]	Esfuerzo de Tensión Último [MPa]	
		Experimental	Simulación
90.88	14807	81.442	82.312

4.2.4 Condiciones de contorno a la presión de trabajo nominal. Las condiciones de contorno que se utilizan son las condiciones de presión nominal o de trabajo de la tubería, dichos datos se obtuvieron de fuentes del ICP. Se aplica una presión nominal de 5.17 MPa en dirección normal a la superficie interior. Se restringe el desplazamiento en dirección axial en ambas caras laterales. Este tipo de condición, conocida como abierta-abierta, representa la simetría de una sección de tubo y

afecta el valor de la tensión longitudinal calculada. Condiciones distintas se utilizan para simular codos y cierre por válvulas en la línea.

4.2.5 Esfuerzos a la presión de trabajo nominal. Para la presión nominal de trabajo de 5.17 MPa o 749 psi, los esfuerzos máximos principales obtenidos se presentan sobre la capa de refuerzo fibra de vidrio generando un esfuerzo máximo circunferencial de 61.4 MPa o 8917 psi, esto implica que cuando la tubería está sometido a tensión las capas interior y exterior tienden a apretar las capa de refuerzo, los esfuerzos máximos son los esfuerzos tangenciales. Los esfuerzos tangenciales en la capa exterior de HDPE fueron mayores a los de la capa interior con 4 MPa. Los resultados de los análisis respecto a los esfuerzos máximos axiales fueron de 19,9 MPa, mientras que los esfuerzos axiales en las capas interior y exterior fueron de 1,15 MPa y 1,5 MPa, respectivamente. Los resultados pueden observarse en la Tabla 7.

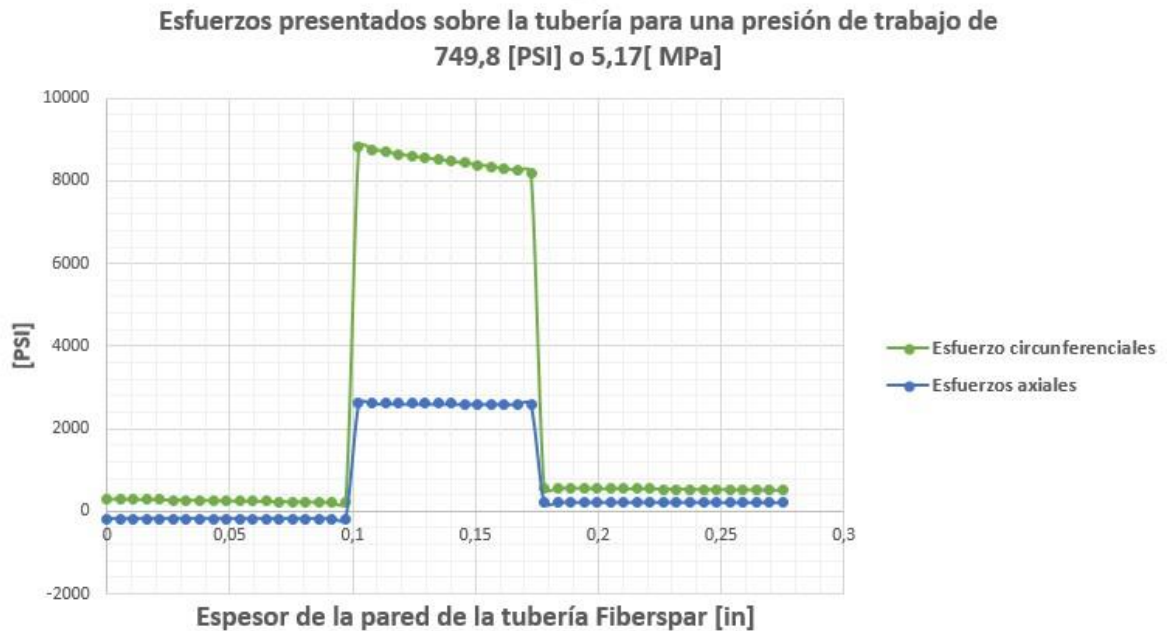
El análisis de deformación refleja que la capa que registra mayor deformación es la interior de polietileno con un valor de deformación a lo largo del aro de 0,018 mm/mm y un valor mínimo en la capa exterior de 0,01 mm/mm.

Los resultados indican que la lámina de compuesto de fibra de vidrio más cercana a la capa interior presenta mayor esfuerzo y este va disminuyendo en forma lineal hacia la última capa. En la Figura 10 se representan los esfuerzos longitudinales y circunferenciales generados a lo largo del espesor de la tubería, reflejando como la sollicitación es asumida mayormente por la capa de laminado. Las capas de polietileno funcionan para proteger la capa de laminado de la corrosión y transmitir los mayores esfuerzos al laminado compuesto. Como es de esperarse, los esfuerzos más significativos son los esfuerzos circunferenciales.

Tabla 7. Esfuerzos registrados sobre la tubería Fiberspar a la presión de operación.

Capa	Esfuerzos Circunferenciales		Esfuerzos Axiales	
	MPa	psi	MPa	psi
HDPE Capa interna	2,1	306,1	1,15	168
Laminado Epoxi-fibra de vidrio	61,4	8917	19,9	2892
HDPE Capa externa	3,9	575	1,5	223

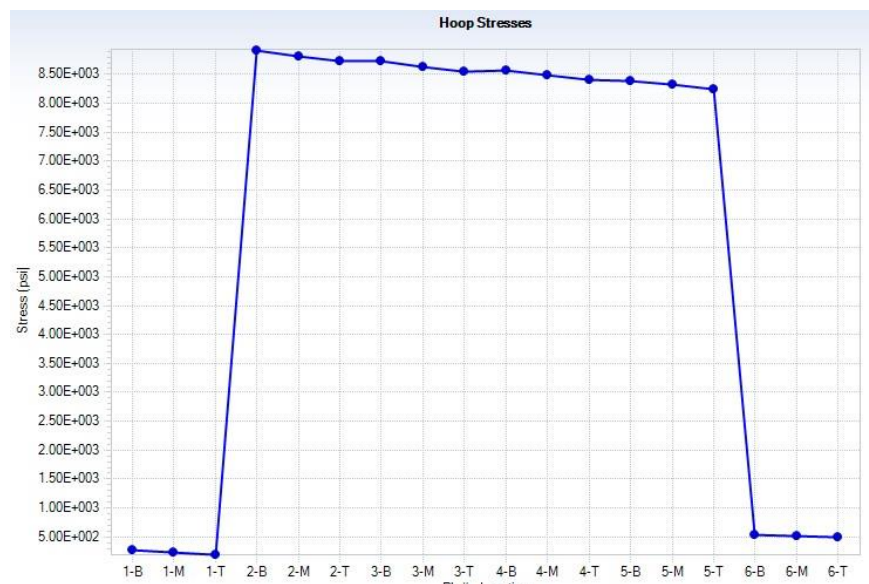
Figura 10. Esfuerzos circunferenciales y axiales sobre la tubería en función del espesor para una presión de 5,75 MPa



Para realizar una comparación teórica de los resultados obtenidos se utilizó el software Heliux Composite® que proporciona características del comportamiento del material compuesto, basado en una formulación analítica. Los esfuerzos circunferenciales y axiales se ilustran en la Figura 11 y Figura 12.

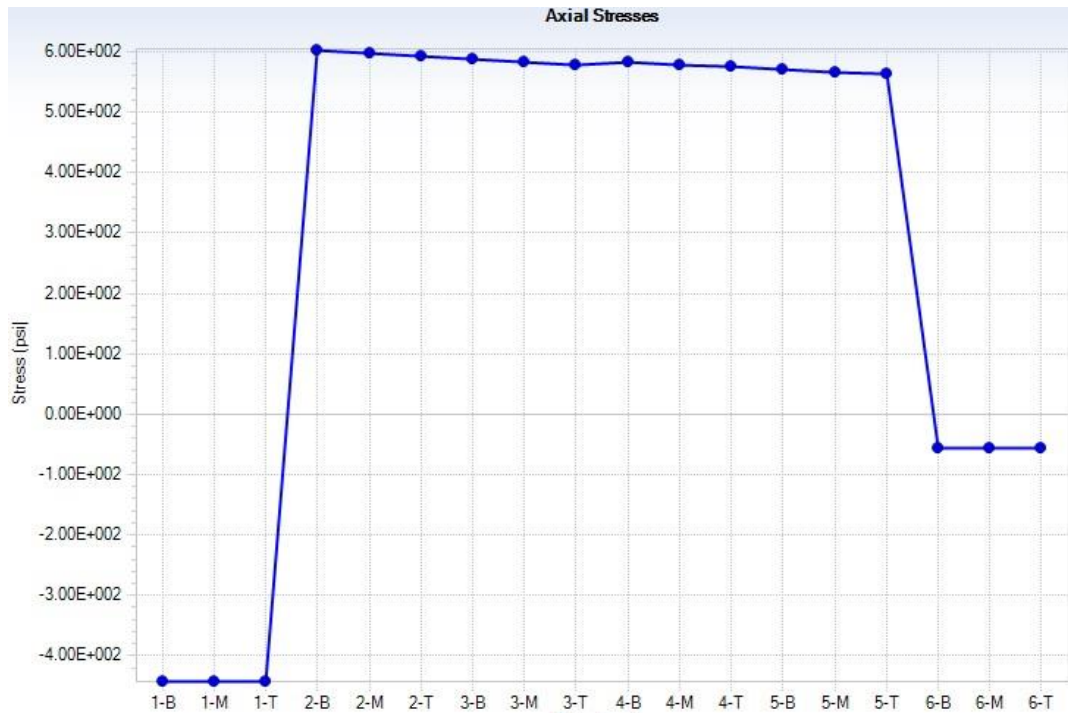
Los esfuerzos circunferenciales registrados máximos oscilan entre 8910 psi (61.4 MPa) y 8200 psi (56 MPa), valores muy cercanos a los obtenidos de 8917 psi y 8203 psi (Figura 10). La distribución de tensiones entre capas, a lo largo del espesor, también muestra el mismo comportamiento.

Figura 11. Esfuerzos circunferenciales obtenidos mediante el software Heliux con un valor máximo de 61,4 MPa (8910 psi).



Para los esfuerzos longitudinales la Figura 12 muestra que los esfuerzos máximos registrados son 602 psi (4,15 MPa), diferentes a los de la simulación de 2600 psi. La diferencia se debe a que Heliux no permite establecer las restricciones de desplazamiento longitudinal en comparación con la simulación.

Figura 12. Esfuerzos longitudinales obtenidos mediante el software Heliux con un valor máximo de 4,5 MPa (602 psi).



4.2.6 Evaluación de criterios de Tsai-Hill y Tsai-Wu. Se tuvieron en cuenta los criterios de fallo de Tsai-Hill y Tsai-Wu para la tubería de material compuesto Fiberspar. Para esto se emplearon 3 presiones, la primera presión nominal o de trabajo de 5.17 MPa, la segunda presión fue la de estallido o explosión de 27,1 MPa y para la tercera presión se consideró una presión intermedia para observar el cambio de criticidad de las fibras de material compuesto. A continuación se muestran los criterios de fallo en las tres distintas presiones mencionadas anteriormente.

Utilizando el criterio de Tsai-Hill y Tsai-Wu se confirma que para una presión de trabajo de 5.17 MPa no existe ningún rompimiento de fibra del material, por tanto, no hay fallo debido a que los criterios de fallo son menores a uno según los

resultados registrados en la Tabla 8, esta tabla indica que para una presión de 12,5 MPa, las fibras registran mayor sobrecarga y primera lámina interior es la más crítica, puede haber ruptura de fibra más no un fallo completo de la tubería. Mediante el análisis realizado para una presión de 27 MPa se confirma que hay fallos y todas las capas han superado el valor del criterio por encima de 1.

Tabla 8. Resultados de los análisis de criterios de fallo Tsai-Hill Tsai -Wu

Presion [MPa]	Tsail-Hill		Tsai-Wu	
	Valor máximo	lámina crítica	Valor máximo	lámina crítica
5,17	0,518	Ninguna	0,48	Ninguna
12,5	1,25	Primera	1,16	Primera
27	2,5	Todas	2,7	Todas

5. CONCLUSIONES

- Las condiciones de contorno en la simulación son de suma importancia debido a que si no se utilizan las más apropiadas, los resultados de los esfuerzos y criterios de fallo serán muy diferentes y el error entre el valor numérico y experimental será mucho mayor.
- De la simulación se puede observar que cuando la tubería ortótropa está sometida a una presión mayor de 12 MPa la primera lámina de epoxi-fibra de vidrio falla según los criterios de Tsai-Hill y Tsai-Wu, pero esto no quiere decir que la tubería falle por completo. A la presión de estallido de 27,17 MPa la tubería falla en todas las láminas.
- Durante la simulación se determinó el valor de los esfuerzos sobre la tubería cuando esta trabaja a su presión nominal de 5,17 MPa. También se comprobó que la capa de laminado compuesto es la que soporta los mayores esfuerzos con un valor de 62 MPa para los esfuerzos circunferenciales y de 19 MPa para los esfuerzos longitudinales.
- Se puede observar que el porcentaje de error entre los resultados de la prueba de laboratorio según la norma ASTM D2290 y la aproximación numérica es mínimo. Esto valida los parámetros utilizados para definir el modelo computacional.

6.REFERENCIAS

- [1] R. Rafiee, "On the mechanical performance of glass-fibre-reinforced thermosetting-resin pipes : A review," *Compos. Struct.*, vol. 143, pp. 151–164, 2016.
- [2] N. Ji, H. Geun, and J. Heum, "Structural analysis and optimum design of GRP pipes based on properties of materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 38, pp. 316–326, 2013.
- [3] D. Hull, "Research on composite materials at Liverpool University. I. Failure of filament wound tubes," *Phys. Technol.*, vol. 13, no. 5, 1982.
- [4] J. R. M. de Sousa, G. B. Ellwanger, and E. C. P. Lima, "Modelo tridimensional de elementos finitos para el análisis de esfuerzos de tubos flexibles," *Boletín Técnico*, vol. 42, no. 2, pp. 1–20.
- [5] X. Anping, S. Peng, Z. Jingjing, and Q. Yunxia, "FEA-based Comparison of Two Kinds of Steel Wire Reinforced Composite Pipes," *4th Int. Conf. Intell. Networks Intell. Syst.*, pp. 184–187, 2011.
- [6] K. Yu, E. V. Morozov, M. A. Ashraf, and K. Shankar, "Analysis of flexural behaviour of reinforced thermoplastic pipes considering material nonlinearity," *Compos. Struct.*, vol. 119, pp. 385–393, 2014.

- [7] K. Yu, E. V. Morozov, M. a. Ashraf, and K. Shankar, "Numerical analysis of the mechanical behaviour of reinforced thermoplastic pipes under combined external pressure and bending," *Compos. Struct.*, vol. 131, pp. 453–461, 2015.
- [8] L. A. Quintero Ortiz, J. R. Arciniegas Villamizar, M. C. Jiménez Romero, and A. Y. Vallen Vargas, "Efecto en las propiedades mecánicas de daños superficiales generados en tubería compuesta flexible para transporte de hidrocarburos.," *Eff. Superf. Damage Mech. Prop. Flex. Compos. Pipe Transp. Hydrocarb.*, no. 42, pp. 39–48, 2015.
- [9] Y. Bai, J. Tang, W. Xu, Y. Cao, and R. Wang, "Collapse of reinforced thermoplastic pipe (RTP) under combined external pressure and bending moment," *Ocean Eng.*, vol. 94, pp. 10–18, 2015.
- [10] Y. Reutov, "The Calculation of Multilayer Polymer Pipes Using Finite Elements and their Application to Gas and Oil Pipelines," pp. 3–5, 2013.
- [11] J. L. C. G. De Kanter and J. Leijten, "Thermoplastic Composite Pipe : Analysis and Testing of a Novel Pipe System for Oil & Gas."
- [12] H. Bakaiyan, H. Hosseini, and E. Ameri, "Analysis of multi-layered filament-wound composite pipes under combined internal pressure and thermomechanical loading with thermal variations," *Compos. Struct.*, vol. 88, no. 4, pp. 532–541, 2009.
- [13] M. Xia, "Bending behavior of filament-wound fiber-reinforced sandwich pipes," vol. 56, pp. 201–210, 2002.

- [14] P. D. Soden, M. J. Hinton, and A. S. Kaddour, "Biaxial test results for strength and deformation of a range of E-glass and carbon fibre reinforced composite laminates. Failure exercise benchmark data," *Fail. Criteria Fibre-Reinforced-Polymer Compos.*, vol. 62, pp. 52–96, 2004.
- [15] P. A. Quigley, S. C. Nolet, and J. G. Williams, "Composite spoolable tube," 2001.
- [16] C. Kaynak, E. S. Erdiller, L. Parnas, and F. Senel, "Use of split-disk tests for the process parameters of filament wound epoxy composite tubes," *Polym. Test.*, vol. 24, no. 5, pp. 648–655, 2005.
- [17] M. Carroll, F. Ellyin, D. Kujawski, and A. S. Chiu, "THE RATE-DEPENDENT BEHAVIOUR OF ± 55 FILAMENT-WOUND GLASS-FIBRE/EPOXY TUBES UNDER BIAXIAL LOADING," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 55, no. 95, pp. 391–403, 1995.
- [18] M. Shukry and B. Abdul, "BEHAVIOUR OF COMPOSITE PIPES UNDER MULTI-AXIAL STRESS This thesis is submitted with the requirements of Newcastle University for," no. January, 2012.
- [19] E. J. Barbero, *Finite Element Analysis of Composite Materials Using ANSYS*, Second. Boca Raton, U.S.A.: CRC Press, 2013.
- [20] L. S. Arias and L. Vanegas, "Falla de los materiales compuestos laminados,"

Sci. Tech., no. 25, pp. 113–118, 2004.

[21] M. E. Tuttle, *Structural Analysis of Polymeric Composite Materials*. New York, U.S.A., 2004.

[22] M. Molinier, “Análisis de los criterios de falla aplicados a los laminados compuestos,” *Ser. Monogr. en Mecánica Laminados Compuestos*.

[23] ASTM Standard, “ASTM 2290-12 Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced,” *ASTM B. Stand.*, pp. 1–8, 2016.

[24] National Oilwell Varco, “Fiberspar LinePipe The Leader In Spoolable Pipeline Systems ‘ Full Reel ’ Program Certified Installer Training,” 2010.

BIBLIOGRAFIA

ANPING, X., PENG, S., JINGJING, Z., & YUNXIA, Q. (2011). FEA-based Comparison of Two Kinds of Steel Wire Reinforced Composite Pipes. 4th International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems, 184–187. <http://doi.org/10.1109/ICINIS.2011.21>

ARIAS, L. S., & VANEGAS, L. (2004). Falla de los materiales compuestos laminados. *Scientia et Technica*, (25), 113–118.

BAI, Y., TANG, J., XU, W., CAO, Y., & WANG, R. (2015). Collapse of reinforced thermoplastic pipe (RTP) under combined external pressure and bending moment. *Ocean Engineering*, 94, 10–18. <http://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.10.002>

BAKAIYAN, H., HOSSEINI, H., & AMERI, E. (2009). Analysis of multi-layered filament-wound composite pipes under combined internal pressure and thermomechanical loading with thermal variations. *Composite Structures*, 88(4), 532–541. <http://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.05.017>

BARBERO, E. J. (2013). *Finite Element Analysis of Composite Materials Using ANSYS (Second)*. Boca Raton, U.S.A.: CRC Press.

Carroll, M., Ellyin, F., Kujawski, D., & Chiu, A. S. (1995). THE RATE-DEPENDENT BEHAVIOUR OF ± 55 FILAMENT- WOUND GLASS-FIBRE/EPOXY TUBES UNDER BIAXIAL LOADING. *Composites Science and Technology*, 55(95), 391–403.

DE SOUSA, J. R. M., ELLWANGER, G. B., & LIMA, E. C. P. (n.d.). Modelo tridimensional de elementos finitos para el análisis de esfuerzos de tubos flexibles. *Boletín Técnico*, 42(2), 1–20. Retrieved from http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0376-723X2004000200001&lng=es&nrm=iso&tlng=es

HULL, D. (1982). Research on composite materials at Liverpool University. I. Failure of filament wound tubes. *Physics in Technology*, 13(5). <http://doi.org/10.1088/0305-4624/13/5/I03>

Ji, N., GEUN, H., & HEUM, J. (2013). Structural analysis and optimum design of GRP pipes based on properties of materials. *Construction and Building Materials*, 38, 316–326. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.115>

KANTER, J. L. C. G. De, & LEIJTEN, J. (n.d.). Thermoplastic Composite Pipe : Analysis and Testing of a Novel Pipe System for Oil & Gas.

KAYNAK, C., ERDILLER, E. S., PARNAS, L., & SENEL, F. (2005). Use of split-disk tests for the process parameters of filament wound epoxy composite tubes. *Polymer Testing*, 24(5), 648–655. <http://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2005.03.012>

MOLINIER, M. (n.d.). Análisis de los criterios de falla aplicados a los laminados compuestos. Serie de Monografías En Mecánica de Laminados Compuestos.

National Oilwell Varco. (2010). Fiberspar LinePipe The Leader In Spoolable Pipeline Systems “ Full Reel ” Program Certified Installer Training. Retrieved from www.Fiberspar.com

QUIGLEY, P. A., NOLET, S. C., & WILLIAMS, J. G. (2001). Composite spoolable tube. USA.

QUINTERO Ortiz, L. A., ARCINIEGAS Villamizar, J. R., JIMÉNEZ Romero, M. C., & VALLEN Vargas, A. Y. (2015). Efecto en las propiedades mecánicas de daños superficiales generados en tubería compuesta flexible para transporte de hidrocarburos. The Effect of Superficial Damage on the Mechanical Properties of Flexible Composite Pipe for Transporting Hydrocarbons., (42), 39–48. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.16924/riua.v0i42.756>

RAFIEE, R. (2016). On the mechanical performance of glass-fibre-reinforced thermosetting-resin pipes: A review. COMPOSITE STRUCTURE, 143, 151–164. <http://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.02.037>

REUTOV, Y. (2013). The Calculation of Multilayer Polymer Pipes Using Finite Elements and their Application to Gas and Oil Pipelines, 3–5.

SHUKRY, M., & ABDUI, B. (2012). BEHAVIOUR OF COMPOSITE PIPES UNDER MULTI-AXIAL STRESS This thesis is submitted with the requirements of Newcastle University for, (January).

SODEN, P. D., HINTON, M. J., & KADDOUR, A. S. (2004). Biaxial test results for strength and deformation of a range of E-glass and carbon fibre reinforced composite laminates. Failure exercise benchmark data. Failure Criteria in Fibre-Reinforced-Polymer Composites, 62, 52–96. <http://doi.org/10.1016/B978-008044475-8/50004-4>

TUTTLE, M. E. (2004). Structural Analysis of Polymeric Composite Materials. (M. Dekker, Ed.). New York, U.S.A.

XIA, M. (2002). Bending behavior of filament-wound fiber-reinforced sandwich pipes, 56, 201–210.

YU, K., MOROZOV, E. V., ASHRAF, M. A., & SHANKAR, K. (2014). Analysis of flexural behaviour of reinforced thermoplastic pipes considering material nonlinearity. Composite Structures, 119, 385–393. <http://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.09.015>

YU, K., MOROZOV, E. V., ASHRAF, M. a., & SHANKAR, K. (2015). Numerical analysis of the mechanical behaviour of reinforced thermoplastic pipes under combined external pressure and bending. Composite Structures, 131, 453–461. <http://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.05.033>

STANDARD ASTM (2016) 2290-12 Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced. ASTM Book of Standards, 1–8.
<http://doi.org/10.1520/D2290-12.2>

ANEXO

ANEXO A. PROCEDIMIENTO PARA LA SIMULACIÓN.

Para la realización de la simulación se tuvo en cuenta las dimensiones de la Tabla 2. Se puede utilizar la Herramienta Geometry de Ansys o utilizar Solidworks para construir las 3 placas de la tubería donde la capa de fibra de vidrio se extrae como lámina y las 2 capas de polietileno como sólidos, cada capa es exportada a ANSYS® workbench si es en Solidwork, utilizando las herramientas (Component Systems) utilizando la opción Geometría, sobre el Project Schematic se puede observar la estructura de la simulación, para las dos capas de polietileno se insertara la opción Mechanical Model.

Figura 1A. Modelos CAD: (a) Capa interior de Polietileno, (b) capa exterior de polietileno y (c) superficie del laminado epoxi y fibra de vidrio.

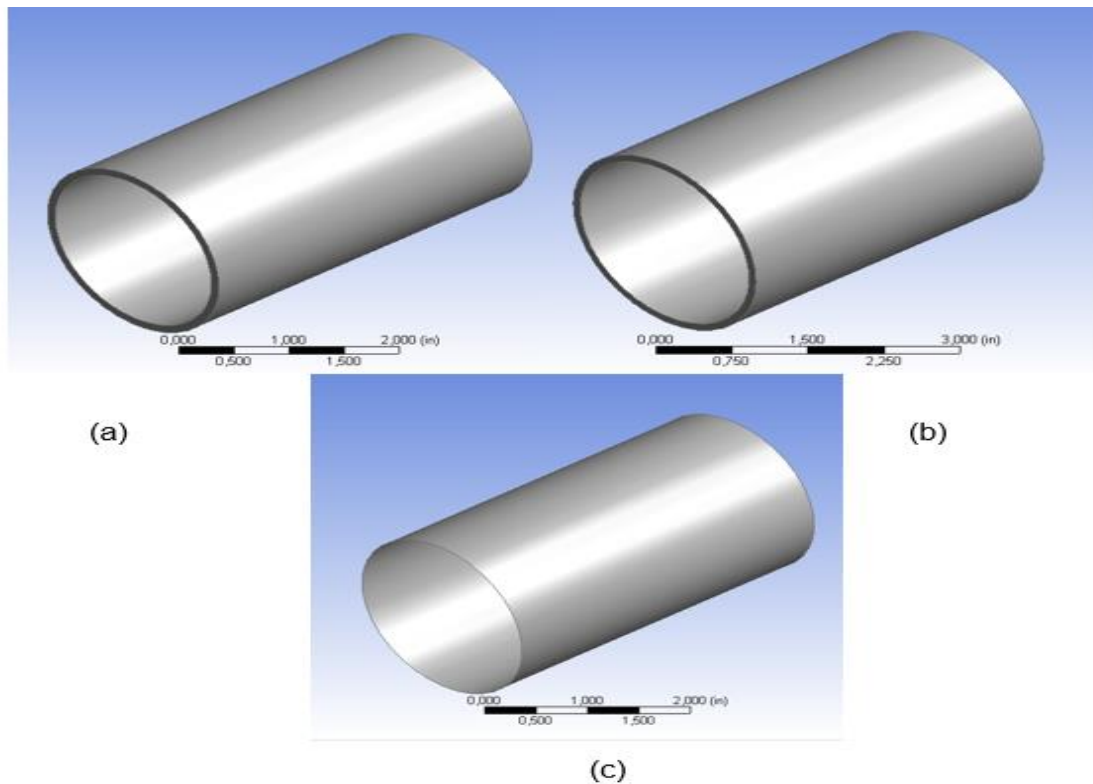
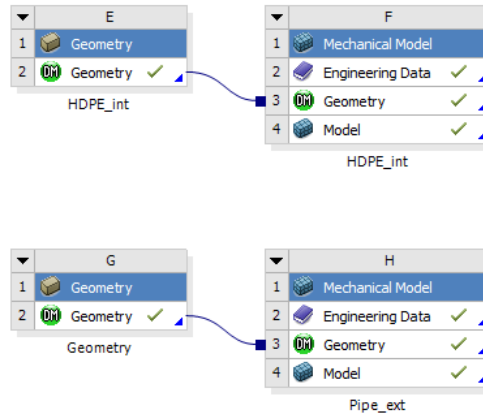
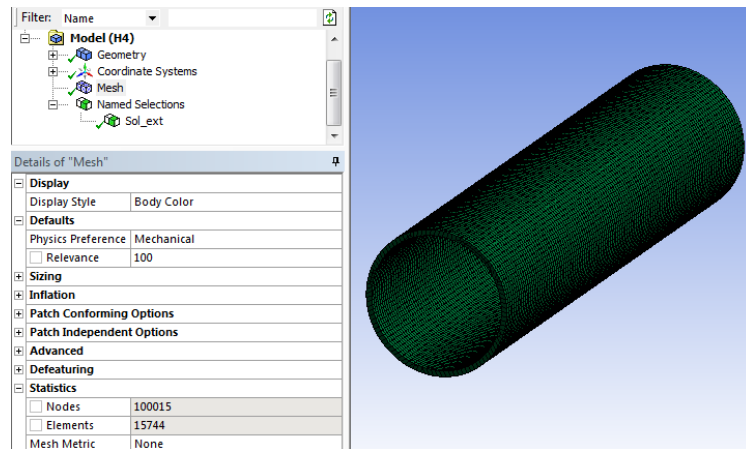


Figura 2A. Bloques de Geometry Y Mechanical Model sobre el proyecto esquemático de Workbench



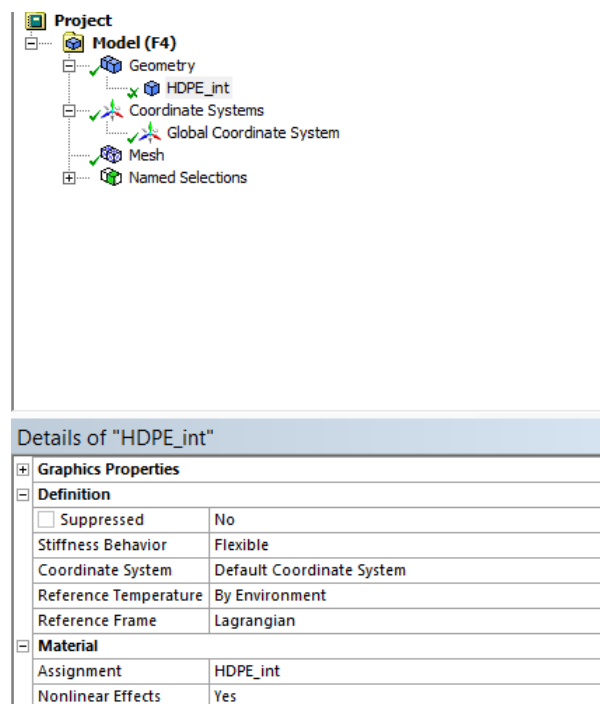
En el Mechanical Model, específicamente en la celda de Model se despliega la opción para realizar el mallado de la tubería y el refinamiento de la misma además de la selección del material, en el Detail of mesh se visualiza el número de elementos sobre el elemento seleccionado, en cual en esta simulación se utilizaron 15744 en cada capa de polietileno. En este caso el “element size” para los polietileno son de 2 mm y relevancia de 100 para un mejor refinamiento. La opción “Generate mesh” en la pestaña mesh permite realizar el mallado

Figura 3A. Mallado de la tubería realizada en Mechanical Model



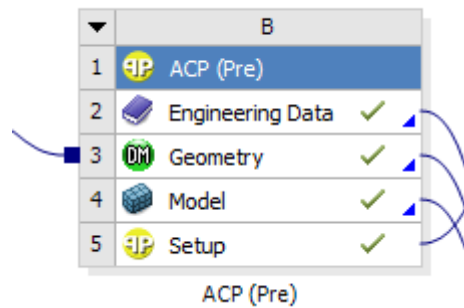
Antes de realizar el mallado es necesario determinar el material de Polietileno para ello hay que ir a la opción de Geometry dentro del dentro de Model como se observa en la figura 4A, posteriormente se abre en la parte inferior los detalles sobre la Geometría, tener en cuenta que stiffness behavior tiene que ser flexible y en Assignment material se escoge el tipo de Material.

Figura4A. Caracterización el material dentro de la celda Model del bloque Mechanical Model.



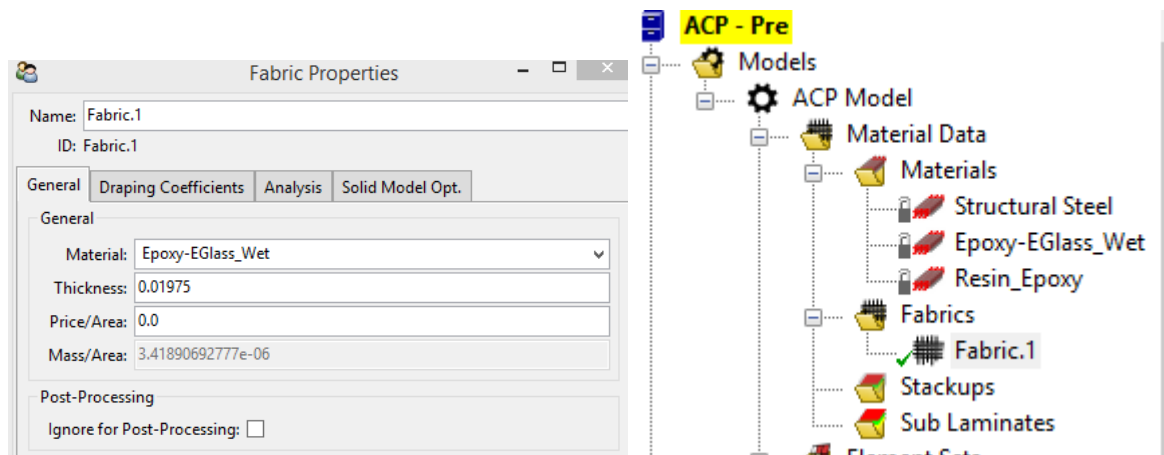
En la lámina de fibra de vidrio utilizamos otra opción del Component Systems llamada ACP, esta opción permite la construcción y el análisis de materiales compuesto, primeramente se utiliza el ACP (pre) donde se definirán la cantidad de capas, el espesor, la orientación de fibras y la dirección del apilamiento. Nota: Se define la lámina con el radio interior y luego se extruye hacia afuera con el espesor total.

Figura5A. Bloque del ACP sobre el proyecto esquemático.



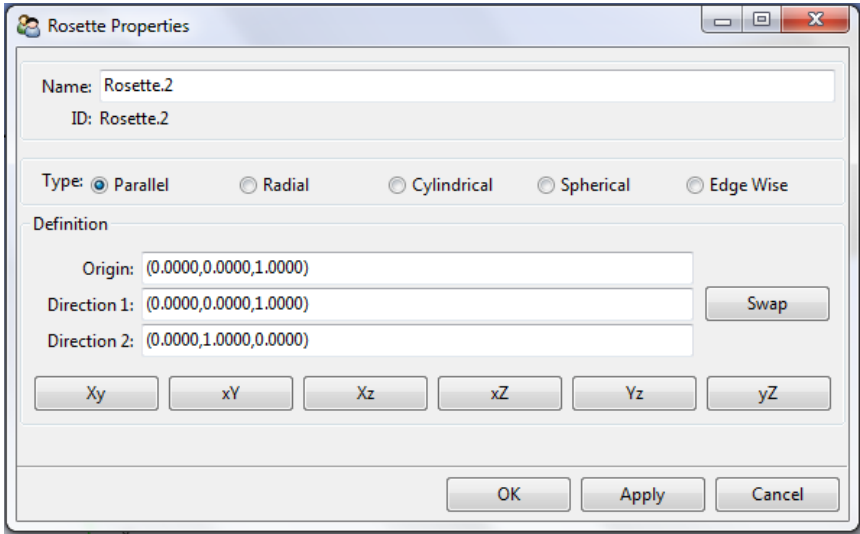
En el ACP (pre) se define el material, para escoger los materiales se utiliza la celda Engineering Data, para este caso se utiliza Epoxy-EGlass_wet, Seguidamente en Geometry se crea o se importa la configuración de la tubería. En la celda Model se genera el mallado y se le da un espesor cualquiera a la lámina (este espesor no es el verdadero). En la celda Setup se configura el laminado de la tubería que consta de 4 láminas. Dentro del Setup, lo primero que debe hacer es en la opción Material Data/Fabric definir el espesor que tiene el material.

Figura6A. Definición del espesor de las láminas de Epoxy_Eglass_wet



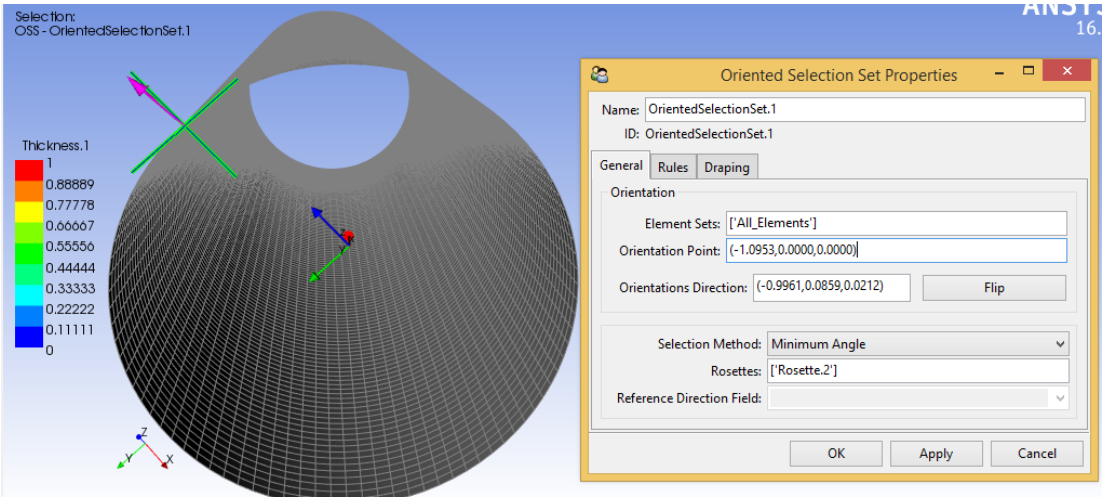
Seguidamente se identifica la rosette que funciona como un eje coordenado para la dirección de las 4 subcapas de fibra de vidrio

Figura 7A. Coordenadas de la rosette para la extracción de las subcapas de la fibra de vidrio.



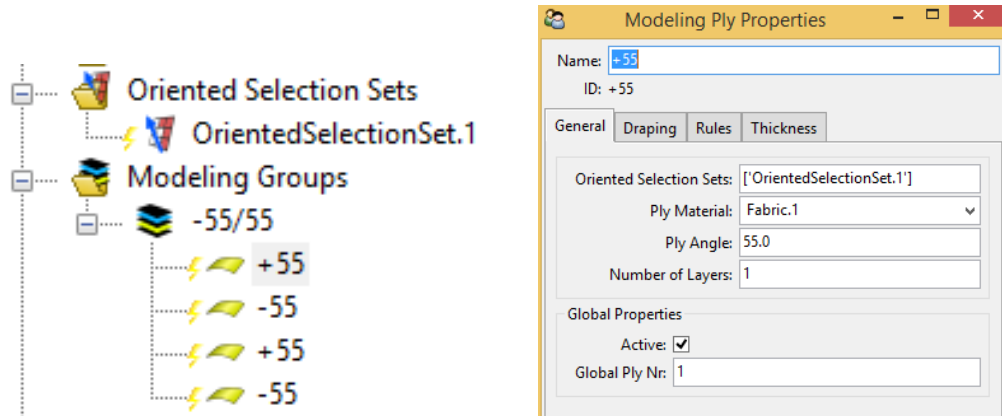
También es necesario establecer en “Oriented selection set” la dirección hacia donde será extruidas las capas, se debe escoger ALL_Elements para seleccionar toda la tubería y luego escoger un punto sobre la lámina de tal manera que la flecha indica en la dirección radial.

Figura8A. Ventana de oriented selection set



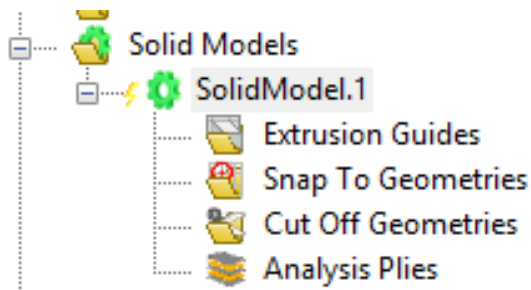
Seguidamente se definen las direcciones en la fibras en la opción Modeling group, las cuales están orientadas a [+55,-55,+55,-55] respecto al eje axial. En Ply material se escoge Fabric 1 que corresponde al material de Epoxy_Eglass_wet con su respectivo espesor.

Figura9A. Ventana de Modeling Group.



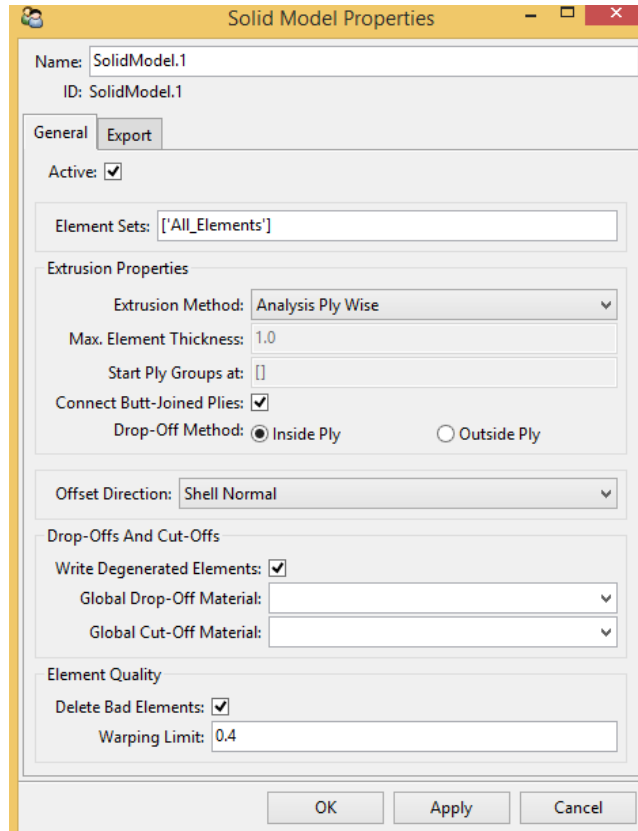
Por ultimo para extruir el laminado se realiza en la opción solidmodel, como se observa en la siguiente Figura.

Figura 9A. Ventana de Solid Model para generación del Modelo



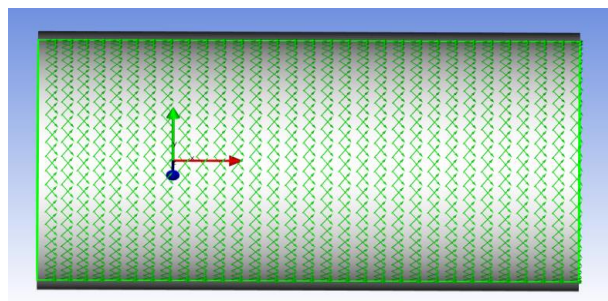
La ventana extraible de solidmodel se selecciona "All_Elements" y la demás configuración se deja estandar como análisis ply-wise. Por ultimo se aplica y se actualiza el trabajo y Ansys automaticamente genera el modelo solido.

Figura 10A. Ventana extraíble de Solid Model para generación del Modelo



A continuación en la siguiente figura se ilustra el modelamiento de las capas que contienen las direcciones de las fibras y que están con respecto al eje axial del cilindro, cada lámina superpuesta contiene la dirección de cada ángulo de 55 grados.

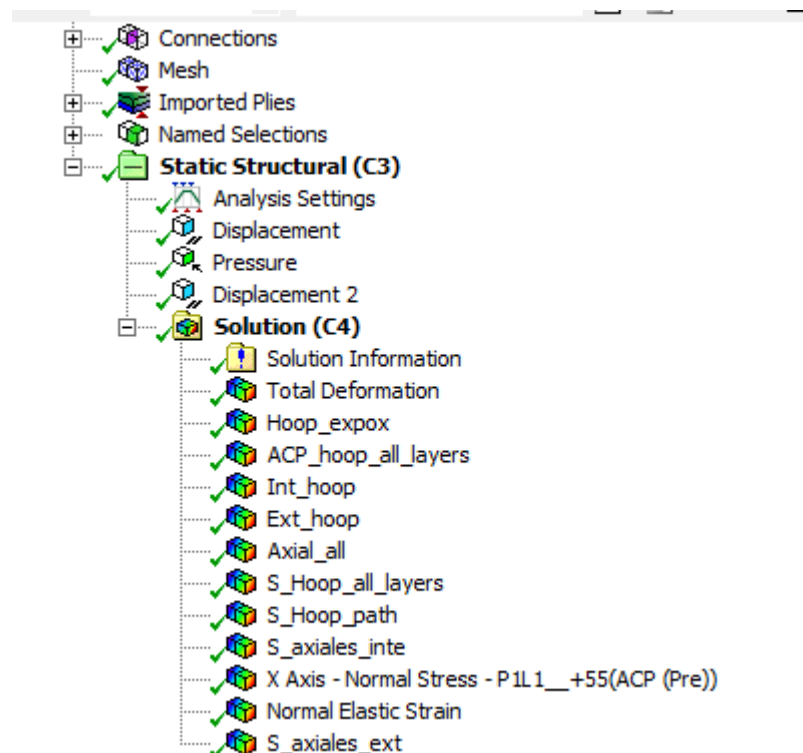
Figura 11A. Direcciones de la fibra del compuesto sobre la superficie del tubería Fiberspar modelada en Ansys Workbench.



Al finalizar el setup del ACP (pre), se relacionan las 3 tuberías en el Static structural que se encuentra en el menú de herramientas del Workbench.

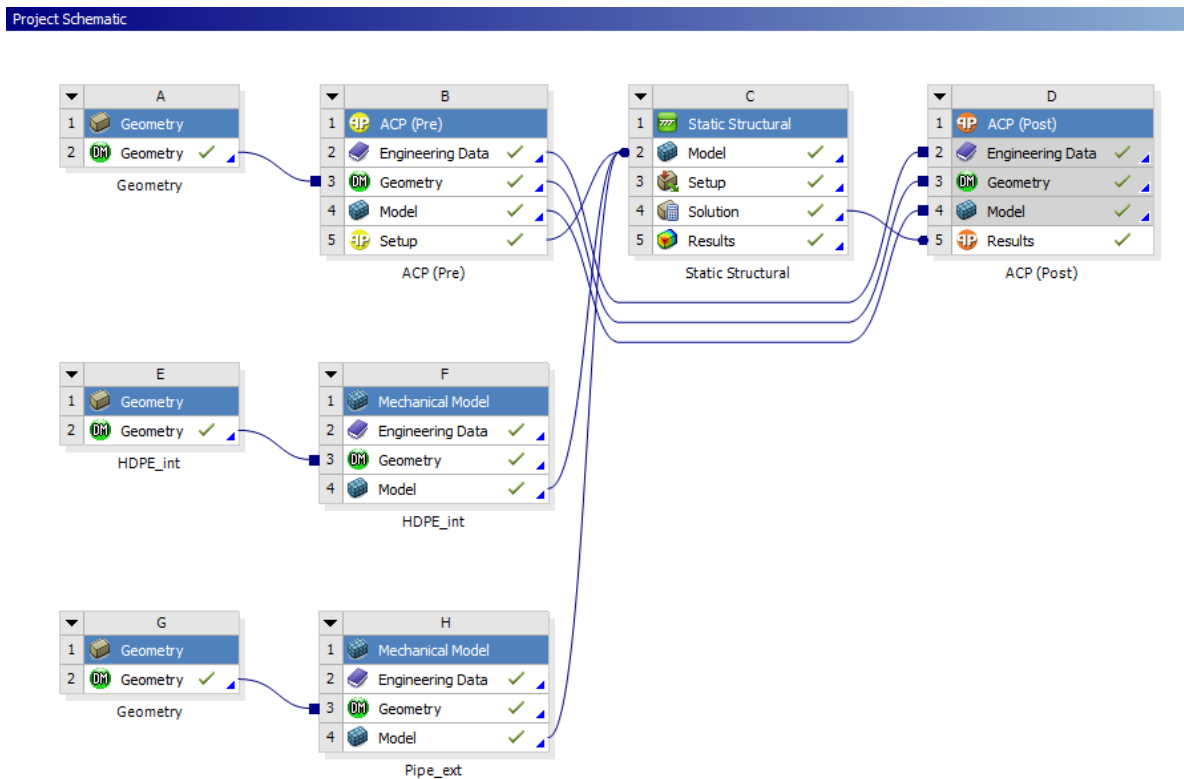
En el Static structural se definen las condiciones de contorno (displacement) en los dos extremos de la tubería para evitar deformaciones en el eje axial, se aplica la presión nominal en la opción "Pressure" de la tubería y finalmente se agrega el tipo de solución con los diferentes tipos de análisis que se desee realizar.

Figura 12A. Direcciones de la fibra del compuesto sobre la superficie del tubería Fiberspar modelada en Ansys Workbench.



En las figuras siguientes se pueden observar los 2 tipos de esfuerzos más importantes en la tubería.

Figura 13A. Proyecto esquemático para el análisis de elementos finitos de la tubería Fiberspar en ANSYS® workbench.

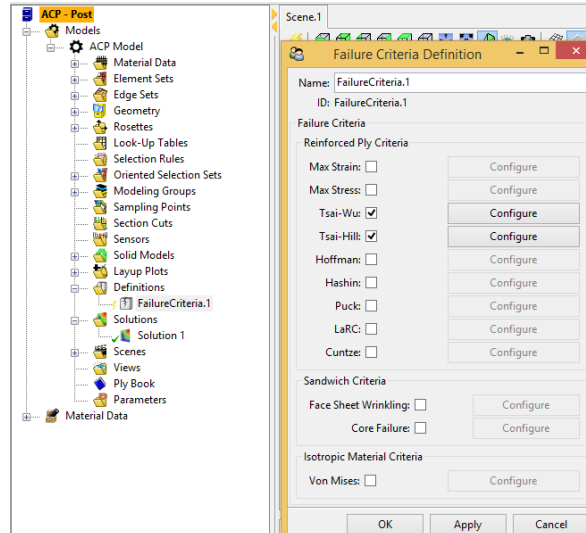


Se arrastra un ACP Post al proyecto sobre el ACP Pre (tres componentes). Luego se arrastra el Structural:Solution al ACP Post para también vincularlo. Damos update Project.

En el ACP (pos) se pueden visualizar los resultados (RESULTS) de los criterios de Tsai-Hill y Tsai-Wu para cada una de las capas de la fibra de vidrio, mostrando el valor de fallo según la presión aplicada en el interior de la tubería. Como se puede observar en las figuras siguientes.

Entramos al Post y actualizamos. Se crea un criterio de falla en Definiciones en 2D:

Figura 14A. Selección de criterios de falla



Luego se inserta en Solutions: Create Failure... Para visualizarlo, chequeando las casillas según se indica:

Figura 15A. Solución de los criterios de fallo

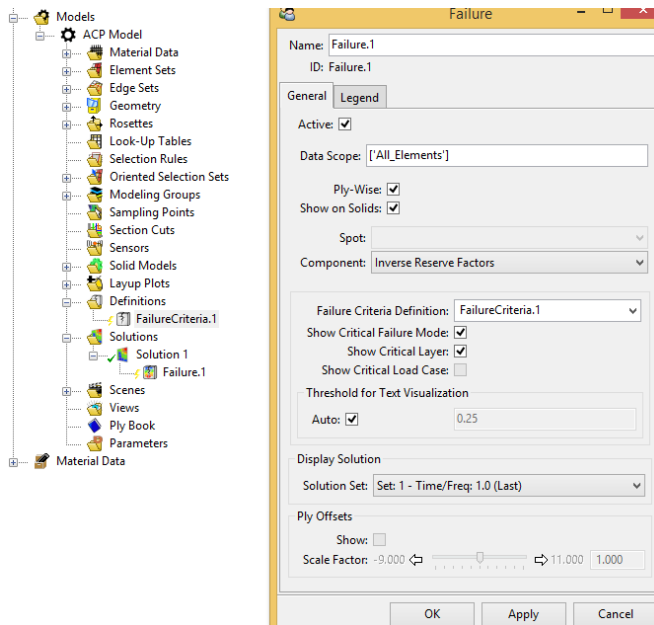


Figura 16A. Esfuerzos circunferenciales sobre las capas de la tubería, con valor máximo de 61.4 MPa o 8917 psi.

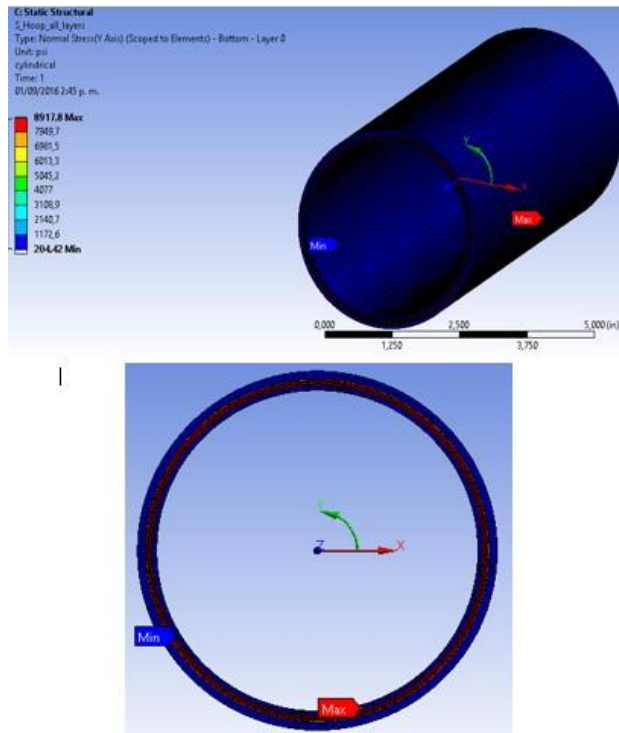


Figura 17A. Esfuerzos circunferenciales sobre la capa interior de HDPE, con valor máximo de 2,1 MPa o 306,1 psi

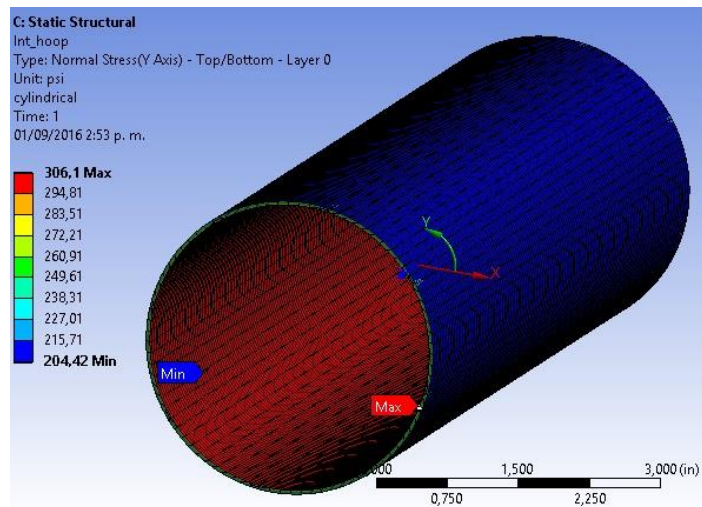


Figura 18A. Esfuerzos tangenciales sobre la capa exterior de HDPE con valor de 3,9 MPa o 575 psi.

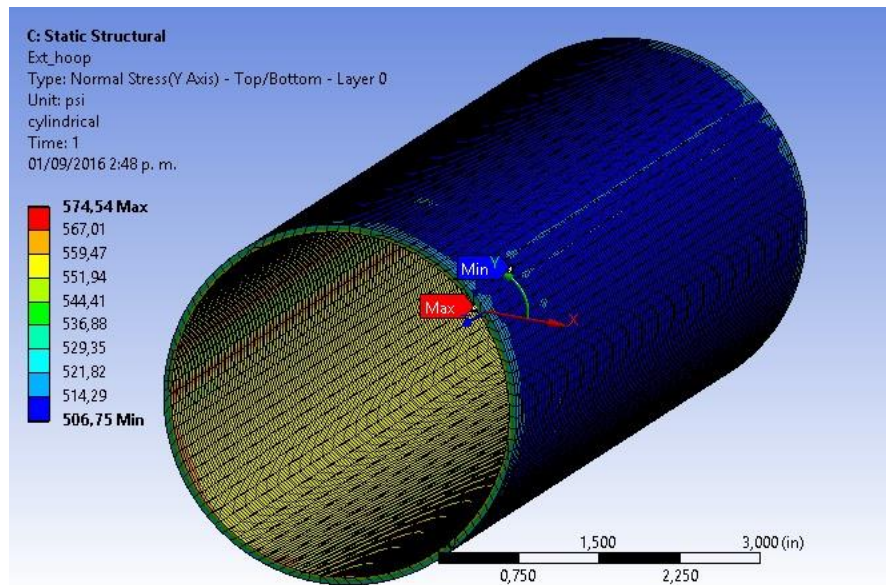


Figura 19A. Esfuerzos longitudinales sobre toda la tubería con un valor máximo de 19,9 MPa o 2892 psi sobre la capa de epoxi-fibra de vidrio.

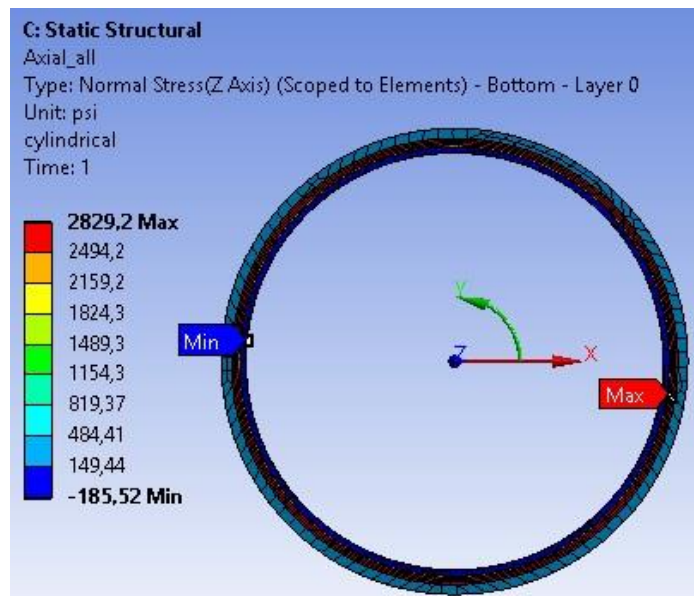


Figura 20A. Deformaciones máximas a lo largo del aro para una presión de 27 MPa

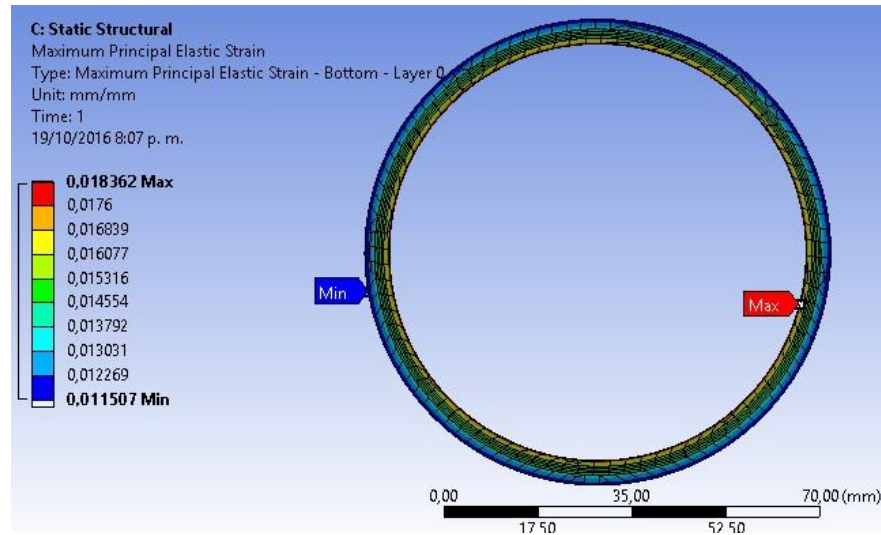


Figura 21A. Criterio de Tsai-Hill menor que uno para una presión de trabajo de 5,17 MPa

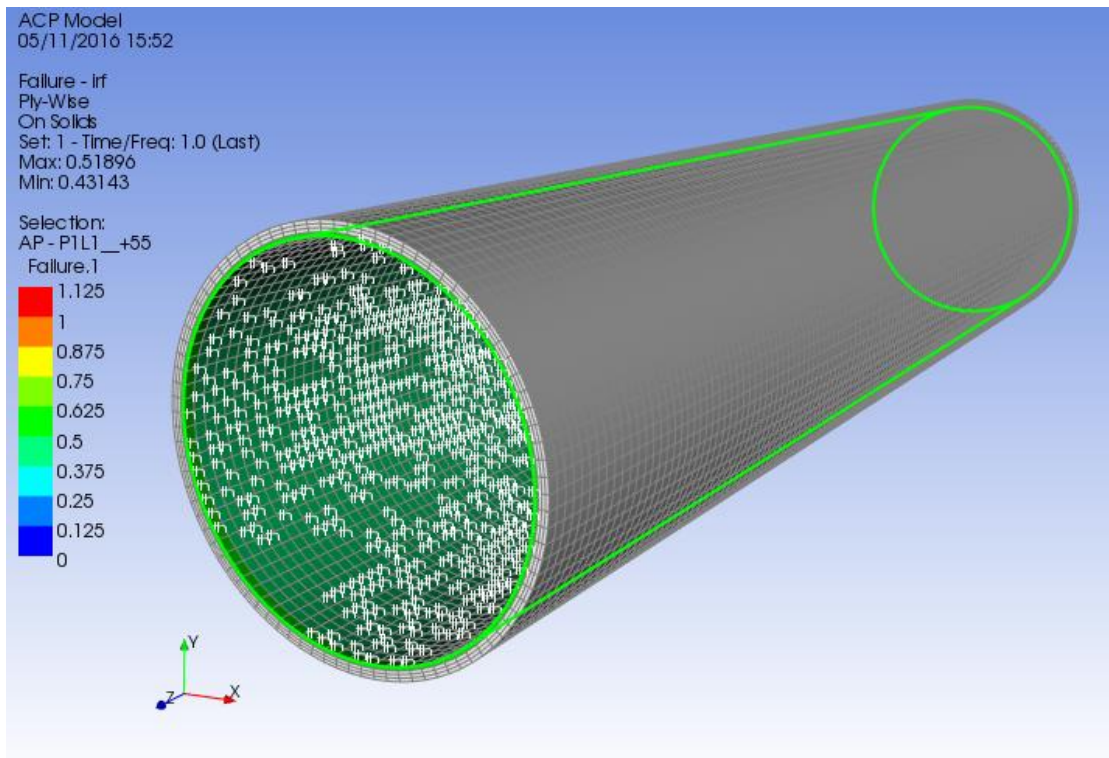


Figura 22A. Criterio de Tsai-Wu menor que uno para una presión de 5,17 MPa

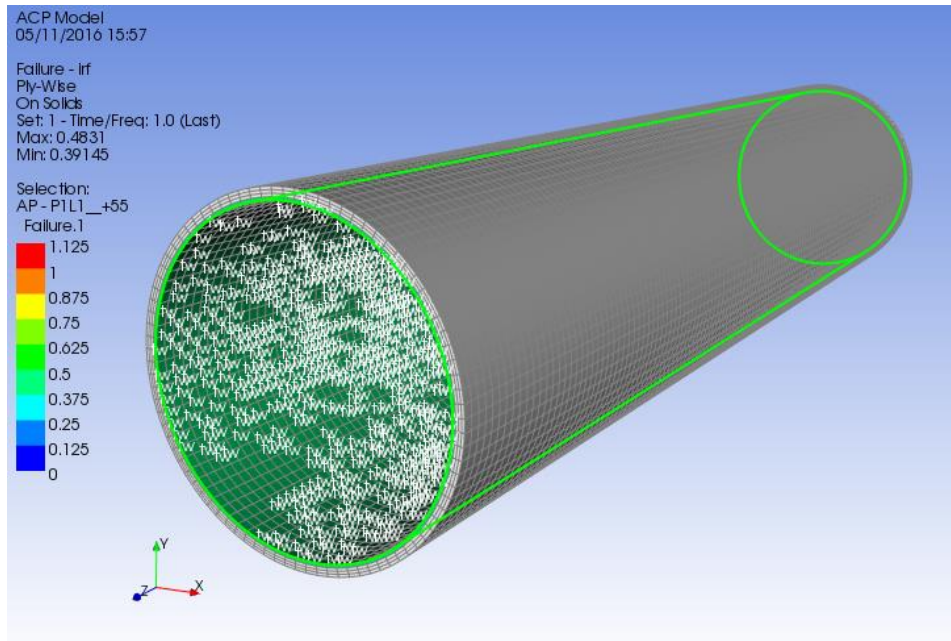


Figura 23 A. Criterio de Tsai-Hill superior a 1 para una presión de estallido de 27,1 MPa

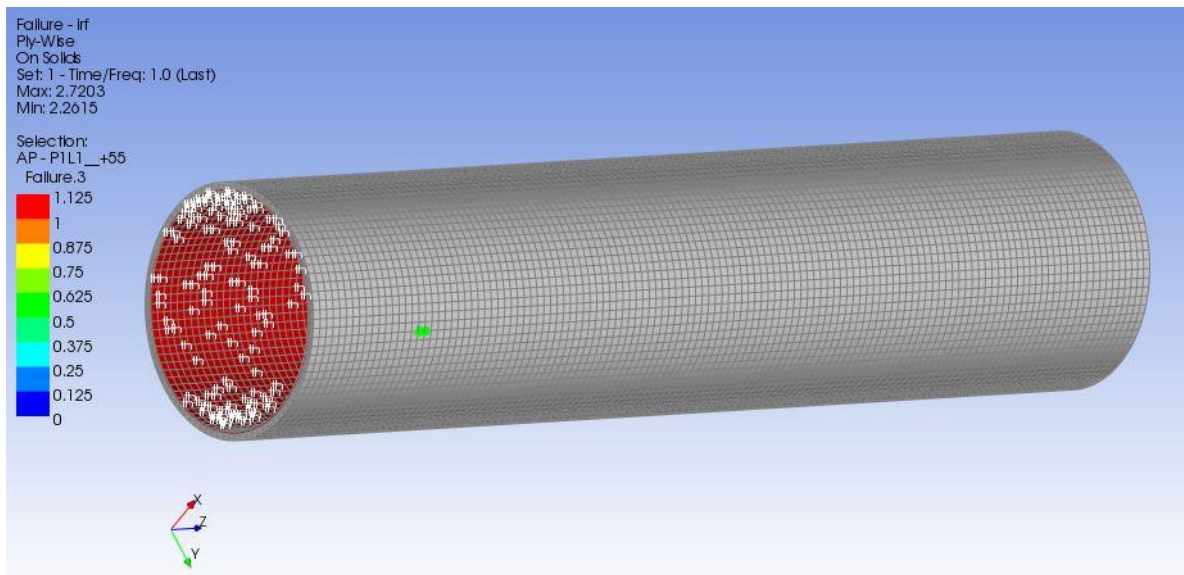


Figura 24A. Criterio de Tsai-Wu su perior a 1 para una presión de de estallido de 27,1 MPa

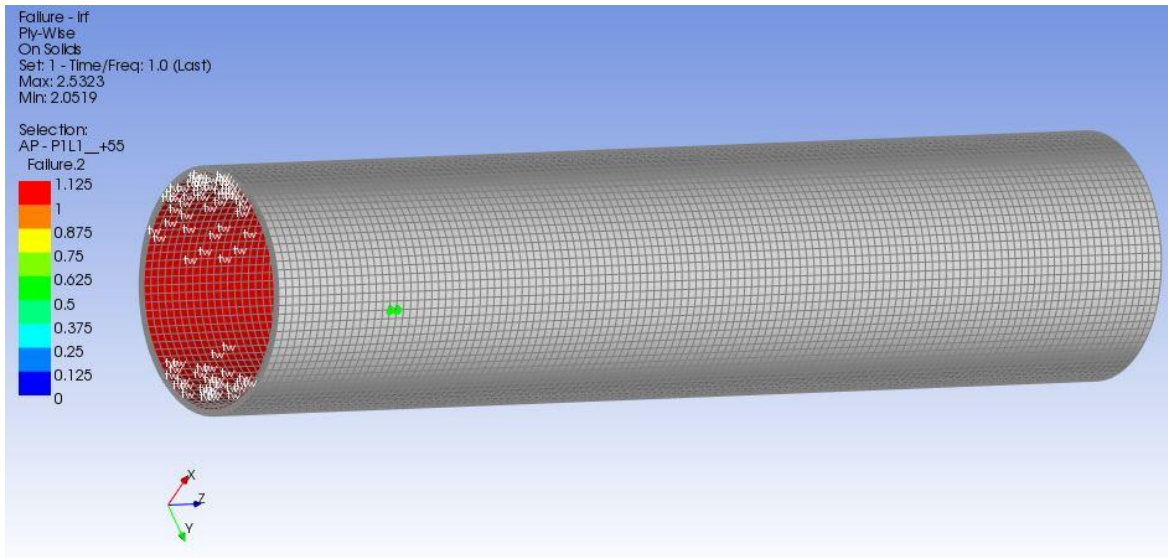


Figura 16A. Criterio de Tsai-Wu para una presión media de 12,5 MPa

