

ESTUDIO DEL FENÓMENO DE FATIGA EN LÁMINAS DE TUBERÍA ENROLLABLE DE
MATRIZ EPÓXICA REFORZADA CON FIBRA DE VIDRIO PARA CARGAS DE
TRACCIÓN

SEBASTIAN MONSALVE DÍAZ
DANIEL ALEJANDRO MONROY GÓMEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2017

ESTUDIO DEL FENÓMENO DE FATIGA EN LÁMINAS DE TUBERÍA ENROLLABLE DE
MATRIZ EPÓXICA REFORZADA CON FIBRA DE VIDRIO PARA CARGAS DE
TRACCIÓN

SEBASTIAN MONSALVE DÍAZ

DANIEL ALEJANDRO MONROY GÓMEZ

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Mecánico

DIRECTOR

Octavio Andrés González Estrada

Ingeniero Mecánico, PhD

CODIRECTOR

Alberto David Pertuz Comas

Ingeniero Mecánico, PhD

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2017

DEDICATORIA

A Dios por otorgarme la fortaleza en los momentos difíciles para así poder seguir adelante.

A mi madre, por ser ese ángel que me ha acompañado a lo largo del camino y me ha inspirado a llegar a cumplir esta meta.

A mi padre, por ser el que desde niño sembró en mí sus valores y me brindo su ayuda y ejemplo para tomar siempre buenas decisiones.

A mi hermana, por ser la luz de nuestra familia y la que ha estado siempre a mi lado.

A mis abuelos Mery y Carlos, Dios los tenga en su gloria, que desde el cielo sé que me han guiado y cuidado en todo momento.

A mis abuelos Rafael e Hirma, que sembraron hace muchos años los valores con los cuales me ha educado mi madre.

Por último a mis amigos, y aquellos que han recorrido esta etapa conmigo, con los que he compartido muchos buenos momentos y que en medio de las dificultades me han ayudado y brindado su apoyo.

Daniel Alejandro Monroy Gómez

DEDICATORIA

A Dios y a la vida por darme la fortaleza de seguir en el camino que escogí.

A mis abuelos, Alirio y Esther, por ser la luz que guía mi camino y esos ángeles que la vida puso a mi lado.

A mis padres, Claudia y Mauricio, por su amor y apoyo incondicional cada día de mi vida.

A Ariosto, Esther, Iván y todos mis tíos(as) que siempre me dieron motivos para sonreír y luchar por este sueño.

A Luis Carlos y Hernando por ayudarme cuando más lo necesité.

A todas aquellas personas que pasaron por mi vida, compartiendo buenos y malos momentos, y que con su compañía me enseñaron infinidad de cosas, mil gracias.

Sebastián Monsalve Díaz

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander por brindarnos la posibilidad de emprender este camino que hoy culmina.

A la escuela de Ingeniería Mecánica por formarnos como ingenieros integrales y darnos las bases científicas necesarias para nuestra futura vida laboral.

Al Doctor Octavio Andrés Gonzáles Estrada por su colaboración y asesoría como director del trabajo de grado.

Al estudiante de maestría Juan Sebastián León Becerra por su apoyo a lo largo de este trabajo y su asesoría para el desarrollo del mismo.

Al personal del Instituto Colombiano del Petróleo por proporcionarnos el material para desarrollar este trabajo de grado.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	11
1. OBJETIVOS	15
1.1 OBJETIVO GENERAL	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
2. MARCO TEÓRICO	16
2.1 MATERIAL COMPUESTO	16
2.2 MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS	16
2.2.1 MATRICES	17
2.2.2 FIBRAS	18
2.3 TUBERÍA DE MATERIAL COMPUESTO CON MATRIZ EPÓXICA REFORZADA CON FIBRA DE VIDRIO	19
2.4 FATIGA DE MATERIALES.....	20
3. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS	24
3.1 ENSAYOS ESTÁTICOS.....	25
3.2 ENSAYOS DINÁMICOS.....	27
4. PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS	29
5. RESULTADOS	32

5.1 ENSAYOS ESTÁTICOS.....	32
5.2 ENSAYOS DINÁMICOS.....	35
5.2.1 Ensayos al 90% de la carga.....	36
5.2.2 Ensayos al 80% de la carga.....	38
5.2.3 Ensayos al 70% de la carga.....	39
5.2.4 Ensayos al 60% de la carga.....	41
5.2.5 Ensayos al 50% de la carga.....	42
5.2.6 Rotura de las probetas y algunas otras consideraciones.....	43
5.3 GRÁFICAS S-N	45
6. CONCLUSIONES	49
7. RECOMENDACIONES.....	51
8. BIBLIOGRAFÍA	52

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO DEL FENÓMENO DE FATIGA EN LÁMINAS DE TUBERÍA ENROLLABLE DE MATRIZ EPÓXICA REFORZADA CON FIBRA DE VIDRIO PARA CARGAS DE TRACCIÓN*

AUTORES: Sebastián Monsalve Díaz, Daniel Alejandro Monroy Gómez**

PALABRAS CLAVES: Materiales compuestos, tracción, fatiga, GFRP, ASTM D3039, ASTM D3479.

DESCRIPCIÓN:

En este trabajo se realiza la caracterización de láminas de tubería de material compuesto de matriz epóxica reforzada con fibra de vidrio con configuración $[55, -55]_6$. Para esto se plantean los ensayos necesarios en el estudio de tracción bajo cargas estáticas y dinámicas, de acuerdo con las normas ASTM D3039 y D3479. Luego se llevan a cabo las pruebas para obtener la resistencia a la tracción y la curva S-N bajo cargas de Tensión-Tensión. Con los datos obtenidos se realiza un ajuste estadístico mediante el modelo de distribución Weibull y su posterior análisis aplicando los modelos de fatiga de Basquin y Wöhler, y se identifica el método de falla de este tipo de material.

*Proyecto de grado

**Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Octavio Andrés González Estrada, PhD

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF FATIGUE PHENOMENON IN SHEETS OF EPOXIC MATRIX REINFORCED WITH GLASS FIBER SPOOLABLE PIPE FOR TRACTION LOADS*

AUTHORS: Sebastián Monsalve Díaz, Daniel Alejandro Monroy Gómez**

KEYWORDS: Composites materials, traction, fatigue, GFRP, ASTM D3039, ASTM D3479.

ABSTRACT:

In this work, the characterization for sheets of spoolable composite pipe reinforced with glass fiber with configuration $[55, -55]_6$ is performed. For this, the necessary tests are proposed in the study of traction under static and dynamic loads, according to ASTM D3039 and D3479 standards. The tests are then carried out to obtain the tensile strength and the S-N curve under stress-strain loads. With the data obtained a statistical adjustment is made by the Weibull distribution model and its subsequent analysis applying the fatigue models of Basquin and Wöhler, and the method of failure of this kind of material is identified.

*Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Octavio Andrés González Estrada, PhD

INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, para el transporte del crudo se ha hecho uso de tubería de acero, pero los diferentes cambios que ha tenido que enfrentar la industria petrolera como, por ejemplo, el uso de crudos pesados altamente corrosivos (Brondel et al, 1994; Castellanos et al, 2010), han dado paso a nuevas tecnologías en el sector del transporte y producción. La dificultad de transportar la tubería de acero hasta los puntos de instalación, tuvo una solución parcial cuando se creó el tipo de tubería transportada en carretes. Esta nueva característica pese a que presentó una nueva facilidad también redujo el tiempo de servicio de cada tramo ya que presentaba daños por fatiga (Brondel et al., 1994). Los materiales compuestos se presentan como una opción importante en este tipo de aplicaciones, principalmente porque permite trabajar con mejores condiciones de operación y se ajusta a las nuevas políticas de protección ambiental. En Estados Unidos, para el año 2005, se había estimado la instalación de 4500 km de tubería y un incremento de hasta 290 mil toneladas del uso de material compuesto en recipientes a presión, cifras que fueron ampliamente superadas (Marsh, 2005).

Los materiales compuestos presentan propiedades dependientes de la fibra y la matriz, poseen una alta resistencia específica debido a la fracción de volumen de fibra que aporta resistencia mecánica, pero no agrega peso excesivo al material al igual que una gran resistencia a la corrosión (Stupenengo, 2011), es por esto que en la industria del petróleo se ha dado una tendencia a preferir este tipo de tubería en lugar que las metálicas. Sin embargo, el comportamiento ortótropo de estos materiales hace que sean más sensibles a la deformación por cizalla transversal en comparación con homólogos isótropos, como lo son los materiales metálicos (Ansari et al, 2010).

Un claro ejemplo de la aplicación de materiales compuestos en la construcción de tuberías es el tubo enrollable tipo bonded desarrollado por Quigley et al. (2011), el cual consta de tres capas. La primera capa es una barrera de presión termoplástica

impermeable que se encarga de soportar el paso del fluido y mantener la resistencia a la difusión y a la corrosión. La segunda capa, está formada por un material compuesto de matriz epóxica reforzado con fibras, que en conjunto presenta características anisotrópicas únicas, que soportan mayores presiones de trabajo, mayor resistencia a la tensión y a compresión, y que supera la cantidad de tiempo en servicio comparado con las tuberías de acero. Por último la capa externa se encarga de ser una protección para el material contra rayaduras y desgaste (Quigley et al, 2011).

La tubería de tipo bonded presenta fibras de vidrio embebidas en una matriz epóxica – GFRP (Babu et al 2009), logrado mediante el enrollamiento de estos filamentos. Este proceso consiste en devanar la fibra de vidrio alrededor de un mandril que contiene la capa interna y el aglutinante, después pasa a un curado que da la resistencia propia de la interfaz entre la fibra de vidrio y la resina. Las propiedades de la tubería se establecen según la exactitud del patrón que se use para el devanado en la capa del compuesto y el ángulo con el que se hace (Walsh, 2011).

Actualmente, en Colombia existen cerca de 8500 km de tubería distribuidos entre oleoductos y poliductos, además de 53 estaciones desde las que se bombean crudo y sus derivados. Se estima que diariamente se transportan 1'204.000 barriles de productos a través de la red nacional (Ecopetrol S.A., 2014), lo que representa una oportunidad para la implementación de la tubería tipo bonded en el país. En este sentido, es necesario conocer a fondo el comportamiento del material, con el fin de estimar el tiempo de vida de la tubería y evitar accidentes o complicaciones asociadas a la adquisición e instalación de nuevas tecnologías en la industria, esto ha impulsado varios estudios numéricos y de laboratorio.

Hull (1982) y Carlsson et al. (2013) han caracterizado diferentes materiales compuestos bajo tensión, compresión y cizalla, demostrando resultados detallados sobre laminados y las fallas micromecánicas que se presentan. Rafiee (2013) realizó pruebas de tensión aparente según ASTM D2290 y de tracción con probetas

cortadas en longitud longitudinal según D3039 a tubería GFRP de diferentes diámetros con fibras enrolladas a 60° .

Rodríguez et al. (2013) estudiaron experimentalmente tubería de matriz polimérica reforzada con fibras de vidrio que presentaban daños previos y observaron las consecuencias de la degradación higrotérmica y las consecuencias que tiene operar a la temperatura de transición del vidrio. Quintero et al. (2015) adelantaron estudios para estudiar el efecto que tienen las rayaduras inducidas en la superficie de la capa exterior en las propiedades mecánicas en tubería compuesta flexible.

Soden et al. (2004) experimentaron con muestras tubulares de fibras E-Glass en matriz epóxica con un 60% de resina y ángulos de enrollamiento de $\pm 55^\circ$ obteniendo un valor de la tensión de rotura de 595 MPa y observando que la curva esfuerzo-deformación era no lineal. Por su parte, González et al. (2016) encontraron valores de esfuerzos circunferenciales y longitudinales en tubería de matriz epóxica reforzada con fibra de vidrio de 2 pulgadas, con laminado $[55, -55]_2$, mediante ensayos de tensión aparente y análisis de elementos finitos. Obtuvieron valores de 62 MPa y 19 MPa respectivamente.

Ansari et al (2010) analizó los esfuerzos en tuberías multicapas bajo presión y temperaturas cíclicas, producto de esto determinó que los esfuerzos axiales y circunferenciales aumentan conforme la dirección de las fibras tiende a ser en dirección longitudinal y circunferencial, respectivamente.

Xia et al. (2001) estudiaron el esfuerzo y la deformación de tuberías de material compuesto bajo presión interna y a diferentes ángulos de enrollamiento mediante una formulación exacta basada en la teoría de la elasticidad anisótropa, validando sus resultados con ejemplos numéricos. Tarakçioğlu et al.(2005) realizaron un estudio del comportamiento a fatiga de tubería de material compuesto con fibras en dirección $\pm 55^\circ$ bajo presión interna, determinando la relación entre los daños macromecánicos y micromecánicos. Esto evidencia la secuencialidad entre la separación entre la fibra y la matriz, la delaminación, la iniciación de las fugas y la

falla final. También establece que en sus ensayos difícilmente encuentra un límite de fatiga. Gemi et al.(2009) desarrollaron estudios sobre el comportamiento a fatiga de tubería epóxica con fibras de vidrio enrolladas a $\pm 75^\circ$ determinando que a cargas muy altas la falla final es controlada por la falla de las fibras y a cargas bajas se produce el fallo final por la matriz.

En este trabajo se caracteriza el comportamiento a fatiga de láminas de tubería enrollable de matriz epóxica reforzada con fibras de vidrio de configuración $[55, -55]_6$ (GFRP) en la dirección longitudinal. En la primera sección se presentan, de manera general, los materiales compuestos y el fenómeno de fatiga aplicado a este tipo de material. En la sección dos se describen los ensayos realizados bajo la normativa ASTM y se explican las consideraciones necesarias para la prueba de este material. En la sección tres se establece la geometría de las probetas y la forma en la que fueron obtenidas de la tubería. En la sección cuatro se presentan los resultados obtenidos de los ensayos, estableciendo la resistencia a la tracción del material y las curvas S- ϵ y S-N según los modelos de Wöhler y Basquin. Por último, se exponen las conclusiones, realizando un análisis del método de falla de las probetas y el comportamiento a fatiga del material bajo las condiciones establecidas, así como recomendaciones para futuras pruebas de laboratorio con el fin de obtener más información del comportamiento mecánico del material.

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Caracterizar el comportamiento a fatiga de una lámina de tubería enrollable de matriz epóxica reforzada con fibra de vidrio (GFRP), usada en la industria para el transporte de crudo y gas natural, bajo cargas de tracción.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar el experimento bajo las normas establecidas por ASTM para el análisis del comportamiento mecánico bajo cargas axiales de tracción del material utilizado en la construcción de tubería enrollable GFRP.
- Graficar el comportamiento de una lámina de tubería GFRP bajo sollicitaciones de cargas estáticas (S- ϵ) y dinámicas (S-N) a tracción.
- Identificar experimentalmente el método de falla en lámina de tubería GFRP mediante la comparación con los métodos consignados en la literatura.
- Presentar un informe detallado sobre el comportamiento de tubería GFRP bajo condiciones de cargas axiales.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 MATERIAL COMPUESTO

Un material compuesto se define como la unión de dos o más componentes que al unirse generan un material nuevo con propiedades superiores a sus componentes individuales (Besednjak, 2005).

Los materiales compuestos se constituyen de una fase de refuerzo y una matriz. La capa de refuerzo es la encargada de la resistencia del material y define sus propiedades mecánicas, por su parte la matriz se encarga de proteger la fase de refuerzo de agentes externos (Jones, 1999) y de transmitir los esfuerzos a la capa de refuerzo (Poveda, 2010).

Un material compuesto presenta tres características esenciales (Derek, 2003):

- Consta de varios materiales físicamente distintos y mecánicamente separables.
- Pueden fabricarse mezclando cantidades controladas de distintos materiales para alcanzar propiedades óptimas.
- Las propiedades resultantes son superiores a las propiedades de los componentes por separado.

2.2 MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS

Esta configuración de materiales compuestos se presenta en forma de laminados los cuales se conforman de varias capas de espesor inferior a 1 mm acuñadas unas sobre otras y donde su matriz presenta una continuidad en la dirección ortogonal a su plano de referencia haciendo que las capas trabajen conjuntamente. El apilamiento de estas capas se diseña en base a la dirección de las fibras que generan las características deseadas (Giner & Albelda, 1998).

Los materiales compuestos muestran ventajas frente a los materiales habituales en su peso y resistencia, gracias a esto se puede permitir la fabricación de maquinaria con propiedades específicas mejores y ahorrando hasta dos tercios del peso original en materiales convencionales (Miravete, 2012).

Algunos de los aspectos que favorece el uso de materiales compuestos frente a los materiales convencionales es el uso en menos cantidad de material a la hora de fabricar piezas y una mejora de los diseños debido a las mejores propiedades físicas que presentan en la dirección deseada (Besednjak, 2005) :

2.2.1 MATRICES

Las matrices se encuentran divididas en dos grupos según su naturaleza, orgánicas e inorgánicas. Las matrices orgánicas se pueden producir en viniléster, epoxi y resinas fenólicas mientras las matrices inorgánicas son generalmente de cerámicos o metales. En la industria se pueden encontrar matrices de materiales termoplásticos o termoestables usadas para embeber las fibras, este tipo de matrices obtienen su resistencia y rigidez por el elevado peso molecular. Algunas de sus propiedades son (Halpin, 1969) :

- Fluencia a cargas de tracción y compresión.
- Sus propiedades mecánicas varían dependiendo de la temperatura.
- Viscoelásticas.
- Comportamiento anisótropo.

2.2.2 FIBRAS

Las fibras ayudan al material compuesto a mejorar sus propiedades aportando resistencia mecánica, rigidez y dureza (Halpin, 1969) , este aporte en las propiedades del material es función del ángulo con el que se ubican las fibras respecto a los ejes del laminado.

Normalmente se pueden encontrar en tres tipos

- Fibras de carbono
- Fibras de vidrio
- Fibras orgánicas

Fibras de carbono: son de naturaleza anisótropa, debido a los átomos de las capas de grafito que permanecen unidos mediante enlaces covalentes. Esto permite al material mantener las características en la dirección óptima. Las fibras de carbono se pueden direccionar dependiendo de según se necesite de tres formas (Derek, 2003) :

- Direccionamiento del polímero por estiramiento usando masa de polímero que al ser estirado será convertido en fibras.
- Direccionamiento por hilado usando pasta de alquitrán y direccionando sus moléculas por efectos hidrodinámicos.
- Direccionamiento por grafitización estirando fibras carbonizadas a temperaturas muy altas, creando deslizamientos que orienten las capas en dirección del eje de las fibras.

Fibras de vidrio: Poseen características isotrópicas debido a la configuración de su red y una menor resistencia mecánica. Para la fabricación de estas fibras se utilizan tres tipos de vidrios (Derek, 2003) :

- Vidrio E: Muestra buenas propiedades entre las que destacan su resistencia, rigidez y de desgaste.

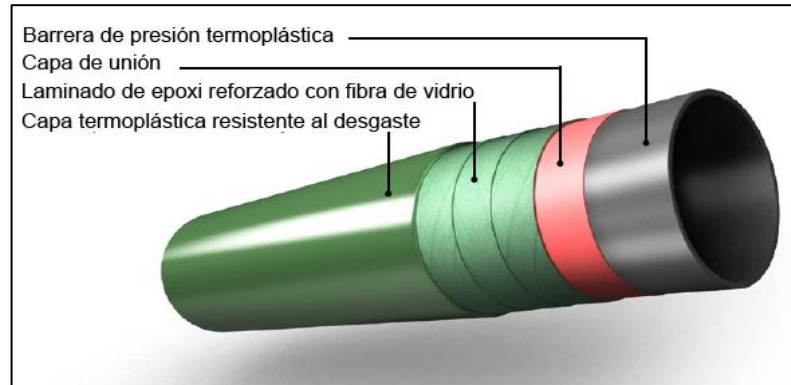
- Vidrio C: Presenta un menor desgaste a la corrosión química que el vidrio E, lo que lo convierte en un material más costoso.
- Vidrio S: Es el más resistente a la temperatura debido a ello posee un precio más elevado y un módulo de Young mayor.

Fibras orgánicas: son fabricadas mediante métodos de extrusión e hilado, un buen ejemplo de este tipo de fibra es el Kevlar. Comercialmente sus dos principales referencias son el Kevlar 49 que tiene una alta resistencia y consta de un módulo elástico mayor al del Kevlar 29 utilizado en el desarrollo de refuerzos para neumáticos, y que posee un módulo elástico intermedio (Derek, 2003) .

2.3 TUBERÍA DE MATERIAL COMPUESTO CON MATRIZ EPÓXICA REFORZADA CON FIBRA DE VIDRIO

Como se puede ver en la Figura 1, la tubería se compone de tres capas. La primera capa es una barrera de presión termoplástica, la cual se encuentra en contacto con el fluido. Esta capa se encuentra adherida (de ahí el nombre de la tecnología bonded) a la capa de refuerzo el cual es un laminado de matriz epóxica reforzado con fibras de vidrio direccionadas a 55° y -55° con respecto al eje longitudinal de la tubería. Por último, se encuentra la capa de recubrimiento que está en contacto con el ambiente y es de un material termoplástico de alta resistencia para evitar corrosión y rayaduras sobre la tubería

Figura 1. Configuración de las capas en una tubería de material compuesto: Tecnología bonded



Fuente: Fiberspar LinePipe Brochure, National Oilwell Varco.

2.4 FATIGA DE MATERIALES

En ingeniería la fatiga es el mecanismo de falla que se produce al someter a un material bajo cargas dinámicas inferiores a las estáticas que pueden producir la rotura, la repetición de esfuerzos alternativos un número de veces se le conoce como fenómeno de fatiga. Este es un fenómeno aleatorio que se produce sin previo aviso siendo la primera causa de falla en materiales bajo cargas dinámicas. El estudio de la fatiga para los diferentes materiales se realiza mediante la fabricación y ensayos de prototipos según sea la naturaleza del espécimen (Majó, 2003) .

La fatiga se puede presentar en ciclos de carga repetida, donde los esfuerzos máximos y mínimos son asimétricos respecto a la referencia, o en ciclos aleatorios donde la carga puede ir variando en frecuencia y amplitud. Para el estudio de la fatiga se debe entender el concepto de las componentes de esfuerzos medios (S_m) y alternativos (S_a), así como intervalo de esfuerzo ΔS y la razón de esfuerzo R y de amplitud A (Norton, 2011) .

$$\Delta S = S_{\max} - S_{\min} \quad (1)$$

$$S_m = \frac{S_{\max} + S_{\min}}{2} \quad (2)$$

$$S_a = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{2} \quad (3)$$

$$R = \frac{S_{\min}}{S_{\max}} \quad (4)$$

$$A = \frac{S_a}{S_m} \quad (5)$$

El valor de R responde a la naturaleza de la tensión variable aplicada. Para valores de R entre menos infinito y cero indica que se tienen ciclos de tensión- compresión (T-C). Para valores de R= -1 se obtienen cargas simétricamente oscilantes T-C. Con valores de R entre 0 y 1 se obtienen ensayos T-T. Los valores de R superiores a 1 configuran ensayos a C-C.

Estructuralmente se pueden presentar dos fenómenos resultantes de la fatiga en los materiales compuestos:

- Pérdida de rigidez
- Rotura de la pieza

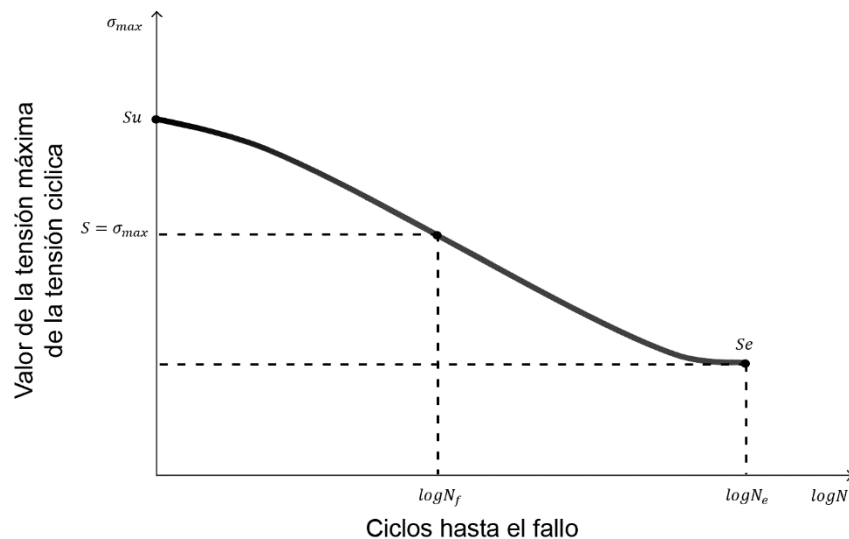
La falla final surge como producto de la unión de varios mecanismos de daño que surgen en diferentes puntos, provocados por la existencia de fases con propiedades diferentes que crean los mecanismos de degradación local y producen un proceso de daño global, y la anisotropía que genera una distribución de tensiones que degradan la parte interna (Majó, 2003).

Existen diferentes factores que afectan la vida a fatiga de los materiales compuestos, como la fase de refuerzo que para GFRP presenta una mayor caída de la resistencia con el número de ciclos, la orientación de la fase de las fibras debido a que los esfuerzos no se encuentran en la dirección de la fibra y esto

provoca un estado de tensiones complejo en dirección del refuerzo y de esfuerzo cortante entre la matriz y la fibra. En este aspecto cabe destacar que la degradación a fatiga se ha determinado que es influida mayoritariamente por las propiedades de la matriz y por lo tanto la interfase fibra-matriz también es uno de los factores que afectan la vida a fatiga de estos materiales.

En la Figura 2 se puede observar un ejemplo de la curva (tensión-vida), la cual muestra el fenómeno de fatiga, pero no genera indicación alguna sobre la disminución de la rigidez, mecanismos de daño, presencia de grietas o el cambio de las características del material.

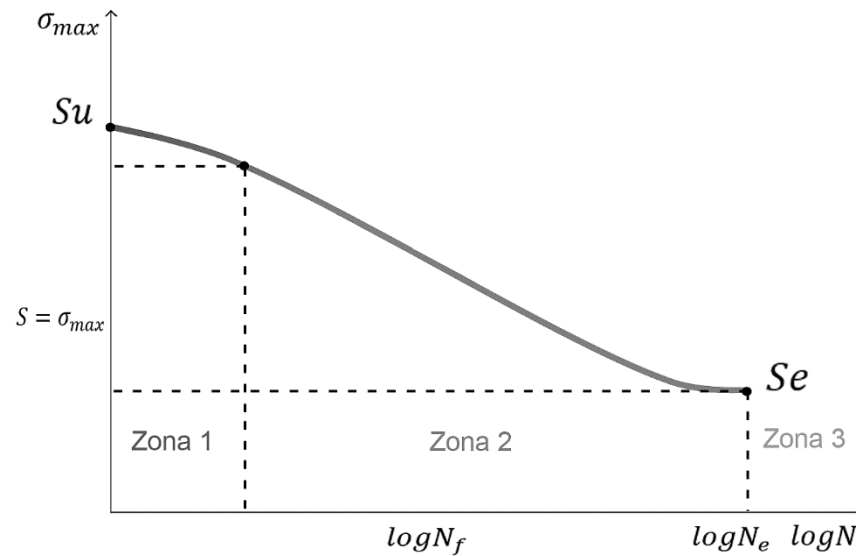
Figura 2. Curva S-N para un material



En la Figura 3 se pueden diferenciar las tres zonas que generalmente se presentan en los materiales:

- Zona inicial: pendiente suave.
- Zona central: incremento de pendiente.
- Zona final: Se suaviza la pendiente.

Figura 3. Delimitación de zonas dentro de la curva de tensión-vida (S-N).



Los daños presentados en los materiales compuestos generalmente varían en función de la configuración entre la fibra y la matriz, la distribución y orientación del esfuerzo y el tipo de cargas aplicadas, es por esto que los resultados experimentales no son fácilmente generalizables. Lo anterior justifica la cantidad de estudios que se han hecho en las últimas décadas para mejorar el conocimiento del fenómeno de fatiga en compuestos (Mayugo, 2010).

3 DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

Los ensayos establecidos para el estudio del material son los recomendados por la normativa ASTM en su sección de materiales compuestos, estos son: el ensayo D3039 (ASTM INTERNATIONAL, 2014) para carga estática y el ensayo D3479 (ASTM INTERNATIONAL, 2012a) para carga dinámica. En la aplicación de esta normativa también se deben tener en cuenta las especificaciones de ASTM para las dimensiones de las probetas con el fin de tener una normalización en los ensayos que se realizaron. Las probetas siguieron las recomendaciones del estándar D4762 del cual se hablará en la siguiente sección.

Para la ejecución de los ensayos estáticos y dinámicos se utilizó una maquina MTS Bionix Tabletop, mostrada en la Figura 4, modelo 370.02 con una celda de carga con capacidad de 25 kN y un desplazamiento de ± 57 mm.

Figura 4. Máquina MTS Bionix usada para los ensayos.



3.1 ENSAYOS ESTÁTICOS

Para poder observar el comportamiento dinámico del material se debe obtener la resistencia a la tracción. Esta propiedad se encuentra aplicando carga sobre probetas normalizadas sometiéndolas a esfuerzos axiales crecientes hasta que se produzca rotura siguiendo la normativa D3039. El resultado de las pruebas realizadas según establece ASTM es la resistencia a la rotura del material, la cual puede determinarse a partir de la fuerza máxima realizada antes de la falla.

La norma D3039 recomienda una toma de datos mediante extensómetro y/o galgas extensiométricas. Para este trabajo se contó con un sistema digital de recolección de datos que guardaba en un computador toda la información recopilada en cada una de las pruebas realizadas.

El método de sujeción forma parte importante de los ensayos a realizar ya que este debe garantizar que la carga sea aplicada uniformemente a toda la sección transversal del material. De igual manera, las mordazas deben evitar que las probetas se deslicen y se fragilicen. En este caso, debido a la forma del área transversal que presentan las probetas se debió mecanizar un par de lengüetas en acero, para poder garantizar que el área de contacto con las mordazas de la máquina sea lo más plana posible, y así evitar fallas en el material por deslizamiento de alguna de las capas respecto a las demás debido a la diferencia entre las áreas de contacto.

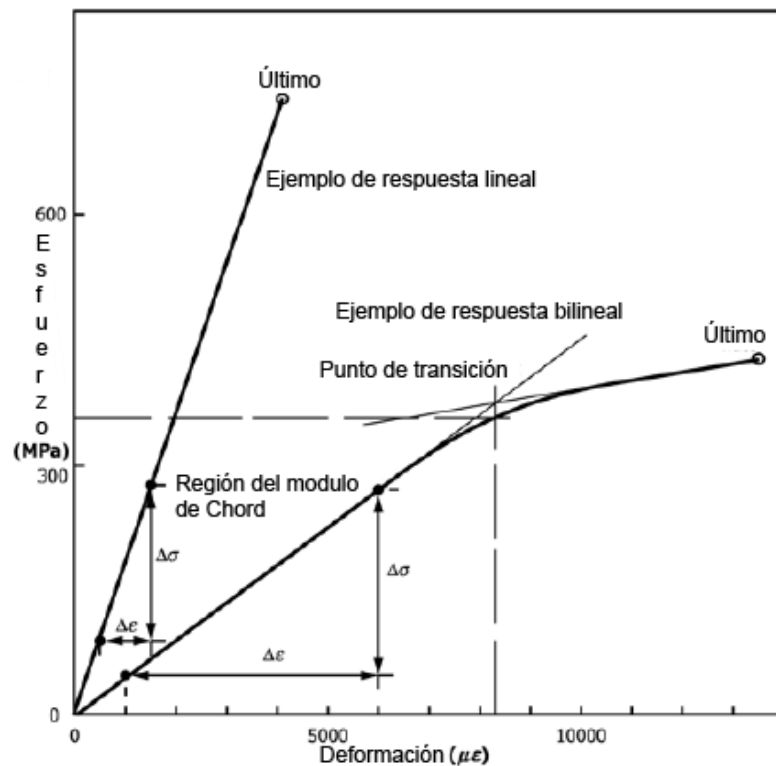
El cálculo de la resistencia a la tracción es dado por la siguiente ecuación:

$$F^{tu} = P^{max} / A \quad (6)$$

Donde F^{tu} es la resistencia a la tracción, P^{max} es la fuerza máxima antes del fallo y A es la medida de la zona de la sección transversal de la probeta. De este modo se obtiene la resistencia a la tracción o esfuerzo de rotura que es capaz de soportar el material.

En la Figura 5 se muestran ejemplos del comportamiento bajo carga estática de un material compuesto, generalmente se presentan dos formas de respuesta, la primera, completamente lineal típica de materiales frágiles, y la segunda presenta un comportamiento lineal y cuando alcanza el punto de transición su respuesta se convierte en no lineal, típica de materiales dúctiles, debido a su plasticidad.

Figura 5. Curvas del comportamiento a tensión de materiales compuestos



Fuente: ASTM D3039 (ASTM INTERNATIONAL, 2014)

3.2 ENSAYOS DINÁMICOS

Para las pruebas de fatiga se usa la máquina de ensayos MTS empleada para la prueba de tracción, se estableció la frecuencia de los ensayos en 10 Hz. De igual manera se hace uso de las lengüetas debido a que se debe garantizar el no deslizamiento de las capas conforme aumentan los ciclos.

Se ensayaron 20 probetas distribuidas en 5 niveles de carga correspondiente al 90, 80, 70, 60 y 50% de la resistencia a la tracción estática. La aplicación de estas cargas se hace mediante una función senoidal con puntos máximos y mínimos establecidos por la carga, previamente calculada, que le corresponde a cada nivel.

La obtención de los parámetros para los ensayos se realiza a partir de la carga máxima obtenida de los ensayos estáticos, a partir de este momento se deben calcular las fuerzas máximas y mínimas a diferentes porcentajes de carga y así encontrar los esfuerzos de cada uno de los puntos. La fuerza mínima se determina según el valor $R=0.1$ garantizando un ensayo T-T

El cálculo de las fuerzas máximas y mínimas es el siguiente, este ejemplo se hace para un porcentaje de carga del 80%, pero es extrapolable a otros valores:

$$P_{max@80\%} = P_{max} * 0.8 \quad (7)$$

$$P_{min@80\%} = P_{max@80\%} * 0.1 \quad (8)$$

$$P_{prom} = \frac{P_{max@80\%} + P_{min@80\%}}{2} \quad (9)$$

La norma D3479 recomienda dos métodos para la determinación de la vida a fatiga del material el cual se basa en un proceso estadístico que dará como resultado la curva S-N.

- Distribución Log-Normal: Se especifica en el documento E739 de la ASTM.
- Distribución de Weibull: Se usa generalmente para representar datos de la vida a fatiga en función de dos parámetros estadísticos α y β representados por las siguientes expresiones.

$$f(N) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{N}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{N}{\alpha}\right)^{\beta}\right] \quad (10)$$

Donde la función acumulada para vida a fatiga está dada por la siguiente expresión:

$$F(N) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{N}{\alpha}\right)^{\beta}\right] \quad (11)$$

Con estos lineamientos se obtendrán las propiedades del material que nos sirvan de conocimiento base para estudios más avanzados.

4 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

Con el fin de obtener resultados válidos se definió la geometría de las probetas según la norma ASTM D4762 (ASTM INTERNATIONAL, 2012b) donde se establecen los diferentes parámetros a tener en cuenta según el tipo de ensayo que se realice a materiales con matrices poliméricas y el uso de lengüetas para evitar el deslizamiento de las capas del material.

Para ambos ensayos la norma indica una geometría rectangular, donde sus dimensiones son establecidas de la siguiente manera: el ancho de la probeta de 1 pulgada, el largo de 10 pulgadas y el espesor se define según la configuración del material. Estas dimensiones han sido encontradas por una serie de laboratorios de ensayo para producir modos de falla aceptables en una amplia variedad de sistemas de materiales (ASTM INTERNATIONAL, 2014).

En este proyecto se contó con un tubo de 5 pulgadas de diámetro, aproximadamente 2.1 metros de largo y 1.4 cm de espesor, la capa de epoxi con fibra de vidrio es un laminado $[55, -55]_6$ respecto al eje longitudinal. El tubo fue seccionado con una sierra sin fin (como la que se muestra en la Figura 6) con el fin de obtener probetas lo más homogéneas posibles.

Para este trabajo se determinó realizar una caracterización macromecánica del material debido a la imposibilidad de separar cada una de las láminas de la sección de polímero reforzado. La construcción de la tubería únicamente permite retirar la capa termoplástica resistente al desgaste externa, ya que esta no se encuentra adherida.

En la Figura 7 y la Figura 8 se muestra la dirección de las fibras en las probetas obtenidas.

Figura 6. Sierra sin fin utilizada para corte del material.



Figura 7. Vista longitudinal de la dirección de las fibras en la tubería.

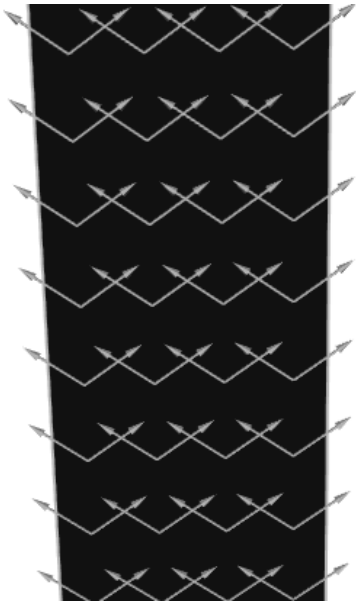
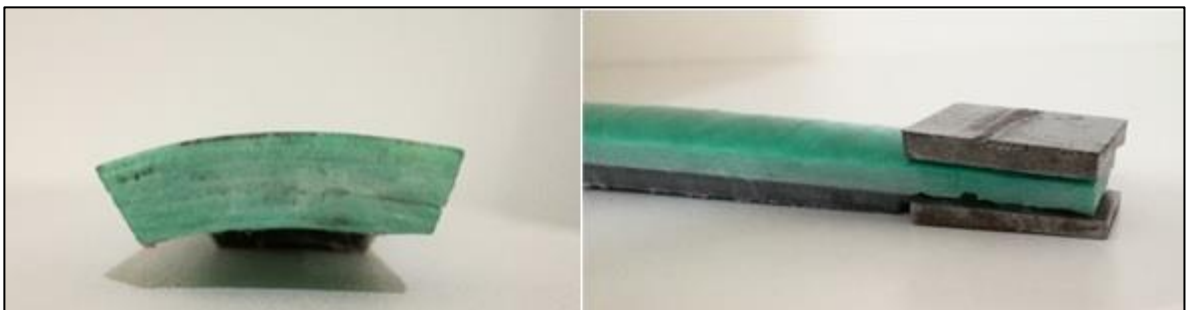


Figura 8. Vista longitudinal de una sección de probeta antes de ser ensayada



Las lengüetas utilizadas en los ensayos se muestran en la Figura 9, en total fueron 2 pares los utilizados debido a la necesidad de evitar que las capas se deslizaran una respecto a la otra.

Figura 9. Detalle del área transversal de la probeta y las lengüetas instaladas.



5 RESULTADOS

5.1 ENSAYOS ESTÁTICOS

En los ensayos estáticos se pudo determinar la carga máxima que soportan las probetas. En total se realizaron tres ensayos y se observó un comportamiento similar en todos ellos.

Los valores obtenidos fueron tomados de los datos dados por el sistema de adquisición de la máquina. A continuación, se presentan los resultados.

$$P_{max,1} = 15.6 \text{ kN}$$

$$P_{max,2} = 15.4 \text{ kN}$$

$$P_{max,3} = 15.3 \text{ kN}$$

El área transversal de cada probeta era de:

$$A_1 = 195 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = 192 \text{ mm}^2$$

$$A_3 = 190 \text{ mm}^2$$

Por lo tanto el valor de la resistencia a la tracción fue de:

$$S_1 = \frac{15.6 \text{ kN}}{195 \text{ mm}^2} = 80.3 \text{ MPa}$$

$$S_2 = \frac{15.4 \text{ kN}}{192 \text{ mm}^2} = 80.2 \text{ MPa}$$

$$S_3 = \frac{15.3 \text{ kN}}{190 \text{ mm}^2} = 80.5 \text{ MPa}$$

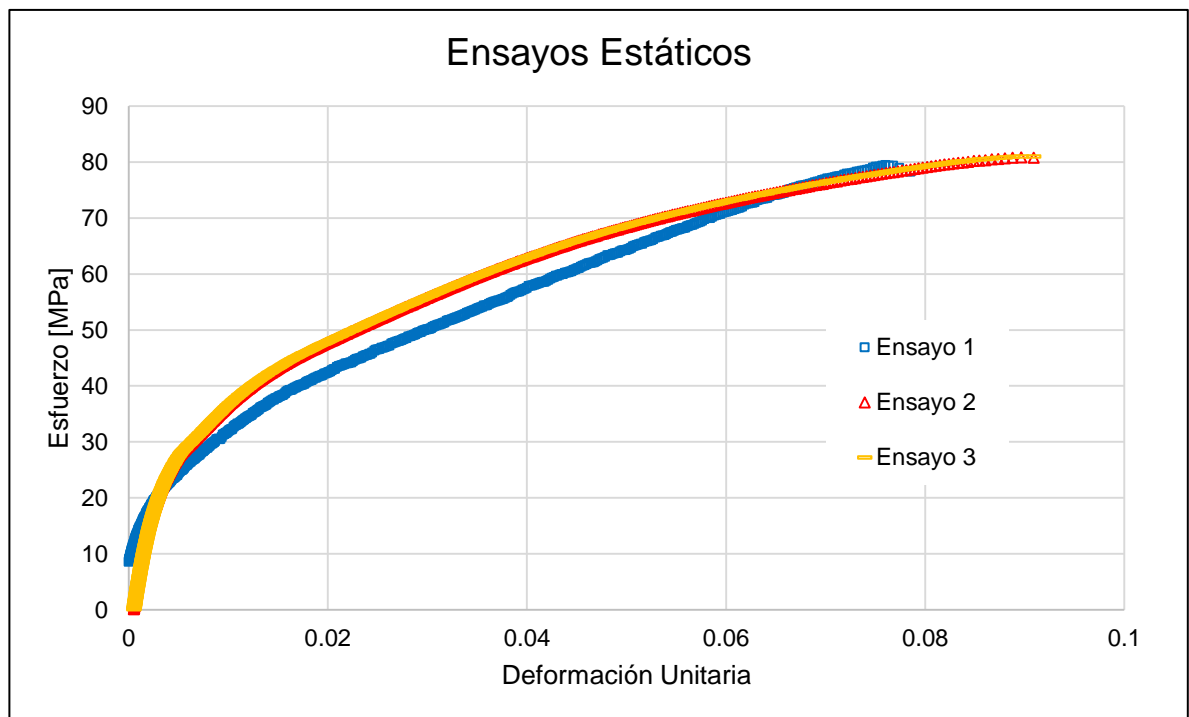
Para establecer los valores de los ensayos dinámicos se utiliza el valor promedio de la resistencia a la tracción y de la carga máxima que soportaron las probetas de las pruebas anteriores:

$$S = 80.35 \text{ MPa}$$

$$P_{max} = 15.4 \text{ kN}$$

En la Figura 10 se presentan las curvas de esfuerzo en función de la deformación unitaria para las probetas ensayadas. Como se puede observar el material presenta un comportamiento elástico-no lineal, este comportamiento es aceptado por la norma (ver Figura 5).

Figura 10. Gráfica esfuerzo Vs Deformación Unitaria para ensayos de tracción



A continuación, se presenta una tabla como resumen de los ensayos realizados. El módulo de elasticidad aparente se obtiene del valor de la pendiente de la sección lineal de cada curva.

Tabla 1. Resumen de resultados para ensayos estáticos.

Área [mm²]	Carga Máxima [kN]	Resistencia a la tracción [MPa]	Máxima deformación axial [mm]	Módulo de elasticidad aparente [MPa]
195	15.6	80.3	19.7	9136
190	15.3	80.5	23.72	11352
192	15.4	80.2	24.5	10935

En la Figura 11 se puede observar las probetas que fueron sometidas al ensayo de carga estática. El modo de fallo del material responde a la separación de la interfaz fibra-matriz que produce las aristas en V que se presentan, esto justifica la hipótesis que la falla en la primera capa del material sea el desencadenante de micro fisuras que, al llegar a la fibra, la carguen con esfuerzos cortantes que la separen de la matriz. La similitud de las fallas al igual que el comportamiento del material, evidenciado en la Figura 11, da una idea muy clara de la validez de los resultados.

Figura 11. Probetas sometidas a carga estática.



5.2 ENSAYOS DINÁMICOS

Con el valor de la resistencia a la tracción del material se establecen los parámetros de cada uno de los ensayos de fatiga a los diferentes porcentajes de carga previamente escogidos, estos valores se muestran en la Tabla 2. Se establece el índice de reversión (R) en 0.1, esto con el fin de obtener ensayos a T-T con un valor bajo de S_m y que las tensiones generadas tiendan a abrir las grietas debido a la degradación que se da por el fenómeno de fatiga.

Tabla 2. Parámetros establecidos para cada nivel de carga en ensayos dinámicos.

Nivel de carga (%)	Fuerza Máxima [N]	Fuerza Mínima [N]	Fuerza Media [N]	Amplitud [N]
90	13812.4	1381.2	7596.8	6215.6
80	12277.6	1227.7	6752.65	5525
70	10743.2	1071.3	5907.25	4836
60	9210.3	921	5065.65	4144.6
50	7700	770	4235	3465

Para cada grupo de datos obtenidos se realizó una prueba estadística con ayuda del software STATGRAPHICS® basándose en el método Kolmogorov-Smirnov, el cual determina la bondad de ajuste de los datos con un grupo de distribuciones. Para este trabajo y siguiendo las directrices de ASTM se ajustaron a las distribuciones LogNormal y Weibull, obteniendo niveles aceptables para cada una. En cada nivel de carga se muestra el histograma obtenido en STATGRAPHICS®.

Se escoge la distribución Weibull por ser la de mayor reputación y uso ingenieril. Se hace el cálculo de la mediana y se estipula como el valor de ciclos para cada nivel de carga.

5.2.1 Ensayos al 90% de la carga

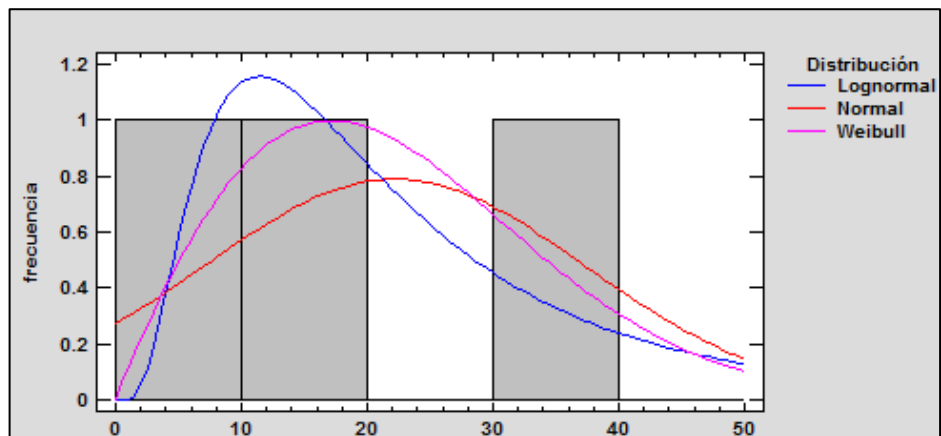
Los resultados para las 4 probetas ensayadas al 90% de la carga se presentan en la Tabla 3 y se plantean observaciones acerca de cada prueba.

Tabla 3. Resultados de los ensayos al 90% de carga.

Probeta	Área [mm ²]	Número de ciclos	Esfuerzo máximo [MPa]	Observaciones
90_1	228	9.5	60.58	Rotura cerca al extremo de la probeta
90_2	156	4.5	88.54	El área de la probeta hace que el ensayo no sea válido
90_3	252	18	54.81	Rotura cerca al extremo de la probeta
90_4	220	39	62.78	Rotura cerca al extremo de la probeta

Como se puede observar en la probeta 90_2 se obtuvo un esfuerzo muy alto, el cual es superior a la resistencia a la tracción del material. Esta diferencia se presenta por el valor del área transversal, menor en comparación con las otras probetas, por este motivo se decide declarar no válido este ensayo.

Figura 12. Histograma estadístico del 90% de carga



Esfuerzo: $S = 59.39 \text{ MPa}$

Número de ciclos: $N = 21$

5.2.2 Ensayos al 80% de la carga

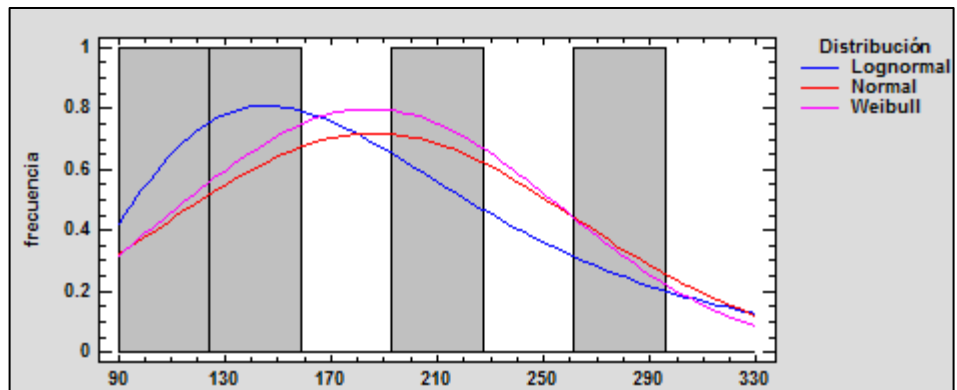
Los resultados para las 4 probetas ensayadas al 80% de la carga se presentan en la Tabla 4 y se plantean observaciones acerca de cada prueba.

Tabla 4. Resultados de los ensayos al 80% de carga

Probeta	Área [mm ²]	Número de ciclos	Esfuerzo máximo [MPa]	Observaciones
80_1	216	104	56.84	Rotura cerca al extremo de la probeta
80_2	299	283	41.06	Rotura cerca al extremo de la probeta
80_3	209	203	58.75	Rotura cerca al extremo de la probeta
80_4	155	155	93.02	El área de la probeta hace que el ensayo no sea válido

Al igual que en los ensayos anteriores se presenta una probeta, la identificada con el rótulo 80_4, con un área muy inferior a las demás, esto se ve reflejado en un esfuerzo muy alto, incluso aún mayor al esfuerzo de rotura del material en condiciones estáticas, por esta razón se decide suprimir este ensayo y hacerlo no válido.

Figura 13. Histograma estadístico del 80% de carga



Los cálculos estadísticos arrojan los siguientes resultados:

Esfuerzo: $S = 52.22 \text{ MPa}$

Número de ciclos: $N = 186$

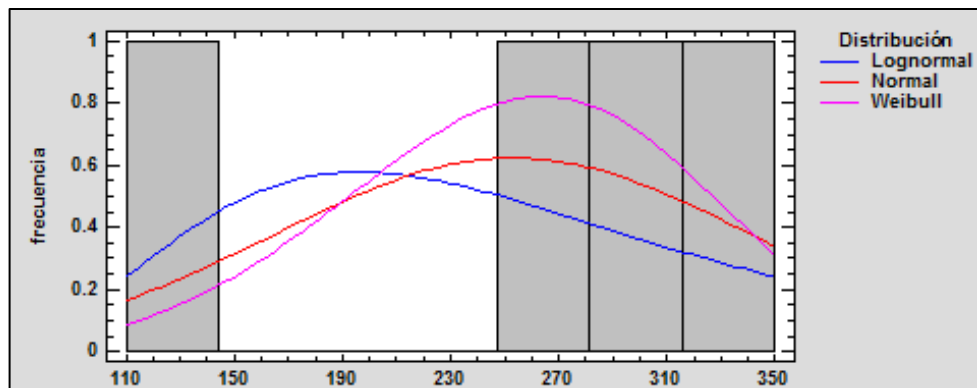
5.2.3 Ensayos al 70% de la carga

Los resultados para las 4 probetas ensayadas al 70% de la carga se presentan en la Tabla 5. Resultados de los ensayos al 70% de carga. y se plantean observaciones acerca de cada prueba.

Tabla 5. Resultados de los ensayos al 70% de carga.

Probeta	Área [mm ²]	Número de Ciclos	Esfuerzo máximo [MPa]	Observaciones
70_1	240	317	44.76	Rotura cerca al extremo de la probeta
70_2	220	124	48.83	Rotura cerca al extremo de la probeta
70_3	238	275	45.14	Rotura cerca al extremo de la probeta
70_4	216	296	49.74	Rotura cerca al extremo de la probeta

Figura 14. Histograma estadístico del 70% de carga



El valor de ciclos obtenido mediante el análisis estadístico y el esfuerzo con el que se realizó este ensayo se presentan a continuación.

Esfuerzo: $S = 47.1 \text{ MPa}$

Número de ciclos: $N = 257$

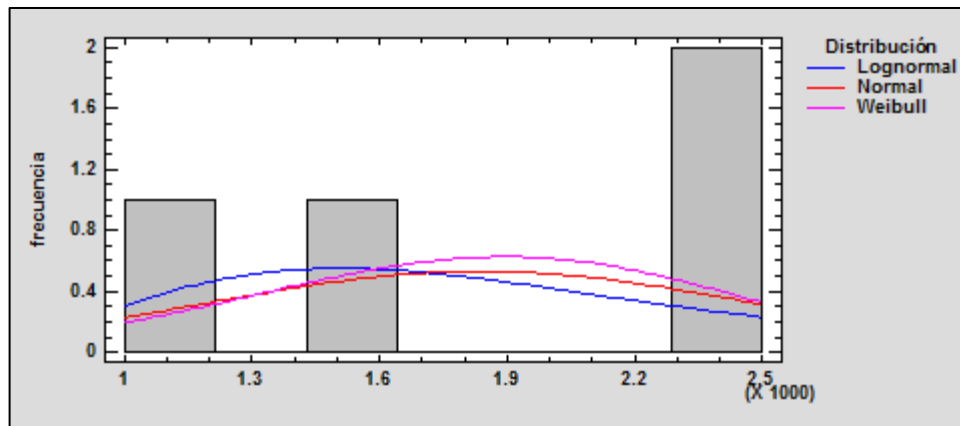
5.2.4 Ensayos al 60% de la carga

Los resultados para las 4 probetas ensayadas al 60% de la carga se presentan en la Tabla 6 y se plantean observaciones acerca de cada prueba.

Tabla 6. Resultados de los ensayos al 60% de carga.

Probeta	Área [mm ²]	Número de ciclos	Esfuerzo máximo [MPa]	Observaciones
60_1	240	2335	38.38	Rotura cerca al extremo de la probeta
60_2	264	2406	34.89	Rotura cerca al extremo de la probeta
60_3	252	1537	36.55	Rotura cerca al extremo de la probeta
60_4	260	1075	35.42	Rotura cerca al extremo de la probeta

Figura 15. Histograma estadístico del 60% de carga



Los cálculos estadísticos arrojan los siguientes resultados:

Esfuerzo: $S = 36.31 \text{ MPa}$

Número de ciclos: $N = 1860$

5.2.5 Ensayos al 50% de la carga

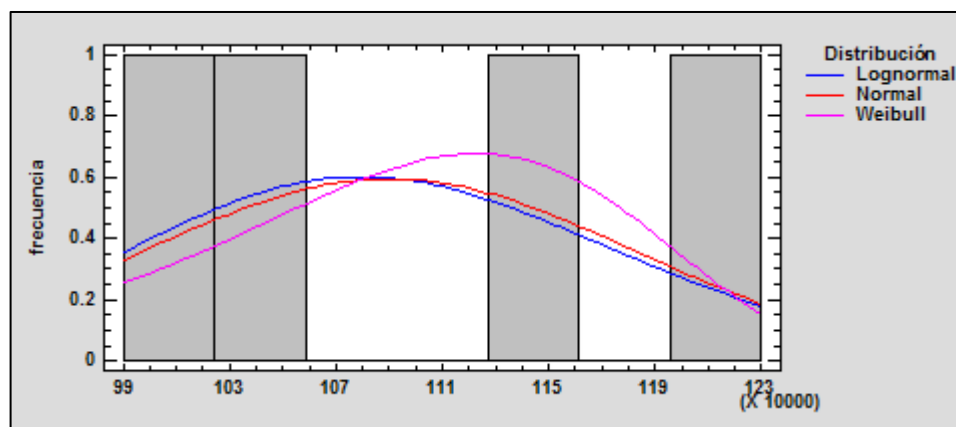
Los resultados para las 4 probetas ensayadas al 50% de la carga se presentan en la Tabla 7 y se plantean observaciones acerca de cada prueba.

Tabla 7. Resultados de los ensayos al 50% de carga

Probeta	Área [mm ²]	Número de ciclos	Esfuerzo máximo [MPa]	Observaciones
50_1	225	$1.2 * 10^6$	34.11	No rompió
50_2	230	$1.03 * 10^6$	33.37	No rompió
50_3	219	$1 * 10^6$	35.05	No rompió
50_4	240	$1.13 * 10^6$	31.98	No rompió

Inicialmente se planteó la hipótesis que la zona de vida infinita del material se encontraba entre el 50% y el 60% de la carga máxima bajo condiciones estáticas. Es por esto que cuando se superó el valor de 10^6 ciclos en este ensayo, se pudo comprobar que a partir de este punto inicia la zona de vida infinita. Las cuatro probetas que fueron probadas superaron este número de ciclos llegando algunas a soportar hasta 1.2×10^6 ciclos sin romperse.

Figura 16. Histograma estadístico del 50% de carga



Esfuerzo: $S = 32.6 \text{ MPa}$

Número de ciclos: $N = 1100760$

5.2.6 Rotura de las probetas y algunas otras consideraciones

En la Figura 17 se puede ver las 16 probetas que han fallado, no se anexan las probetas probadas al 50% de la carga ya que estas no presentaron falla. Para todos los niveles de carga, se ve una falla cercana a los extremos de las probetas, esto se explica por el concentrador de esfuerzos que se generó al retirar parte de la capa interna de la tubería.

En el momento de la rotura se evidenció una deformación mayor que precedía la rotura del material, esto es una prueba de un comportamiento con tendencia a ser dúctil. La falla se presenta mediante una separación de la matriz respecto a las fibras según la forma de V que se alcanza a percibir en las secciones donde las probetas fallaron, lo anterior da indicios de un fallo en la interfaz fibra-matriz donde la matriz es el factor limitante al cargar este material.

Figura 17. Probetas probadas al 90, 80, 70 y 60% del nivel de carga.



(a)



(b)



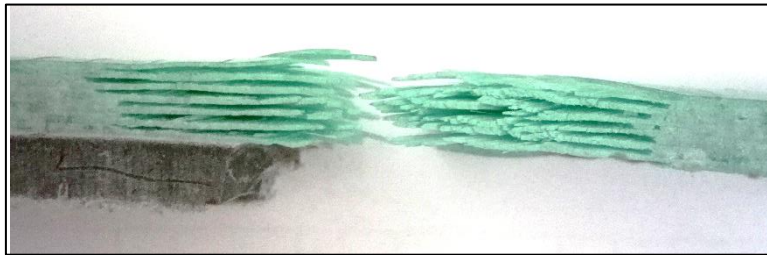
(c)



(d)

La Figura 18 muestra el aspecto de la rotura obtenida, en ella se aprecia la delaminación característica de estos materiales.

Figura 18. Detalle de la rotura obtenida en las probetas.



En los ensayos se puede observar que en muchas probetas el número de ciclos en los que se presenta la falla varía considerablemente. Esto es producto de la naturaleza dispersa de la fatiga, donde la falla puede presentarse en cualquier momento, influida por aspectos propios de la construcción y la manipulación del material. Pese a lo anterior los resultados encontrados logran ser satisfactorios y dan una idea más clara del comportamiento del material al ser sometido a cargas dinámicas.

5.3 GRÁFICAS S-N

En los materiales existen varios modelos de fatiga que representan la curva S-N, en este trabajo se presentan los modelos de Wöhler y Basquin. El primero de ellos presenta el valor del esfuerzo en función del logaritmo del número de ciclos y el segundo desarrolla una relación lineal en el diagrama entre el logaritmo del esfuerzo y el logaritmo del número de ciclos. El modelo de Basquin en el tramo de vida finita se rige por la siguiente ecuación:

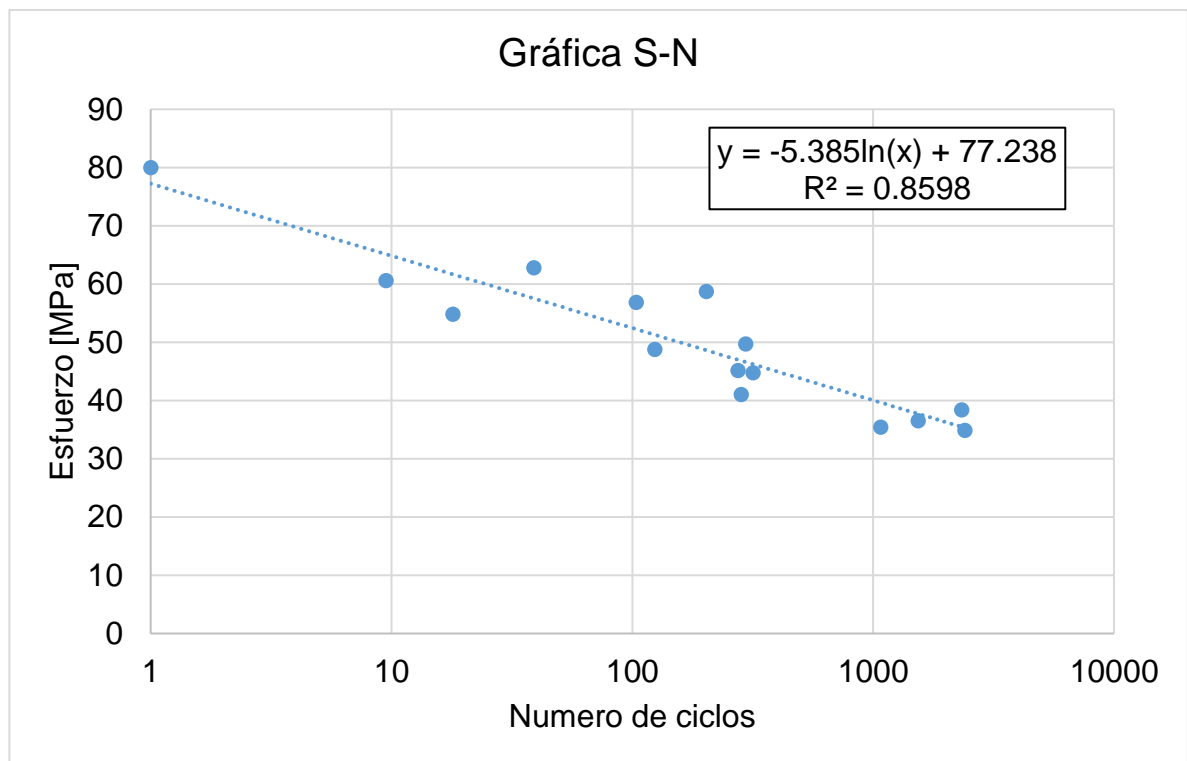
$$\log \sigma = \beta \log N + \alpha$$

En la Figura 19 se representa la gráfica obtenida según el modelo de Wöhler para los ensayos dinámicos. La escala de la gráfica es logarítmica y en ella también se puede observar la ecuación de la línea de tendencia.

El valor del coeficiente de determinación $R^2 = 0.8598$ indica que los valores de cada ensayo representados en los puntos se ajustan de una buena manera a la función que el programa nos arroja.

$$S = -5.385\log(N) + 77.238$$

Figura 19. Gráfica S-N del material.



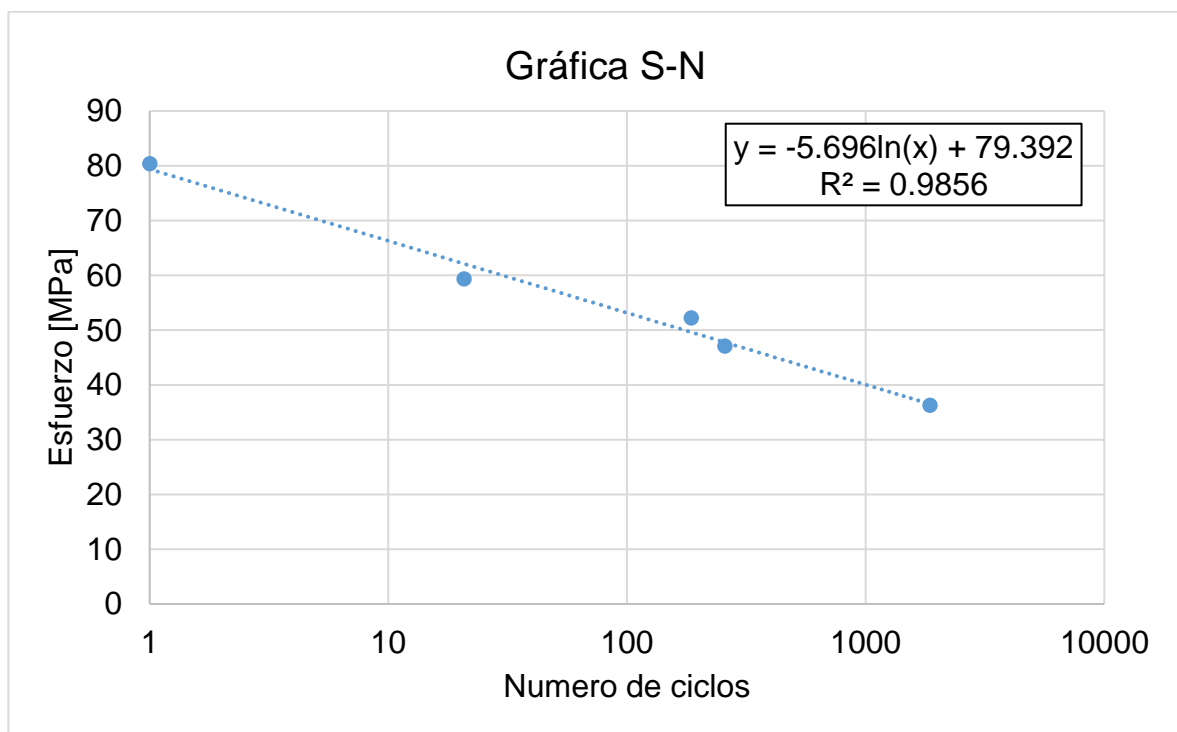
Con el fin de presentar de una mejor manera los resultados en una gráfica S-N se agrupan los puntos de cada nivel de carga mediante el análisis estadístico nombrado anteriormente y se grafican los valores dados de esfuerzo y número de ciclos en cada sección. La Figura 20 muestra la relación entre el esfuerzo y el logaritmo del número de ciclos planteada por Wöhler.

De esta forma cada uno de los puntos de cada nivel se ajusta de una mejor manera a una nueva línea de tendencia que puede ser utilizada para determinar la relación de los ciclos de vida del material con el esfuerzo máximo que este resiste.

La ecuación de la línea de tendencia sería la siguiente:

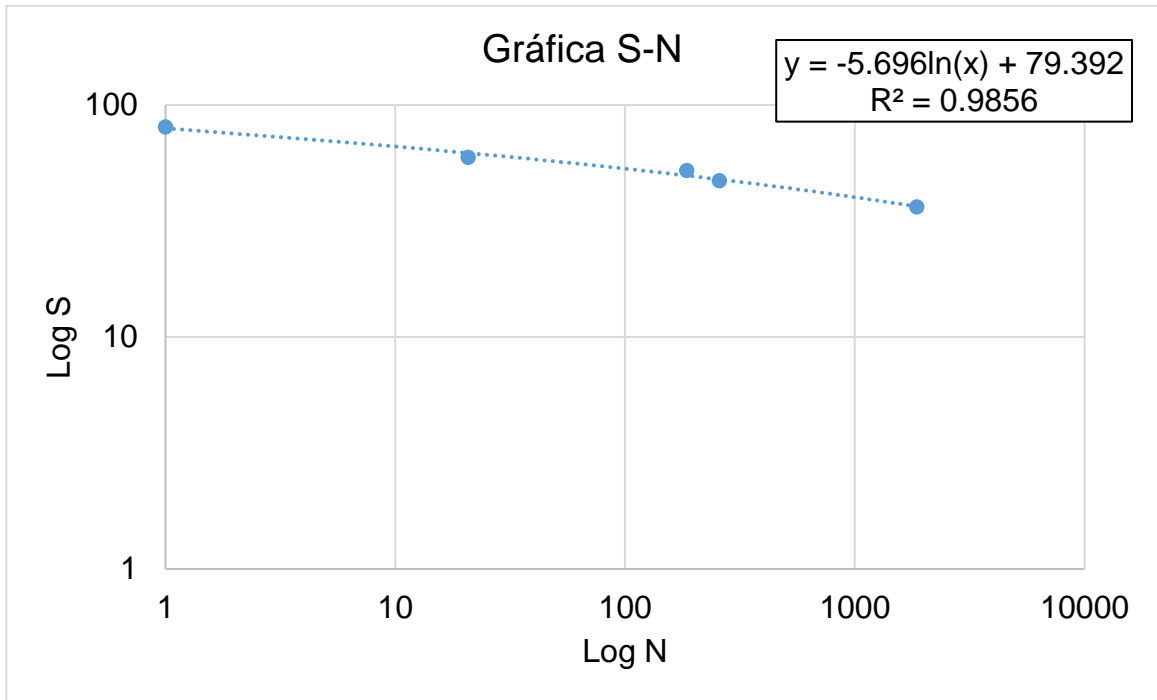
$$S = -5.696\log(N) + 79.392$$

Figura 20. Gráfica S-N generalizada del material.



En la Figura 21 se presenta la curva S-N que sigue el modelo presentado por Basquin con una curva de tendencia con un índice de regresión de $R^2 = 0.8158$, siendo estos resultados similares a los presentados en la Figura 20.

Figura 21. Gráfica S-N para el modelo de Basquin.



6 CONCLUSIONES

En este trabajo se estudió el comportamiento bajo cargas de tracción axial, en condiciones estáticas y dinámicas, de un material compuesto de matriz epóxica reforzado con fibras de vidrio, utilizado para la fabricación de tubería enrollable (GFRP) empleada en la industria para el transporte de crudo y gas natural.

Para esto se siguió una metodología que consistía inicialmente en establecer la geometría de las probetas según los parámetros establecidos por ASTM en su apartado de materiales compuestos, haciendo cortes longitudinales a la tubería. Con esto ya definido se procedió a ensayar estáticamente las probetas y se comprobó que el material soporta esfuerzos longitudinales de 80.35 MPa.

Como se puede observar en las gráficas que muestran la curva $S-\epsilon$ del material, este tiene una respuesta no lineal a la tracción. Teniendo en cuenta que la probeta fue cargada en dirección del eje longitudinal de la tubería, se presenta un estado de carga multiaxial y muy complejo sobre las fibras, lo que hace que existan esfuerzos cortantes internos producidos por la transferencia de carga desde la matriz hacia las mismas fibras.

La importancia de los ensayos en la dirección longitudinal en la que se carga el material radica en que en esta dirección se presentan esfuerzos que son producto de los efectos causados por el propio peso de la tubería, las condiciones de ambiente (vientos, terremotos, vibraciones, etc), condiciones de contorno especiales (soportes y accesorios) y condiciones de operación que producen expansiones térmicas en la tubería (ASME, 2012) . Debido al alcance del proyecto, no se tuvo en cuenta un análisis del comportamiento del material según esfuerzos circunferenciales.

Para el estudio del fenómeno de fatiga en el material se definieron los niveles de carga que se probaron en cada ensayo, obteniendo valores máximos de 13812.4 N

para el 90%, 12277.6 N para el 80%, 10743.2 N para el 70%, 9210.3 N para el 60% y 7700 N para el 50% de la carga estática máxima.

En los ensayos dinámicos las probetas demostraron el comportamiento del material acorde a lo que se esperaba, la disminución de la carga para rotura y el aumento de los ciclos para que se produzca el fallo, esto se evidencia en las gráficas obtenidas en el apartado de ensayos dinámicos. Pese a la naturaleza dispersa del fenómeno de fatiga, se pudo obtener resultados consistentes y soportados por la literatura. Gracias a estos ensayos se obtuvo la curva S-N que se estaba buscando y de ella se destaca una línea de tendencia con coeficientes de determinación cercanos a uno. Las gráficas fueron establecidas en escalas logarítmicas para poder obtener una línea recta, según los modelos empleados.

Para definir el método de falla de este material a cargas de tracción longitudinal se observó la forma en que fallaron las probetas después de cada ensayo y se analizó el momento exacto en el que ocurre la falla. De esto se pudo concluir que la falla ocurre por la tendencia del material a ser dúctil, evidenciado por la forma en que empieza a ceder el material hasta el punto de presentarse una rotura explosiva en cada probeta, así como la delaminación del material visto desde los laterales y la falla en la interfaz fibra-matriz, ya que existe un desprendimiento de la matriz en cada una de las capas dejando casi que intactas las fibras, de ahí la forma de V en la que queda la sección de la probeta que presenta la falla.

Se debe resaltar que al modificar la probeta acorde a la apertura de las mordazas de la máquina, el efecto que tiene la capa interior en el comportamiento del material no se tiene en cuenta, pero se aclara que esta capa también aporta rigidez a la estructura como barrera de presión. Para obtener más detalles del comportamiento interno del material y un análisis micromecánico de cada capa se hace necesario un estudio numérico. Esta tecnología al ser patentada presenta una alta dificultad para ser analizada detalladamente, ya que el fabricante no proporciona los datos individuales de la fibra y matriz haciendo más difícil el proceso de caracterización.

7 RECOMENDACIONES

Si bien este trabajo desarrolló un estudio macromecánico del material se puede obtener mucha más información planteando nuevos parámetros en cada ensayo, por ejemplo:

- Variar el impacto de la frecuencia en las pruebas, esto con el fin de observar cómo cambia las curvas de comportamiento del material conforme aumenta o disminuye la frecuencia de la onda senoidal con la que es aplicada la carga.
- Mejorar los resultados obtenidos aumentando la cantidad de ensayos para cada nivel de carga, obteniendo así resultados más fiables.
- Variar los valores del factor R para poder obtener curvas de fatiga a diferentes condiciones y bajo diferentes cargas dinámicas, podría ser, T-C y C-C.
- Realizar pruebas en diferentes ambientes, simulando así la forma en la que responde el material en condiciones donde la temperatura varíe o presente condiciones extremas o bajo fluidos más viscosos. Esta variación de los ensayos hace necesario el uso de accesorios especiales para la máquina de ensayos.
- Estudiar el aumento de temperatura conforme aumenta los ensayos en la superficie de la probeta.
- Estudiar el comportamiento del material en la dirección circunferencial proponiendo un ensayo acorde para este planteamiento.

8 BIBLIOGRAFÍA

ANSARI, R., ALISAF AEI, F., & GHAEDI, P. (2010). Dynamic analysis of multi-layered filament-wound composite pipes subjected to cyclic internal pressure and cyclic temperature. *Composite Structures*, 92(5), 1100–1109. <http://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.09.058>

ASME. (2012). B31.3 Process Piping, 76(8), 95–108.

ASTM INTERNATIONAL. (2012a). D3479/D3479M_12. Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite. *Annual Book of ASTM Standards, i*(Reapproved 2007), 1–6. <http://doi.org/10.1520/D3479>

ASTM INTERNATIONAL. (2012b). D4762_11a. Standard Guide for Testing Polymer Matrix Composite Materials 1. *Annual Book of ASTM Standards*, 1–22. <http://doi.org/10.1520/D4762-11A.2>

ASTM INTERNATIONAL. (2014). D3039/D3039M: Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. *Annual Book of ASTM Standards*, 1–13. <http://doi.org/10.1520/D3039>

BABU, M., BAKSI, S., SRIKANTH, G., & BISWAS, S. (2009). Composites for Offshore Applications. TIFAC.

BESEDNJAK, A. (2005). *Materiales Compuestos: Proceso de Fabricación de Embarcaciones*. Barcelona: Ediciones de la Universidad Politécnica de Cataluña.

BRONDEL, D., EDWARDS, R., HAYMAN, A., HILL, D., & SEMERAD, T. (1994). Corrosion in the Oil Industry. *Oilfield Review*, 4–18. <http://doi.org/10.1021/ie50320a006>

CARLSSON, L. A., ADAMS, D. F., & PIPES, R. B. (2013). Basic Experimental Characterization of Polymer Matrix Composite Materials. *Polymer Reviews*, 53(2), 277–302. <http://doi.org/10.1080/15583724.2013.776588>

CASTELLANOS, O., & BALLESTEROS, D. (2010). Evaluación del efecto sinérgico entre la concentración de cloruros y el contenido de CO₂ en un acero API 5L grado B, mediante la técnica del ruido electroquímico. *UIS Ingenierías*, (1), 137–144.

DEREK, H. (2003). *Materiales Compuestos*. Barcelona: Editorial Reverté.

ECOPETROL S.A. (2014). Transporte Información.

GEMI, L., TARAKÇIOĞLU, N., AKDEMIR, A., & ŞAHİN, Ö. S. (2009). Progressive fatigue failure behavior of glass/epoxy (± 75)₂ filament-wound pipes under pure internal pressure. *Materials and Design*, 30(10), 4293–4298. <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.04.025>

GINER, E., & ALBELDA, J. (1998). *Análisis y Diseño con Materiales Compuestos*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

GONZÁLEZ, O. A., LEAL, J., & REYES, J. D. (2016). Análisis de integridad estructural de tuberías de material compuesto para el transporte de hidrocarburos por elementos finitos. *UIS Ingenierías*, 15(2), 105–116.

HALPIN, J. C. (1969). Effects of Environmental Factors on Composite Materials. Tech. Rep.

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>

JONES, R. M. (1999). *Mechanics of Composite Materials*. Blacksburg, Virginia: Taylor & Francis.

MAJÓ, J. A. M. (2003). *Estudio Constitutivo de Materiales Compuestos Laminados Sometidos a Cargas Cíclicas*. Barcelona.

MARSH, E. (2005). *Composites in Infraestructure*.

MAYUGO, J. A. (2010). Capítulo 2: Fatiga en materiales compuestos: comportamiento y mecanismos de degradación.

MIRAVETE, A. (2012). *Materiales compuestos I* (Primera ed). Barcelona: Editorial Reverté.

NORTON, R. L. (2011). *Diseño de máquinas*.

POVEDA, S. (2010). *Materiales compuestos-lectura complementaria*.

QUIGLEY, P., NOLET, S., & WILLIAMS, J. (2011). Patent No. US 8,066,033 B2., 2(60), 19.

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. *Revista de Ingeniería*, (42), 39–48. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.16924/riua.v0i42.756>

RAFIEE, R. (2013). Experimental and theoretical investigations on the failure of filament wound GRP pipes. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 257–267. <http://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.009>

RODRÍGUEZ, E. S., ALVAREZ, V. A., & MONTEMARTINI, P. E. (2013). Failure analysis of a GFRP pipe for oil transport. *Engineering Failure Analysis*, 28, 16–24. <http://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2012.07.025>

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>

STUPENENGO, F. (2011). Materiales compuestos. *Materiales Y Materias Primas*, 7–11.

TARAKÇIOĞLU, N., GEMI, L., & YAPICI, A. (2005). Fatigue failure behavior of glass/epoxy ±55 filament wound pipes under internal pressure. *Composites Science and Technology*, 65(3–4), 703–708. <http://doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.10.002>

WALSH, T. (2011). *The Plastic Piping Industry in North America. Applied Plastics Engineering Handbook*. Elsevier. <http://doi.org/10.1016/B978-1-4377-3514-7.10034-0>

XIA, M., TAKAYANAGI, H., & KEMMOCHI, K. (2001). Analysis of multi-layered filament-wound composite pipes under internal pressure. *Composite Structures*, 53(4), 483–491. [http://doi.org/10.1016/S0263-8223\(01\)00061-7](http://doi.org/10.1016/S0263-8223(01)00061-7)