

Estudio de la fatiga en láminas de tubería compuesta de matriz epóxica con fibra de vidrio para cargas de tracción

Study of fatigue in sheets of composite pipe of epoxy matrix with glass fiber for tensile loads

Alberto David Pertuz Comas¹, Octavio Andrés González-Estrada¹,

¹ *Ingeniería Mecánica, Grupo de investigación en energía y medio ambiente, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.*

agonzale@uis.edu.co, apertuzc@uis.edu.co

Resumen— 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 realizan ensayos 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. 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.

Palabras clave— Materiales compuestos, Tracción, Fatiga, ASTM D3039, ASTM D3479.

Abstract— In this work, the characterization of sheets of spoolable composite pipe reinforced with glass fiber with configuration [55,-55]₆ is performed. For this purpose, tensile tests under static and dynamic loads are performed, according to ASTM D3039 and D3479 standards. The tests are carried out to obtain the tensile strength and the S-N curve under tensile loads. With the data obtained, a statistical adjustment is made using the Weibull distribution model and its subsequent analysis applying the fatigue models of Basquin and Wöhler, and the mode of failure of this type of material is identified.

Key Word — Composite materials, Traction, Fatigue, ASTM D3039, ASTM D3479.

I. 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 [1], han dado paso a nuevas tecnologías en el sector del transporte y producción.

Los materiales compuestos se presentan como una opción importante en este tipo de aplicaciones, principalmente porque permiten trabajar con mejores condiciones de operación y se ajustan 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 290000 toneladas en el uso de material compuesto en recipientes a presión [2].

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 [3]. Es por esto que, hoy en día, en la industria del petróleo existe la tendencia a preferir este tipo de material en lugar de las metálicas convencionales para las tuberías de recogida y transporte [4]. Sin embargo, el comportamiento mecánico de estos materiales hace que sean más sensibles a diferentes modos de fallo como, por ejemplo, deformación por cizalla transversal, en comparación con materiales metálicos, con comportamiento isótropo y mucho más estudiados [5].

Un ejemplo de la aplicación de materiales compuestos en la construcción de tuberías es el tubo enrollable tipo *bonded* desarrollado por Quigley et al. [6], 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 fibra de vidrio, que soporta mayores presiones de trabajo, y que supera el tiempo en servicio comparado con las tuberías de acero. Por último, la capa externa se encarga de ser una protección para el material contra ralladuras y desgaste [6]. La tubería de tipo *bonded* presenta fibras de vidrio embebidas en una matriz epóxica (GFRP) [7], logrado mediante el enrollamiento de filamentos

de fibra de vidrio alrededor de un mandril que contiene la capa interna y el aglutinante, después pasa a un proceso de curado. Las propiedades de la tubería se establecen a partir del patrón del devanado en la capa del compuesto y el ángulo de la fibra [4].

Hull [8] y Carlsson *et al.* [9] caracterizaron diferentes materiales compuestos bajo tensión, compresión y cizalla, demostrando resultados detallados sobre laminados y las fallas micromecánicas que se presentan. Rafiee [10] realizó pruebas de tensión aparente según ASTM D2290 y de tracción con probetas cortadas en longitud longitudinal según D3039, a tubería GFP de diferentes diámetros con fibras enrolladas a 60° .

Rodríguez et al. [11] estudiaron experimentalmente tubería de matriz polimérica reforzada con fibras de vidrio que presentaban daños previos y observaron las consecuencias de la degradación higrótérmica y las consecuencias que tiene operar a la temperatura de transición vítrea. Quintero et al. [12] adelantaron estudios del efecto que tienen las ralladuras inducidas en la superficie de la capa exterior en las propiedades mecánicas en tubería compuesta flexible.

Soden et al. [13] experimentaron con muestras tubulares de fibras E-Glass en matriz epóxica con ángulos de enrollamiento de $\pm 55^\circ$ observando que la curva esfuerzo-deformación era no lineal. Por su parte, González et al. [14] realizaron modelos de elementos finitos de tubería de matriz epóxica reforzada con fibra de vidrio de 2 pulgadas de diámetro, con laminado $[55, -55]_2$. Asimismo, validaron mediante ensayos experimentales de tensión aparente y encontraron valores para el esfuerzo longitudinal y el esfuerzo circunferencial a presiones de operación en campo.

Ansari et al. [5] analizaron los esfuerzos en tuberías multicapas bajo presión y temperaturas cíclicas, y determinaron 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. [15] 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. [16] estudiaron el 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. En el estudio se evidenció la secuencialidad entre la separación entre la fibra y la matriz, la delaminación, la iniciación de las fugas y la falla final. También establecieron que en sus ensayos difícilmente se encuentra un límite de fatiga.

Gemi et al. [17] estudiaron 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.

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 [18]. Asimismo, se ha instalado a la fecha un número considerable de kilómetros en las líneas de transporte con tubería de material compuesto. 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 instalación y uso de esta nueva tecnología en la industria.

En este trabajo se caracteriza el comportamiento a fatiga de láminas de tubería enrollable de matriz epóxica reforzada con fibras de vidrio (GFRP) de configuración $[55, -55]_6$, que corresponde a una de las referencias actualmente instaladas en campos colombianos. En la siguiente sección se presentan, de manera general, los materiales compuestos y el fenómeno de fatiga aplicado a este tipo de material. Posteriormente, se describen los ensayos realizados bajo la normativa ASTM y se explican las consideraciones necesarias para la prueba de materiales compuestos. Luego, se establece la geometría de las probetas y la forma en la que fueron obtenidas de la tubería. Se continúa con los resultados obtenidos de los ensayos, estableciendo la resistencia a la tracción del material y las curvas 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.

II. ESTRUCTURA DE LA TUBERIA

A. Compuestos reforzados con fibras

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 [19]. Los compuestos reforzados con fibras largas se presentan en forma de laminados, los cuales se conforman de varias capas de espesor inferior a 1 mm apiladas 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, generando las características deseadas [20].

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 [3]. En la industria se pueden encontrar

matrices de materiales termoplásticos o termoestables usadas para embeber las fibras, y pueden presentar alta resistencia y rigidez para elevados pesos moleculares. Sus propiedades mecánicas, como fluencia a cargas de tracción y compresión, varían dependiendo de la temperatura, y pueden presentar comportamiento viscoelástico [21].

Las fibras ayudan al material compuesto a mejorar sus propiedades aportando resistencia mecánica, rigidez y dureza [3], [21], 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 y fibras orgánicas.

Fibras de carbono: son de naturaleza anisótropa, debido a los átomos de las capas de grafito que permanecen unidos mediante enlaces covalentes [3]. Esto permite al material mantener las características en la dirección óptima.

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: Vidrio E: Muestra buenas propiedades entre las que destacan su resistencia, rigidez y resistencia al desgaste. Vidrio C: Presenta un menor desgaste a la corrosión química que el vidrio E, pero es más costoso. Vidrio S: Es la más resistente a la temperatura, 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.

B. Tubería de material compuesto con matriz epóxica reforzada con fibra de vidrio

La tubería a estudiar se compone de tres capas, ver Figura 1. La primera capa es una barrera de presión termoplástica, la cual se encuentra en contacto con el fluido. Esta capa se encuentra adherida (*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 ralladuras sobre la tubería.

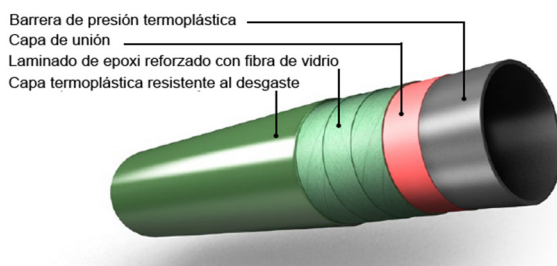


Figura 1. Configuración de las capas en una tubería de material compuesto: Tecnología bonded. Fuente: Fiberspar LinePipe Brochure, National Oilwell Varco.

C. Fatiga de materiales compuestos

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. 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 [22].

La fatiga se puede presentar en ciclos de carga repetida, donde los esfuerzos máximos S_{max} y mínimos S_{min} son simétricos respecto a la referencia, asimétricos 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 el intervalo de esfuerzo ΔS y la razón de esfuerzo R . Las expresiones para estos parámetros están dadas por:

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

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

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

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

El valor de R responde a la naturaleza de la tensión variable aplicada. Para valores de R entre menos infinito y cero se tienen ciclos de tensión - compresión (T-C). Para valores de $R = -1$ se tienen 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: (i) pérdida de rigidez, y (ii) 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 [22].

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. Asimismo, la orientación de la fase de las fibras afecta 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 sentido, cabe destacar que se ha determinado que la degradación a fatiga 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 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** 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.

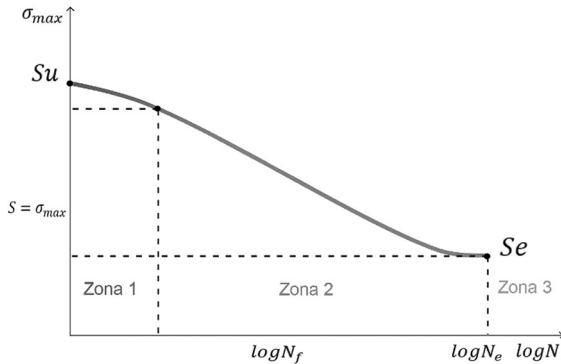


Figura 2. Curva S-N para un material, con delimitación de zonas.

Se pueden diferenciar las tres zonas que generalmente se presentan en los materiales: (i) zona inicial con pendiente suave, (ii) zona central con incremento de pendiente, y (iii) zona final donde se suaviza la pendiente.

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 [22].

III. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS ASTM.

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 [23] para carga estática y el ensayo D3479 para carga dinámica [24]. En la aplicación de esta normativa también se deben tener en cuenta las especificaciones de ASTM para las dimensiones de las probetas. Las probetas fueron realizadas de acuerdo con el estándar D4762, mostrado en la siguiente sección.

Para la ejecución de los ensayos estáticos y dinámicos se utilizó una máquina MTS Bionix Tabletop, mostrada en la Figura 3. Máquina MTS Bionix usada para los ensayos., modelo 370.02 con una celda de carga con capacidad de 25 kN y un desplazamiento de ± 57 mm.



Figura 3. Máquina MTS Bionix usada para los ensayos.

D. 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 sometidas 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.

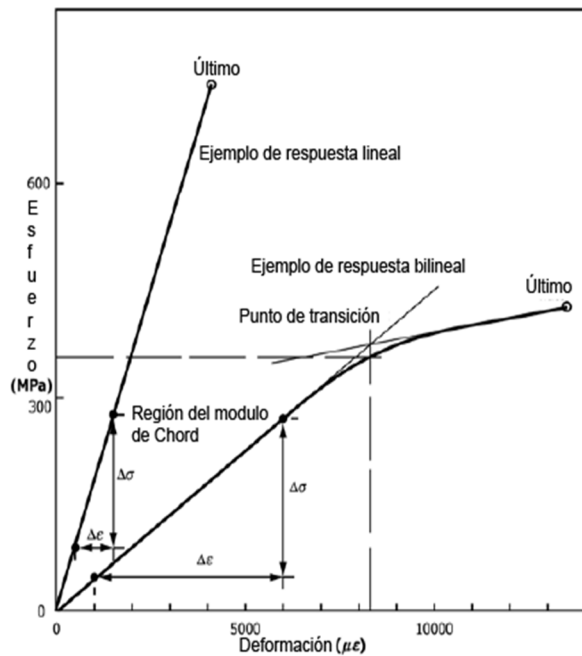
El método de sujeción forma parte importante de los ensayos a realizar ya que este debe garantizar que la carga sea aplicada uniformemente a toda la sección transversal del material. De igual manera, las mordazas deben evitar que las probetas se deslicen y se fragilicen. En este caso, debido a la forma 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:

$$F^{tu} = P^{max} / A \quad (5)$$

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 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.

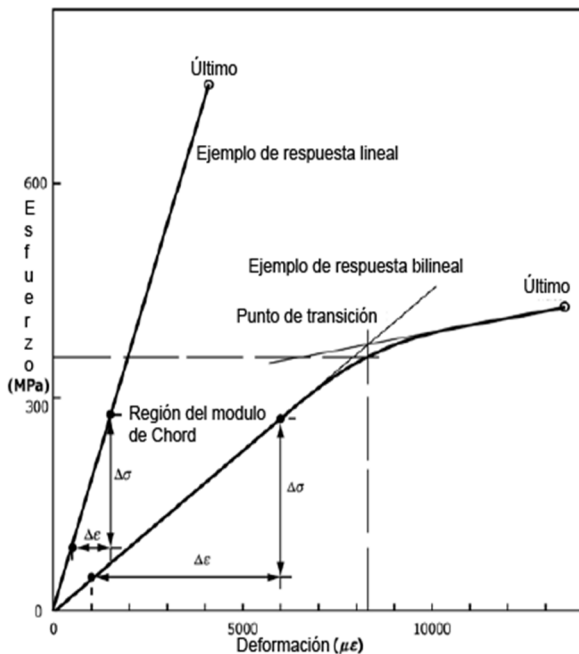


Figura 4. Curvas del comportamiento a tensión de materiales compuestos [23].

A. 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 fuerza última 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:

$$P_{max@80\%} = P_{max} * 0.8 \quad (6)$$

$$P_{min@80\%} = P_{max@80\%} * 0.1 \quad (7)$$

$$P_{prom} = \frac{P_{max@80\%} + P_{min@80\%}}{2} \quad (8)$$

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 y distribución Weibull, se seleccionó esta última por su mejor ajuste a los datos

La 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.

$$f(N) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{N}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{N}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (9)$$

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

Con el fin de obtener resultados válidos se definió la geometría de las probetas según la norma ASTM D4762 [25] 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 [23]. En este proyecto se contó con un tubo de 5 pulgadas de diámetro 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 con el fin de obtener probetas lo más homogéneas posibles.

Para este trabajo se determinó realizar una caracterización macromecánica de todo el laminado debido a la imposibilidad de separar cada una de las láminas de la sección de polímero reforzado. Debido a la constitución de la tubería, únicamente fue posible retirar la capa termoplástica resistente al desgaste externa, ya que esta no se encuentra adherida. En la Figura 5. Vista longitudinal de la dirección de las fibras en la tubería. se muestra la dirección de las fibras en las probetas obtenidas.

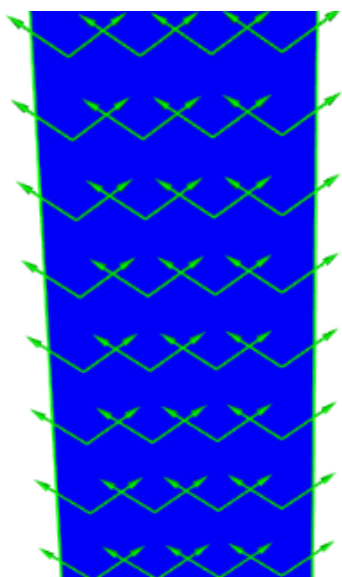


Figura 5. Vista longitudinal de la dirección de las fibras en la tubería.

Las lengüetas utilizadas en los ensayos se muestran en la Figura 6. Detalle del área transversal de la probeta y las lengüetas instaladas., en total fueron 2 pares los utilizados debido a la necesidad de evitar que las capas se deslizaran una respecto a la otra.

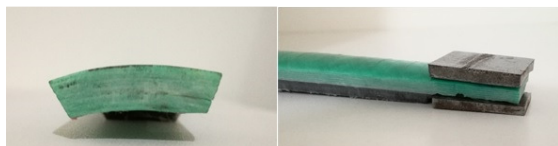


Figura 6. Detalle del área transversal de la probeta y las lengüetas instaladas.

IV. RESULTADOS

B. 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. En la Figura 7. Gráfica esfuerzo Vs Deformación Unitaria para ensayos de tracción. 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 no-lineal, este comportamiento es aceptado por la norma Figura 4.

En la Tabla 1 se presenta el resumen de los ensayos realizados. El módulo de elasticidad aparente se obtiene del valor de la pendiente de la sección lineal de cada curva.

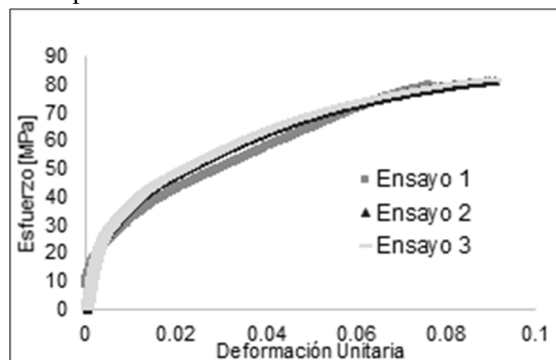


Figura 7. Gráfica esfuerzo Vs Deformación Unitaria para ensayos de tracción.

Ensayo	Área [mm ²]	Carga máxima [KN]	Resistencia a la tracción [MPa]	Máxima deform. axial [mm]	Módulo elástico aparente [MPa]
1	195	15.6	80.3	19.7	9136
2	190	15.3	80.5	23.72	11352
3	192	15.4	80.2	24.5	10935

Tabla 1. Resumen de resultados para ensayos estáticos

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 8 se pueden observar las probetas que fueron sometidas al ensayo de carga estática. El modo de fallo del material responde a la creación de una grieta interlamina que crece hasta abarcar el espesor de la lámina haciendo que la matriz se fracture y se separe de las fibras lo 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 8, da una idea muy clara de la validez de los resultados.



Figura 8. Probetas sometidas a carga estática.

C. 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.

Nivel de carga [%]	Fuerza Máxima [N]	Fuerza Mín [N]	Fuerza Media [N]	Amplitud [N]
90	13812	1381	7596	6215
80	12277	1227	6752	5525
70	10743	1071	5907	4836
60	9210	921	5065	4144
50	7700	770	4235	3465

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

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 calidad de ajuste de los datos con un grupo de distribuciones. Para este trabajo y siguiendo las directrices de ASTM se ajustaron a las distribuciones Log-Normal y Weibull, obteniendo niveles aceptables para cada una. En un nivel de carga se muestra el histograma obtenido en STATGRAPHICS®.

Se escoge la distribución Weibull por ser la de mayor ajuste al fenómeno. Se hace el cálculo de la mediana y se estipula como el valor de ciclos a la rotura para cada nivel de carga. Algunas probetas debieron descartarse debido a que no cumplían con las dimensiones de la norma.

Los resultados para las probetas ensayadas a los diferentes niveles de carga se presentan en la Tabla 3. La Figura 9. Histograma estadístico del 90% de cargamuestra el histograma con el ajuste de varias distribuciones, para un nivel de carga de 90% la que mejor se ajusta es Weibull.

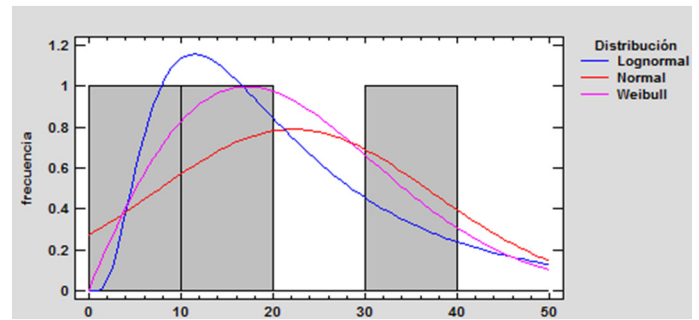


Figura 9. Histograma estadístico del 90% de carga

Es de remarcar que ninguna probeta ensayada se rompió al nivel de carga de 50% por lo que puede considerarse como vida infinita.

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.

Probeta	Área [mm ²]	Número de ciclos	Esfuerzo máximo [MPa]
90_1	228	9.5	60.58
90_3	252	18	54.81
90_4	220	39	62.78
80_1	216	104	56.84
80_2	299	283	41.06
80_3	209	203	58.75
70_1	240	317	44.76
70_2	220	124	48.83
70_3	238	275	45.14
70_4	216	296	49.74
60_1	240	2335	38.38
60_2	264	2406	34.89
60_3	252	1537	36.55
60_4	260	1075	35.42
50_1	225	1.2×10^6 (no falló)	34.11
50_2	230	1.03×10^6 (no falló)	33.37
50_3	219	1×10^6 (no falló)	35.05
50_4	240	1.13×10^6 (no falló)	31.98

Tabla 3. Resultados de los ensayos dinámicos.

Mediante un análisis estadístico, usando la mediana de la distribución de Weibull se encontró el número de ciclos y el

esfuerzo por cada nivel de carga, como lo muestra la Tabla 4. Resultados análisis estadístico

% de carga	Esfuerzo [MPa]	Número de ciclos
90	59.39	21
80	52.22	186
70	47.1	257
60	36.31	1860
50	33.63	No fallaron

Tabla 4. Resultados análisis estadístico

En la Figura 10. Probetas probadas al a) 90, b) 80, c) 70 y d) 60% del nivel de carga. 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 10. Probetas probadas al a) 90, b) 80, c) 70 y d) 60% del nivel de carga.

La Figura 11 muestra el aspecto de la rotura obtenida, donde se aprecia la delaminación del material.

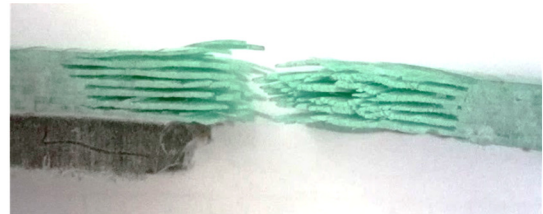


Figura 11. Detalle de la rotura obtenida en las probetas.

D. 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 ecuación $\log \sigma = \beta \log N + \alpha$.

En la Figura 12 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 línea de tendencia.

El valor del coeficiente de determinación $R^2 = 0.652$ 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:

$$S = -5.385\log(N) + 77.238 \quad (10)$$

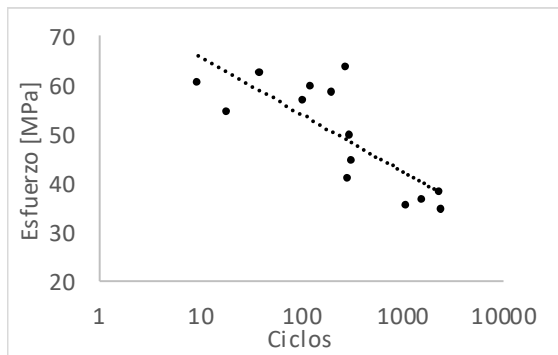


Figura 12. Gráfica S-N del material.

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 13 muestra la relación entre el esfuerzo y el logaritmo del número de ciclos planteada por Wöhler.

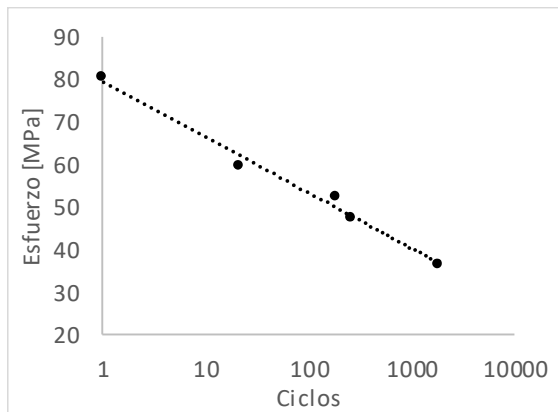


Figura 13. Gráfica S-N generalizada del material.

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:

$$S = -5.696\log(N) + 79.392 \quad (11)$$

En la Figura 14 se presenta la curva S-N que sigue el modelo presentado por Basquin con una curva de tendencia con un índice de regresión de $R^2 = 0.9856$, siendo estos resultados similares a los presentados en la Figura 13:

$$\log S = -0.1006\log(N) + 81.52 \quad (12)$$

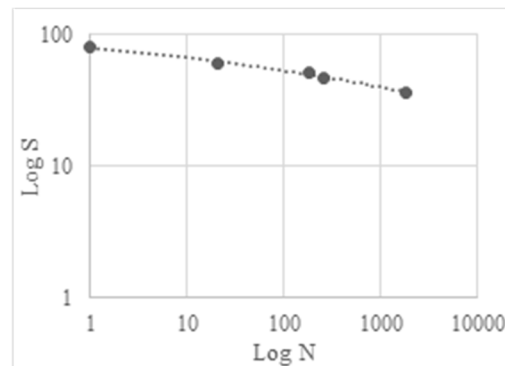


Figura 14. Gráfica S-N para el modelo de Basquin.

V. 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-ε 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 muy complejo sobre las fibras, en dirección a ellas y transversal a las mismas, 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 [26]. Debido al alcance del proyecto, no se tuvo en cuenta un análisis del comportamiento del material según esfuerzos circunferenciales.

En los ensayos dinámicos las probetas mostraron 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.

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.

VI. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo a través del proyecto Capital Semilla – 1742 de la UIS, y al Acuerdo de Cooperación Área Tecnológica Integridad de la Infraestructura, AC003. Convenio Marco de Cooperación Tecnológica y Científica 5222395 UIS-ICP.

VII. REFERENCIAS

- [1] D. Brondel, R. Edwards, A. Hayman, D. Hill, and T. Semerad, "Corrosion in the Oil Industry," *Oilf. Rev.*, vol. 6, no. 2, pp. 4–66, 1994.
- [2] E. Marsh, *Composites in Infrastructure - Building New Markets*, 1st ed. Oxford, UK: Elsevier, 2005.
- [3] A. Miravete, *Materiales compuestos I*, Primera ed. Barcelona: Editorial Reverté, 2012.
- [4] T. Walsh, "The Plastic Piping Industry in North America," in *Applied Plastics Engineering Handbook*, 1st ed., M. Kutz, Ed. Waltham: Elsevier, 2011, pp. 585–602.
- [5] R. Ansari, F. Alisafaei, and P. Ghaedi, "Dynamic analysis of multi-layered filament-wound composite pipes subjected to cyclic internal pressure and cyclic temperature," *Compos. Struct.*, vol. 92, no. 5, pp. 1100–1109, 2010, doi:10.1016/j.compstruct.2009.09.058.
- [6] J. Quigley, P., Nolet, S., & Williams, "Patent No. US 8,066,033 B2.," vol. 2, no. 60, p. 19, 2011.
- [7] S. Biswas, M. Babu, S. Baksi, and G. Srikanth, "Composites for Offshore Applications." India: Technology Information, Forecasting and Assessment Council (TIFAC), 2009.
- [8] D. Hull, "Research on composite materials at Liverpool University. I. Failure of filament wound tubes," *Phys. Technol.*, vol. 13, no. 5, 1982, doi:10.1088/0305-4624/13/5/I03.
- [9] L. A. Carlsson, D. F. Adams, and R. B. Pipes, "Basic Experimental Characterization of Polymer Matrix Composite Materials," *Polym. Rev.*, vol. 53, no. 2, pp. 277–302, 2013, doi:10.1080/15583724.2013.776588.
- [10] R. Rafiee, "Experimental and theoretical investigations on the failure of filament wound GRP pipes," *Compos. Part B Eng.*, vol. 45, no. 1, pp. 257–267, 2013, doi:10.1016/j.compositesb.2012.04.009.
- [11] E. S. Rodríguez, V. A. Alvarez, and P. E. Montemartini, "Failure analysis of a GFRP pipe for oil transport," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 28, pp. 16–24, 2013, doi:10.1016/j.engfailanal.2012.07.025.
- [12] L. A. Quintero Ortiz *et al.*, "Efecto en las propiedades mecánicas de daños superficiales generados en tubería compuesta flexible para transporte de hidrocarburos," *Rev. Ing.*, no. 42, pp. 39–48, 2015, doi:10.16924/riua.v0i42.756.
- [13] 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, doi:10.1016/B978-008044475-8/50004-4.
- [14] O. A. González-Estrada, J. Leal Enciso, and J. D. Reyes Herrera, "Análisis de integridad estructural de tuberías de material compuesto para el transporte de hidrocarburos por elementos finitos," *Rev. UIS Ing.*, vol. 15, no. 2, pp. 105–116, Jan. 2016, doi:10.18273/revuin.v15n2-2016009.
- [15] M. Xia, H. Takayanagi, and K. Kemmochi, "Analysis of multi-layered filament-wound composite pipes under internal pressure," *Compos. Struct.*, vol. 53, no. 4, pp. 483–491, 2001, doi:10.1016/S0263-8223(01)00061-7.
- [16] N. Tarakçioğlu, L. Gemi, and A. Yapici, "Fatigue failure behavior of glass/epoxy ± 55 filament wound pipes under internal pressure," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 65, no. 3–4, pp. 703–708, 2005, doi:10.1016/j.compscitech.2004.10.002.
- [17] L. Gemi, N. Tarakçioğlu, A. Akdemir, and Ö. S. Şahin, "Progressive fatigue failure behavior of glass/epoxy (± 75)₂ filament-wound pipes under pure internal pressure," *Mater. Des.*, vol. 30, no. 10, pp. 4293–4298, 2009, doi:10.1016/j.matdes.2009.04.025.
- [18] Ecopetrol S.A., "Transporte Información," 2014. .
- [19] A. Besednjak, *Materiales Compuestos: Proceso de Fabricación de Embarcaciones*. Barcelona: Edicions UPC, 2005.
- [20] E. Giner and J. Albelda, *Análisis y Diseño con Materiales Compuestos*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, Servicio de Publicaciones, 1998.
- [21] J. C. C. Halpin, "Effects of Environmental Factors on Composite Materials," *Tech. Rep. Afml-Tr-67-423*, p. Afml-Tr-67-423, 1969.
- [22] J. A. Mayugo Majó, "Estudio constitutivo de materiales compuestos laminados sometidos a cargas

- cíclicas,” Universitat Politècnica de Catalunya, 2003.
- [23] ASTM INTERNATIONAL, “D3039/D3039M: Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials,” *Annu. B. ASTM Stand.*, pp. 1–13, 2014, doi:10.1520/D3039.
- [24] ASTM INTERNATIONAL, “D3479/D3479M_12. Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite,” *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. i, no. Reapproved 2007, pp. 1–6, 2012, doi:10.1520/D3479.
- [25] ASTM INTERNATIONAL, “D4762_11a. Standard Guide for Testing Polymer Matrix Composite Materials 1,” *Annu. B. ASTM Stand.*, pp. 1–22, 2012, doi:10.1520/D4762-11A.2.
- [26] ASME, “B31.3 Process Piping,” vol. 76, no. 8, pp. 95–108, 2012.