

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO A LA FATIGA DE UN POLIÉSTER
REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO CON APLICACIÓN EN TUBERÍAS**

DUVÁN ANDRÉS CUARÁN MURIEL

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI
2013**

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO A LA FATIGA DE UN POLIÉSTER
REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO CON APLICACIÓN EN TUBERÍAS**

DUVÁN ANDRÉS CUARÁN MURIEL

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

SARA AIDA RODRÍGUEZ PULECIO

Ingeniera Mecánica, PhD.

Codirector

JOHN JAIRO CORONADO

Ingeniero Mecánico, PhD.

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI**

2013

Nota de aceptación:

Aprobado por el comité de grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad del Valle para optar el título de Ingeniero Mecánico.

Ing. José Jaime García, Ph.D.

Jurado

Ing. José Mina Hernández, Ph.D.

Jurado

Santiago de Cali, Octubre 25 de 2013

AGRADECIMIENTOS

Al Grupo de Investigación en Fatiga y Superficies (GIFS) de la Universidad del Valle y a los profesores Sara Rodríguez y John Jairo Coronado por sus aportes al proyecto desarrollado.

También quiero agradecer al profesor Arlex Leyton por su disposición y colaboración para llevar a cabo las pruebas experimentales.

Al personal del taller máquinas de la Universidad del Valle por la colaboración que prestaron en el manejo de máquinas y herramientas.

Muchas gracias.

CONTENIDO

	pág.
GLOSARIO	17
RESUMEN	19
INTRODUCCIÓN	20
1. OBJETIVOS	22
1.1 OBJETIVO GENERAL	22
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
2. MARCO TEÓRICO	23
2.1 MATERIALES COMPUESTOS	23
2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS	25
2.2.1 Clasificación según el tipo de matriz	25
2.2.2 Clasificación según el tipo de refuerzo	28
2.3 FIBRAS UTILIZADAS COMO REFUERZOS EN COMPUESTOS	30

2.3.1 Fibra de vidrio.....	30
2.3.2 Fibra de carbono	30
2.3.3 Fibra de aramida	31
2.4 ESTRUCTURAS SÁNDWICH	32
2.5 ORIGEN DE LAS CARGAS VARIABLES EN TUBERÍAS DE CARGA	38
2.6 FATIGA.....	39
2.6.1 Parámetros comunes en fatiga.....	40
2.6.2 Fatiga en materiales compuestos.....	42
2.6.3 Curva S-N.....	44
2.7 ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE	45
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	48
3.1 ESPÉCIMEN DE PRUEBA.....	48
3.2 MAQUINADO DE PROBETAS	49
3.3 ENSAYO DE TENSIÓN AXIAL.....	50
3.4 ENSAYO DE TENSIÓN CIRCUNFERENCIAL	51
3.5 ENSAYOS DE FATIGA AXIAL	54

3.6 ENSAYOS DE FATIGA CIRCUNFERENCIAL	55
3.7 TAMAÑO DE LA MUESTRA	56
3.8 ANÁLISIS DE SUPERFICIE DE FRACTURA.....	58
4. RESULTADOS.....	59
4.1 RESULTADOS DEL ENSAYO DE TENSIÓN AXIAL.....	59
4.2 RESULTADOS DEL ENSAYO DE TENSIÓN CIRCUNFERENCIAL.....	61
4.3 RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA FATIGA TENSIÓN-TENSIÓN	63
4.3.1 Resistencia a la fatiga axial	63
4.3.2 Resistencia a la fatiga circunferencial	69
4.4 ANÁLISIS DE FRACTOGRAFÍA.....	73
4.4.1 Inspección de superficies de fractura de probetas ensayadas a fatiga axial.....	73
4.4.2 Inspección de superficies de fractura de probetas ensayadas a fatiga circunferencial	77
4.5 COMPARACIÓN DE LA TUBERÍA GFRP CON UNA TUBERÍA DE ACERO	80
4.5.1 Resistencia a la tensión.....	80
4.5.2 Resistencia a la fatiga	81

5. CONCLUSIONES	86
6. RECOMENDACIONES	87
BIBLIOGRAFÍA	88

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Comparación de propiedades entre una matriz de poliéster y una matriz epoxi	27
Tabla 2. Propiedades de fibras utilizadas como refuerzos en matrices poliméricas	32
Tabla 3. Efecto del espesor del núcleo en la rigidez, resistencia a flexión y en el peso de la estructura	35
Tabla 4. Materiales más utilizados en la fabricación de pieles y núcleos	37
Tabla 5. Resultados estimados del ensayo de tensión axial.....	59
Tabla 6. Resultados de la media ($\bar{x}$), desviación estándar (s) y coeficiente de variación (CV) de los ensayos de tensión en dirección axial	59
Tabla 7. Resultados estimados de los ensayos de tensión circunferencial	61
Tabla 8. Resultados de la media ($\bar{x}$), desviación estándar (s) y coeficiente de variación (CV) de los ensayos de tensión en dirección circunferencial.....	61
Tabla 9. Resultados de los ensayos preliminares de fatiga axial en los tres niveles de esfuerzo	63

Tabla 10. Resultados del promedio ($\bar{x}$), desviación estándar (s) y el coeficiente de variación (CV) del log(N) de los ensayos preliminares de fatiga axial	63
Tabla 11. Resultados de los ensayos de fatiga axial en los diferentes niveles de esfuerzo	64
Tabla 12. Resultados del promedio ($\bar{x}$), desviación estándar (s), coeficiente de variación experimental (CV), intervalo de confianza (Iconf) y el porcentaje de error de los ensayos de fatiga axial.	65
Tabla 13. Resultados de los ensayos preliminares de fatiga circunferencial en los tres niveles de esfuerzo	69
Tabla 14. Resultados del promedio ($\bar{x}$), desviación estándar (s) y el coeficiente de variación (CV) del log(N) de los ensayos preliminares de fatiga circunferencial....	69
Tabla 15. Resultados de los ensayos de fatiga circunferencial en los diferentes niveles de esfuerzo	70
Tabla 16. Resultados del promedio ($\bar{x}$), desviación estándar (s), coeficiente de variación experimental (CV), intervalo de confianza (Iconf) y el porcentaje de error de los ensayos de fatiga circunferencial	71

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Esquema de una estructura tipo sándwich	32
Figura 2. Comparación de estructuras respecto a la rigidez a flexión.....	35
Figura 3. Esfuerzos variables en el tiempo. a) Esfuerzo totalmente alternante, b) esfuerzo repetido, c) esfuerzo fluctuante.	41
Figura 4. Mecanismos de daños en compuestos. a) Rotura de la fibra, b) despegue de la interfase, c) fisuración en el núcleo, d) delaminación.....	43
Figura 5. Las curvas S-N muestran la disminución de la resistencia (S), desde su valor estático (S_u) hasta el límite de fatiga (S_e).....	45
Figura 6. Composición de la tubería de GFRP	48
Figura 7. Dimensión en mm de probetas para pruebas de tensión y fatiga en dirección axial. a) Vista frontal, b) vista lateral izquierda	50
Figura 8. Máquina de ensayos estáticos y dinámicos HUNGTA, Laboratorio de ensayos dinámicos y materiales fibro-reforzados, Escuela de Ingeniería Mecánica, UNIVALLE	51
Figura 9. Dimensión en mm de probetas para pruebas de tensión circunferencial	52

Figura 10. Estructura en forma de aro para la realización de los ensayos de tensión y de fatiga circunferencial.....	53
Figura 11. Máquina Universal Dinámica de Ensayos alemana WPM, Laboratorio de Estructuras, Escuela de Ingeniería Civil, UNIVALLE	54
Figura 12. Anillo utilizado en fatiga axial. (a) Probeta ensayada a fatiga circunferencial, (b) dimensión en mm de la sección reducida.....	55
Figura 13. Fractura de una probeta ensayada en tensión axial	60
Figura 14. Fractura de una probeta ensayada a tensión circunferencial	62
Figura 15. Foto en estereoscopio de la superficie de fractura de una probeta sometida al 75% del esfuerzo último en fatiga axial	74
Figura 16. Foto en estereoscopio de la superficie de fractura de una probeta sometida al 65% del esfuerzo último en fatiga axial	75
Figura 17. Foto en estereoscopio de la superficie de fractura de una probeta sometida al 55% del esfuerzo último en fatiga axial	75
Figura 18. Fractura en interfase piel-núcleo de una probeta ensayada a 55% del S_{ut}	76
Figura 19. Interfase piel-núcleo de una probeta ensayada a 65% del S_{ut}	77
Figura 20. Fractura en interfase piel-núcleo de una probeta ensayada al 42% del S_{ut}	78

Figura 21. Rotura de fibras de una probeta ensayada al 42% del S_{ut}79

Figura 22. Fractura en el núcleo y despegue entre capas de una probeta ensayada al 42% del S_{ut}79

LISTA DE GRÁFICAS

pág.

Gráfica 1. Determinación del tamaño de la muestra para realizar la curva S-N ...57

Gráfica 2. Curva Log σ_a vs. Log N experimental de la dirección axial de la tubería GFRP con un nivel de confianza del 95% y un porcentaje de error del 5%.....67

Gráfica 3. Curva Log σ_a vs. Log N experimental de la dirección circunferencial de la tubería GFRP con un nivel de confianza del 95% y un porcentaje de error del 5%.....72

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Rango de esfuerzo	40
Ecuación 2. Esfuerzo alternante	40
Ecuación 3. Esfuerzo medio	40
Ecuación 4. Relación de esfuerzo.....	41
Ecuación 5.Esfuerzo último presente en la sección transversal de la probeta	60
Ecuación 6. Esfuerzo último presente en el anillo.....	62
Ecuación 7. Cálculo del porcentaje de error	66
Ecuación 8. Linealización de la Gráfica 2	68
Ecuación 9. Carga alternante axial presente sobre la sección transversal de la tubería Tipo I GFRP.....	68
Ecuación 10. Linealización de la Gráfica 3	73
Ecuación 11. Área de la sección transversal de una tubería	80
Ecuación 12. Límite de resistencia a la fatiga sin corregir	82

Ecuación 13. Resistencia a la fatiga corregida	82
Ecuación 14. Línea de Goodman modificada	83
Ecuación 15. Esfuerzo alternante y esfuerzo medio relacionados con el esfuerzo máximo	83
Ecuación 16. Esfuerzo máximo.....	84

GLOSARIO

ANISOTROPÍA: las propiedades del material varían con la orientación o la dirección de las coordenadas de referencia.

CARGA: fuerza aplicada a un material en un ensayo.

CONTENIDO DE FIBRA: porcentaje en volumen de fibra de un material compuesto.

CURVA S-N: representación de la relación de tensión de fatiga en función del número de ciclos de rotura.

DELAMINACIÓN: proceso de despegue provocado por tensiones interlaminares.

DESPEGUE: área de separación dentro o entre láminas de un laminado, o entre una unión por adhesivo causada por contaminación, adhesión no adecuada en el proceso, o daño provocado por tensiones interlaminares

EPOXY: resina termoestable realizada mediante la polimerización de un epóxido.

ESFUERZO ÚLTIMO: máximo esfuerzo que puede soportar un material.

FATIGA: proceso de cambio estructural permanente, progresivo y localizado que ocurre en un material sujeto a tensiones y deformaciones variables en algún punto o puntos y que produce grietas o la fractura completa tras un número suficiente de fluctuaciones.

FRECUENCIA: número de ciclos de fatiga por segundo, expresado en hertzios.

INTERFASE: contorno o zona de transición entre materiales constituyentes, tales como la interfase fibra/matriz, o el contorno entre láminas de un laminado.

LAMINADO: placa compuesta por láminas uni o multi-direccionales de uno o más materiales compuestos. Un laminado es normalmente delgado.

MATERIAL COMPUESTO: material realizado de dos o más materiales constituyentes.

PANEL SÁNDWICH: panel conformado por dos laminas delgadas adheridas a un alma gruesa, aligerada, conformada en algunos casos por un polímero.

POLIESTER: resina termoestable que se obtiene por condensación de poliácidos con polialcoholes o glicoles.

RESISTENCIA A LA FATIGA: máximo esfuerzo a fatiga que el material puede soportar sin apreciarse rotura para un dado número de ciclos.

SECUENCIA DE APILAMIENTO: orden de láminas en un laminado.

VIDA A LA FATIGA: número de ciclos permitidos a un determinado esfuerzo antes de que un material falle por fatiga.

RESUMEN

Las estructuras hidráulicas en hidroeléctricas experimentan diferentes estados de carga, que incluyen cargas de fatiga de diferentes amplitudes debido a los golpes de ariete. En este proyecto se determinó el comportamiento a la fatiga de una tubería de poliéster reforzada con fibra de vidrio (GFRP) sobre la dirección axial y la dirección circunferencial respecto a la orientación de la fibra, las cuales fueron comparados con un acero ASTM A36. Los especímenes de prueba se extrajeron de dos tubos fabricados de compuestos de resina de poliéster, arena y fibra de vidrio, una tubería Tipo I de referencia GRPDN 1100 PN 10 SN 02500 y una tubería Tipo II de referencia GRPDN 0300 PN 20 SN 02500. Los resultados mostraron que la tubería GFRP en su dirección axial es diez veces menos resistente que su dirección circunferencial, mientras que la tubería GFRP en su dirección circunferencial es tan resistente como un acero estructural ASTM A36 con un esfuerzo último de $392,23 \pm 21,44$ MPa. Se realizaron dos curvas esfuerzo-vida (S-N), una sobre la dirección axial y otra sobre dirección circunferencial de la tubería GFRP, con porcentajes de error inferiores al 5% y una confiabilidad del 95%. De las curvas S-N se estimó la resistencia a la fatiga para 10^6 ciclos, el valor correspondiente del esfuerzo alternante a este número de ciclos es de 6,82 MPa en la dirección axial y 19 MPa sobre la dirección circunferencial. Para una tubería de acero ASTM A36 en condiciones similares, la resistencia a la fatiga es seis veces mayor que la tubería GFRP en la dirección axial y tres veces mayor que la tubería GFRP en la dirección circunferencial.

Palabras clave: material compuesto, fatiga, golpe de ariete, curva S-N, resistencia a la fatiga, GFRP.

INTRODUCCIÓN

Tubos hechos de GFRP están siendo utilizados para tuberías de transporte de gas y de líquidos, remplazando las que comúnmente se construyen en acero [1]. Los materiales compuestos representan hoy un gran adelanto técnico, presentando propiedades importantes como buena relación resistencia-peso y alta resistencia a la corrosión [2].

Las infraestructuras hidráulicas de muchos países están incompletas y en otros están envejeciendo y millones de kilómetros de tubería para agua y alcantarillado necesitan ser rehabilitados o remplazados. Por ejemplo tuberías de GFRP fueron utilizadas para la rehabilitación de un amplio tramo del alcantarillado de Cali, es por su magnitud, el proyecto más grande en GFRP ejecutado en Colombia [3].

Por otro lado, en hidroeléctricas las estructuras hidráulicas están siendo remplazadas por tuberías GFRP la cual requiere de menor inversión que las tuberías de acero. Estas tuberías poseen beneficios en cuanto al mantenimiento debido a que no necesitan revestimientos, recubrimientos, protección catódica, envolturas u otra forma de protección contra la corrosión, además la superficie interior lisa disminuye la acumulación de lodos, lo cual reduce los costos de limpieza [4].

Tuberías de tales estructuras son comúnmente hechas de acero, ya que se experimentan cambios de presión interna en el tiempo debido a los golpes de ariete [5], por lo que se generan cargas de fatiga de amplitud constante y/o amplitud variable. Por lo tanto la seguridad de estas tuberías respecto a la resistencia a fatiga debe de ser considerada.

Actualmente EPSA necesita cambiar la tubería de acero de la hidroeléctrica de Nima. En consecuencia se necesita evaluar la posibilidad de reemplazar esta

tubería de acero por una tubería de GFRP. Este cambio de material de la tubería significa para EPSA un ahorro de \$3000 millones.

Sin embargo las propiedades que puede presentar un GFRP varían de acuerdo al porcentaje de fibra y al tipo de matriz. Por lo tanto no es tan amplia la información en la literatura sobre el comportamiento mecánico (en especial el comportamiento a la fatiga) en este tipo de compuestos. Además la literatura muestra una limitada información sobre el comportamiento a la fatiga de tubos GFRP, en especial en anillos de este material compuesto.

Este proyecto tiene como objetivo principal determinar el comportamiento a la fatiga de una tubería GFRP en su dirección axial y circunferencial. En la dirección circunferencial de la tubería se analizará el comportamiento a la fatiga usando anillos, mientras que para la dirección axial se analizará el comportamiento a la fatiga usando probetas con mancuerna. Además los resultados del comportamiento a la fatiga serán comparados con los de un acero ASTM A36.

En este documento se presentan los siguientes capítulos: en el capítulo uno se presentan los objetivos de la investigación, en el capítulo dos se mencionan una serie de definiciones que dan una comprensión de la investigación, en el capítulo tres se establecen los materiales y métodos utilizados para llevar a cabo los objetivos específicos, en el capítulo cuatro se discuten los resultados de las pruebas experimentales, en el capítulo cinco se establecen las conclusiones y por último en el capítulo seis se mencionan las recomendaciones.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar el comportamiento a la fatiga en tensión de un poliéster reforzado con fibra de vidrio a partir de probetas extraídas de un tubo GFRP en dirección axial y circunferencial respecto a la orientación de la fibra.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la resistencia a la tensión en la dirección axial y la dirección circunferencial de la tubería.
- Determinar el comportamiento a fatiga en un tubo GFRP en dirección axial mediante probetas con mancuerna, por medio de la construcción de la curva esfuerzo- vida.
- Determinar el comportamiento a fatiga de un tubo GFRP en dirección circunferencial mediante anillos con sección reducida, por medio de la construcción de la curva esfuerzo- vida.
- Identificar los mecanismos de falla por medio de la superficie de fractura de las probetas falladas en fatiga.
- Comparar los resultados obtenidos de resistencia a la tensión y fatiga con los de un acero ASTM A36 usado en tubería.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos surgen de la necesidad de obtener materiales con una combinación de propiedades que difícilmente se encuentran en los cerámicos, los plásticos o los metales [6].

La definición de material compuesto es un tema de discusión, por lo tanto no existe una sola definición aceptada sobre lo que es un material compuesto. La dificultad a la hora de definir este tipo de materiales, radica en las limitaciones de tamaño que se imponen a los componentes que forman el material, además de su origen, si es natural o fabricado por el hombre [7].

Un material compuesto puede definirse microestructuralmente como aquel que tiene dos o más constituyentes diferentes (estructuras moleculares o fases). Por el contrario, macroestructuralmente se define un material compuesto como un material constituido por la combinación de diferentes materiales, difiriendo en su composición o forma con el objetivo de obtener propiedades y características específicas [7].

La definición más aceptada en ingeniería, dice que “un material compuesto es un sistema material integrado por una combinación de dos o más micro a macroconstituyentes que difieren en forma y composición química, y que son esencialmente insolubles entre sí” [7]. Las propiedades del conjunto del material compuesto son mejores que las propiedades de sus constituyentes si estos actuaran por separado.

Las propiedades de un material compuesto dependen de los constituyentes, de la geometría y la distribución de fases. Los materiales compuestos, en comparación

con otros productos tradicionales, presentan ventajas por sus cualidades funcionales como:

- Alta resistencia-peso.
- Alta rigidez específica.
- Alta flexibilidad.
- Buena resistencia a la fatiga.
- Buena estabilidad dimensional.
- Alta resistencia a la corrosión.
- Buenos aislantes térmicos, fónicos y eléctricos.

Naturalmente, en un material compuesto no pueden ser mejoradas todas estas propiedades, sino que algunas son mejoras en detrimento de otras. Sin embargo todas las ventajas de un material compuesto enriquecen en gran manera las posibilidades de diseño y fabricación de un producto específicamente adaptado a las prestaciones solicitadas, además de optimizar la relación precio/prestación [6].

A pesar de las grandes ventajas que ofrece un material compuesto, las aplicaciones prácticas se ven reducidas por algunas limitaciones de estos materiales como pueden ser:

- No existe una tradición de diseño con estos materiales.
- Las herramientas de cálculo no son tan conocidas ni están ampliamente extendidas como para los metales.
- Falta información sobre su comportamiento.
- El costo de la materia prima y fabricación es elevado.
- En algunos casos, existen peligros para la salud en los procesos de fabricación.
- El peligro de fuego puede ser mayor en ciertos materiales.
- Los mecanismos de daño son complejos.

Una característica de todos los materiales compuestos es que, en cada uno de ellos, se pueden distinguir dos componentes bien diferenciados: la matriz y el refuerzo.

La matriz es la fase continua en la que el refuerzo queda “embebido”. Las funciones principales de la matriz son:

- Definir las propiedades físicas y químicas.
- Transmitir las cargas al refuerzo.
- Proteger del medio ambiente y brindarle cohesión al refuerzo.

Por otro lado las funciones del refuerzo son aportar resistencia mecánica, rigidez y dureza y va a ser determinante para obtener las principales propiedades mecánicas [8].

2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos se clasifican según el tipo de matriz o refuerzo.

2.2.1 Clasificación según el tipo de matriz

Tanto materiales metálicos, cerámicos o resinas orgánicas pueden cumplir con este papel. A excepción de los cerámicos, el material que se elige como matriz no es, en general, tan rígido ni tan resistente como el material de refuerzo [6].

➤ Matriz polimérica

Se caracteriza por su baja densidad, alta tenacidad, alta resistencia a la corrosión, baja resistencia mecánica, bajo costo, rapidez y sencillez de conformado [7].

Existen dos tipos de matrices poliméricas: termoestables y termoplásticas. Las termoestables se caracterizan por estar formadas por cadenas reticuladas que hacen que la estructura adquiera una disposición permanente, provocando que la reacción sea irreversible y el polímero no pueda reciclarse. Ejemplos de este tipo de polímeros son el poliéster, resinas epoxi, fenólicas, etc. [7].

Por otro lado, las termoplásticas están formadas por moléculas unidas por fuerzas débiles, lo que les confiere la propiedad de reblandecerse y poder ser moldeadas por la acción del calor, endureciéndose al enfriar, siendo todo ello reversible. Algunos ejemplos son el polipropileno, poliamida, polietileno, etc. [7]. Los tipos de matriz más utilizadas en materiales compuestos son:

Resina epoxi: empezaron a fabricarse en 1938 y constituyen el material de matriz más utilizado en los compuestos avanzados. Se basan en los llamados epóxidos (generalmente bisfenol A), que endurece por poliadición al reaccionar con endurecedores polifuncionales como aminas, fenoles, poliácidos. El tipo de epóxido y endurecedor influyen en las características finales del sistema de resina como, por ejemplo, la resistencia térmica, la ductilidad y el modo de endurecimiento [9].

Poseen las mejores características mecánicas y de mayor resistencia térmica. Su estabilidad dimensional es otro punto fuerte de estas resinas, que se traduce como ausencia de contracción durante el proceso de curado [9]. Como inconvenientes se puede citar su absorción de humedad, su elevado costo, y, debido a su gran viscosidad, dificultad de impregnación de los refuerzos [9].

Resina de poliéster: desde su descubrimiento en 1936 las resinas de poliéster han ido ganando terreno hasta ser en la actualidad el 75% de total de las resinas utilizadas en los materiales compuestos de matriz termoestable [9].

Se produce a partir de reacciones de policondensación entre dos monómeros, diol + ácido dicarboxílico. Las resinas de poliéster presentan una baja temperatura de

transición vítrea, y su resistencia y rigidez no son elevadas. El principal inconveniente se debe a que tiende a contraerse durante el endurecimiento (hasta un 7% en volumen), pero aun así se encuentra entre los sistemas de matriz más económicos [9].

La tabla 1 [10] muestra un comparativo entre las propiedades de una matriz de poliéster y una matriz epoxi, donde se observa que en un rango de valores de tensión de rotura y resistencia al impacto, la matriz epoxi supera a la matriz de poliéster.

Tabla 1. Comparación de propiedades entre una matriz de poliéster y una matriz epoxi

PROPIEDAD	POLIÉSTER	EPOXI
Tensión de rotura (MPa)	40-90	55-130
Módulo de elasticidad a tracción (GPa)	2,0-4,4	2,8-4,2
Límite elástico a flexión (MPa)	60-160	125
Resistencia al impacto (J/m) (ensayo de Izod de barra dentada)	10,6-21,2	5,3-53
Densidad (g/cm ³)	1,1-1,46	1,2-1,3

Fuente: GONZALES IGLESIAS, Javier. El efecto del tratamiento superficial de fibras de vidrio en la resistencia mecánica de materiales compuestos de matriz epoxídica. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2010. 125 p.

➤ **Matriz metálica**

Se caracteriza por dar una mayor capacidad resistente al material compuesto junto a una buena rigidez y tenacidad a la fractura, una anisotropía poco pronunciada y

un buen comportamiento a altas temperaturas, aunque hay que tener en cuenta la posible reactividad entre la matriz y el refuerzo. Este tipo de matrices están limitadas por su alta densidad y su dificultad de procesado y mecanizado [7].

➤ **Matriz cerámica**

Ofrece una gran resistencia a esfuerzos mecánicos y a altas temperaturas sin modificar su capacidad resistente. Por el contrario, su tenacidad es muy baja, al igual que sus conductividades térmica y eléctrica. Presentan altas resistencias a compresión, no así a tracción, por lo que lo más común es añadir fibras con alta resistencia a tracción. A veces, bajo niveles de carga tensionales capaces de romper la cerámica, se suelen utilizar refuerzos con un alto módulo de elasticidad, ya que la elongación de la matriz no es suficiente para transferir una significativa cantidad de carga al refuerzo [7].

2.2.2 Clasificación según el tipo de refuerzo

En materiales compuestos se consideran dos tipos de refuerzos: materiales compuestos con refuerzos discontinuos (partículas, plaquetas o fibras cortas) o con refuerzos continuos (fibras largas, tejidos o laminados) [7].

➤ **Materiales con refuerzos discontinuos**

Un material se considera una partícula o plaqueta, cuando todas sus dimensiones son iguales. Y se considera fibra discontinua o fibra corta cuando tienen una longitud mayor que su sección transversal. Sus características son las siguientes.

Partículas: el aumento de propiedades no es muy elevado, el comportamiento mecánico suele ser isótropo, son los materiales menos costosos y de más fácil fabricación de todos los materiales compuestos y en materiales cerámicos, pueden incrementar diferentes propiedades mediante varios mecanismos (dureza, tenacidad, resistencia mecánica) [7].

Plaquetas: el aumento de propiedades no es elevado, alcanzan una mejor compactación que las partículas y al ser aproximadamente bidimensional presentan igual resistencia en su plano [7].

Fibras cortas: la longitud de estas influye en las propiedades del material. Los materiales que poseen fibras tienen naturaleza anisótropa con excelentes propiedades en la dirección de las fibras [7].

➤ **Materiales con refuerzos continuos**

Un material se considera fibra continua o fibra larga cuando tienen una longitud mucho mayor que su sección transversal. Laminado, cuando están formados por dos o más láminas que tienen dos de sus dimensiones mayores que la tercera. Y tejido o estructuras sándwich, cuando la matriz forma un esqueleto que es relleno de un segundo material [7].

Uno de los tipos de laminado utilizado en la industria es:

Laminado G11: estratificado compuesto de láminas de tejido de vidrio impregnadas con resina epoxy prensadas bajo temperatura y alta presión. Presenta una excelente resistencia térmica y química así como también excelentes propiedades mecánicas operando a temperaturas hasta de 155°C. Puede ser utilizado como material de aislamiento eléctrico y térmico en diversos tipos de máquinas y equipos, especialmente en aquellas áreas donde se requiera

conseguir temperaturas de 155°C en funcionamiento continuo unido a elevados esfuerzos mecánicos [11].

2.3 FIBRAS UTILIZADAS COMO REFUERZOS EN COMPUESTOS

Los tipos de fibra más utilizados como refuerzo en materiales compuestos son la fibra de vidrio, carbono y aramida.

2.3.1 Fibra de vidrio

Es el refuerzo más utilizado actualmente en la fabricación de materiales compuestos, sobre todo en aplicaciones industriales. Esto se debe a su gran disponibilidad, sus buenas características mecánicas y su bajo costo [8].

Las principales propiedades de la fibra de vidrio son un buen aislamiento térmico, es inerte ante ácidos y soporta altas temperaturas. Su bajo costo combinado con estas propiedades le ha dado la popularidad en muchas aplicaciones industriales. Las características del material permiten que sea moldeable con mínimos recursos [9]. Una de las fibras de vidrio más utilizada es:

Fibra de vidrio E (Eléctrico): representa casi la totalidad del vidrio textil utilizado en materiales compuestos, más del 90% de los refuerzos, de uso general y tiene buenas propiedades eléctricas. La primera gran aplicación industrial de fibra de vidrio E fue el aislamiento de conductores eléctricos sometidos a altas temperaturas [8].

2.3.2 Fibra de carbono

Las fibras de carbono se caracterizan por ser las fibras con mejores propiedades mecánicas combinadas con una densidad baja. Además es un material anisótropo

que cuenta con una baja resistencia al impacto, gran estabilidad dimensional asociada a un coeficiente de dilatación muy bajo, conductividad térmica elevada y buena resistencia a la fatiga.

A partir de las temperaturas del tratamiento de calentamiento, se han identificado tres tipos diferentes de fibra de carbono:

- La fibra de carbono de alto módulo (HM) es la más rígida y requiere la mayor temperatura en el tratamiento.
- La fibra de carbono de alta resistencia (HR) es la más fuerte y se carboniza a la temperatura que proporciona la mayor resistencia a la tensión.
- La fibra de carbono (III) es la más barata; la rigidez es menor que en las anteriores pero la resistencia es buena. Este tipo tiene la temperatura más baja en el tratamiento [8].

2.3.3 Fibra de aramida

Las aramidas es un tipo de fibra orgánica muy resistente y de baja densidad, su ámbito de uso es en aplicaciones aeroespaciales a pesar de su costo elevado. Las aramidas tienen una alta resistencia al impacto y a la corrosión y son extremadamente resistentes al ataque químico exceptuando ácidos fuertes y bases a altas concentraciones [8].

La tabla 2 [10] muestra las propiedades de diferentes tipos de fibras donde se destaca la fibra de aramida respecto a la tensión de rotura.

Tabla 2. Propiedades de fibras utilizadas como refuerzos en matrices poliméricas

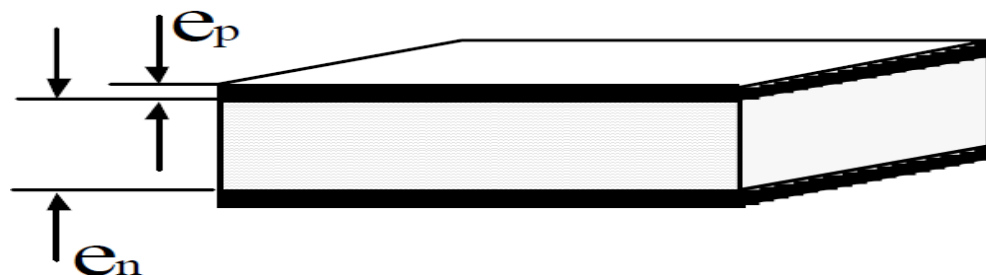
Propiedad	Vidrio E (HTS)	Carbono (HT)	Aramida (Kevlar 49)
Tensión de rotura (MPa)	2410	3100	3617
Módulo de tensión (GPa)	69	220	124
Alargamiento a la rotura (%)	3,5	1,4	2,5
Densidad (kg/m ³)	2,54	1,75	1,48

Fuente: GONZALES IGLESIAS, Javier. El efecto del tratamiento superficial de fibras de vidrio en la resistencia mecánica de materiales compuestos de matriz epoxídica. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2010. 125 p.

2.4 ESTRUCTURAS SÁNDWICH

Las primeras estructuras de materiales compuestos fueron tipo "sándwich", y se obtenían ensamblando por pegado (o soldadura) dos láminas delgadas y de alta resistencia, denominadas pieles, y una placa gruesa de material ligero, denominada núcleo, de bajas características mecánicas [12]. Esquemáticamente, se muestra la configuración de este tipo de materiales en la figura 1.

Figura 1. Esquema de una estructura tipo sándwich



Fuente: Introducción a la estructuras sándwich [en línea] [consultado 2 de Julio de 2013] Disponible en internet: <http://ocw.uc3m.es/mecanica-de-medios-continuos-y->

Los valores geométricos característicos, así como también el intervalo de su densidad, de este tipo de materiales son:

- $10 \leq e_n / e_p \leq 100$
- $0,25\text{mm} \leq e_p \leq 12,7\text{mm}$
- $20 \text{ kg /m}^3 \leq \gamma_n \leq 1000 \text{ kg /m}^3$
- $0,025\text{mm} \leq e_a \leq 0,2\text{mm}$

Dónde:

e_p = Espesor de la piel

e_n = Espesor del núcleo

e_a = Espesor del adhesivo

γ_n = Densidad del núcleo

Una estructura sándwich es una estructura constituida por dos pieles resistentes entre las que se interpone un material ligero y, por lo general, de baja densidad. Este núcleo, si bien aumentará el espesor y en mínima medida el peso de la nueva estructura comparada con una estructura simple, reportará grandes beneficios desde el punto de vista de la rigidez del conjunto [13].

Una estructura sándwich está compuesta por tres elementos fundamentales: Las pieles exteriores, el núcleo del sándwich y la interfase de unión entre el núcleo y las pieles, que generalmente es un adhesivo.

Cada uno de los elementos implicados cumple una función determinada. Las pieles exteriores son los elementos resistentes, generalmente realizadas con materiales de mejores propiedades que el resto; el núcleo, de material ligero, cuyas funciones principales son mantener separadas las pieles exteriores, brindar aislamiento y transmitir los esfuerzos cortantes de una cara a la opuesta; y por último la interfase, que tiene como función principal mantener unido el conjunto.

Si un panel sándwich es sometido a flexión, las pieles exteriores experimentarán esfuerzos normales con sentidos opuestos. Por ejemplo, si la piel superior está sometida a tracción, la piel inferior estará sometida a compresión [13].

El núcleo debe mantener la distancia relativa entre las pieles y la distancia entre las pieles y la línea neutra. Por lo tanto, el núcleo debe ser suficientemente resistente para poder soportar los esfuerzos de corte que se producen y evitar que se produzca un desplazamiento de las pieles en el sentido longitudinal. Debe también soportar los esfuerzos de compresión perpendicular a las pieles.

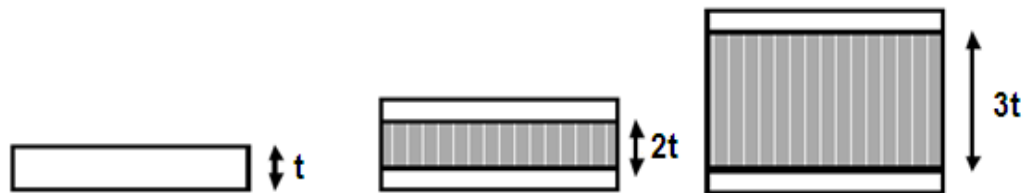
Las pieles deberán ser capaces de resistir el esfuerzo de flexión al cual están sometidas a través de los correspondientes esfuerzos de tracción y compresión. De modo que la nueva estructura sándwich, comparada con la estructura simple, será mucho más resistente con sólo un mínimo de aumento de peso.

Entre las características más favorables de estos materiales de cara a su aplicación, cabe citar las siguientes [12]:

- Posibilidad de obtener propiedades de aislamiento acústico y térmico.
- Bajo peso. Permite excelentes comportamientos en estructuras de placas reduciendo el peso de material debido a la introducción del núcleo.

- Rigidez a flexión. Para ilustrar este aspecto, en la tabla 3 se muestra una comparación entre la rigidez a flexión, resistencia y peso de varias configuraciones estructurales para una placa. En la figura 2 se muestra una primera placa que toma como referencia un valor unidad a las propiedades anteriormente enumeradas, correspondiente a una placa metálica de espesor t . En la segunda, las pieles son metálicas y el espesor del núcleo es $2t$. Lo mismo ocurre con la tercera configuración sólo que, ahora, el espesor es $3t$.

Figura 2. Comparación de estructuras respecto a la rigidez a flexión



Fuente: Introducción a las estructuras sándwich [en línea] [consultado el 2 de julio de 2013] Disponible en internet: <http://ocw.uc3m.es/mecanica-de-medios-continuos-y-teoria-de-estructuras/elasticidad-resistencia-de-materialesii/material-de-clase-1/materiales-compuestos/capitulo7.pdf>

Tabla 3. Efecto del espesor del núcleo en la rigidez, resistencia a flexión y en el peso de la estructura

Espesor núcleo	0	t	$3t$
Rigidez a flexión	1	7	37
Resistencia	1	3,5	9,25
Peso	1	1,03	1,06

Fuente: Introducción a las estructuras sándwich [en línea] [consultado el 2 de julio de 2013] Disponible en internet: <http://ocw.uc3m.es/mecanica-de-medios-continuos-y-teoria-de-estructuras/elasticidad-resistencia-de-materialesii/material-de-clase-1/materiales-compuestos/capitulo7.pdf>

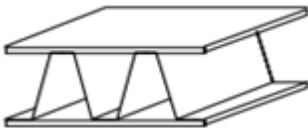
De la comparación entre los valores de la tabla anterior se desprende que, sin prácticamente aumento de peso, la rigidez a flexión se incrementa considerablemente en las soluciones segunda y tercera respecto de la primera, sucediendo lo mismo con la resistencia.

Las características menos favorables derivadas de la utilización de este tipo de materiales son [12]:

- Mala resistencia al fuego de determinados materiales que se utilizan como núcleo. Los riesgos de fuego son más elevados que cuando se utilizan materiales estructurales clásicos.
- Es sensible a cargas de impacto, se produce fallo del núcleo a compresión cuando los revestimientos son muy delgados.
- Baja hermeticidad frente al agua, lo que puede provocar la degradación del adhesivo y posteriormente del núcleo.

En la tabla 4 se mencionan los materiales más utilizados para pieles y para núcleos, así como sus disposiciones dentro del panel tipo sándwich:

Tabla 4. Materiales más utilizados en la fabricación de pieles y núcleos

	PIELES	NÚCLEOS
Expandido		
	Metales Laminados Contrachapados termoplásticos	Espuma de Poliuretano Espuma de Poliestireno*
Placa nervada		
	Amianto/Cemento Metales Laminados	Metal Material Compuesto
Nido de abeja		
	Contrachapados Laminados Aluminio	Madera Nido de abeja de cartón Nido de abeja de aluminio

*NOTA IMPORTANTE: Las resinas de poliésteres atacan a las espumas de poliestireno

Fuente: Introducción a las estructuras sándwich [en línea] [consultado el 2 de julio de 2013] Disponible en internet: <http://ocw.uc3m.es/mecanica-de-medios-continuos-y-teoria-de-estructuras/elasticidad-resistencia-de-materialesii/material-de-clase-1/materiales-compuestos/capitulo7.pdf>

Los dos tipos de tubos estudiados en este proyecto pueden ser considerados como un compuesto tipo sándwich expandido, como se muestra en la tabla 4. En estos tubos se diferencian el núcleo de las pieles, en este caso el núcleo está hecho de poliéster con partículas de sílice y las pieles son laminados de GFRP.

2.5 ORIGEN DE LAS CARGAS VARIABLES EN TUBERÍAS DE CARGA

Si el agua se mueve por una tubería con una velocidad determinada y mediante una válvula se le corta el paso totalmente, el agua más próxima a la válvula se detendrá bruscamente y será empujada por la que viene detrás. Como el agua tiene cierto grado de compresibilidad, empezará a comprimirse en las proximidades de la válvula, y el resto del líquido comprimirá al que le precede hasta que se anule su velocidad. Esta compresión se propaga hacia el origen conforme el agua comprime al límite la que le precede, de manera que al cabo de un cierto tiempo toda el agua de la tubería está en estas condiciones, concluyendo la primera etapa del golpe de ariete [14].

En definitiva, se forma una onda de máxima compresión que se inicia en las proximidades de la válvula y se traslada al origen. La energía cinética que lleva el agua se transforma en energía de compresión.

Cuando el agua se detiene, ha agotado su energía cinética y se inicia la descompresión en el origen de la conducción trasladándose hacia la válvula, y por la ley pendular esta descompresión no se detiene en el valor de equilibrio, sino que lo sobrepasa para repetir el ciclo. Esta descompresión supone una depresión, que retrocede hasta la válvula para volver a transformarse en compresión, repitiendo el ciclo y originando en el conducto unas variaciones ondulatorias de presión que constituyen el golpe de ariete [14].

En definitiva, se producen transformaciones sucesivas de energía cinética en energía de compresión y viceversa, comportándose el agua como un resorte. Este fenómeno se puede producir tanto en impulsiones como en abastecimientos por gravedad [14].

Por tanto las cargas variables dentro de la tubería de carga de una turbina hidroeléctrica se deben al fenómeno del golpe de ariete.

El valor de la sobrepresión debe tenerse en cuenta a la hora de dimensionar las tuberías, mientras que, en general, el peligro de rotura debido a la depresión no es importante, más aún si los diámetros son pequeños. No obstante, si el valor de la depresión iguala a la tensión de vapor del líquido se producirá cavitación, y al llegar la fase de sobrepresión estas cavidades de vapor se destruirán bruscamente. También puede darse el caso, no muy frecuente, de que el valor de la sobrepresión producida rebase a la de cálculo, con el consiguiente riesgo de rotura [14].

La celeridad es la velocidad de propagación de la onda de presión a través del agua contenida en la tubería. Su valor depende fundamentalmente de las características geométricas y mecánicas de la conducción, así como de la compresibilidad del agua [14].

Tuberías de GFRP tienen una celeridad de onda menor de la que se obtiene con tuberías de otros materiales, la cual redundará en una reducción de costos en los diseños para sobrecargas de presión por golpe de ariete [4].

2.6 FATIGA

El término de fatiga se define como: “El proceso progresivo localizado de daño estructural, que ocurre en un material sometido a condiciones que producen fluctuaciones de esfuerzos y deformaciones en algún punto o puntos que puede culminar en la aparición de grietas o en la fractura completa del material, después de un número suficiente de fluctuaciones” [15]. Cuando la amplitud de las fluctuaciones es constante en el tiempo se habla de fatiga de amplitud constante, si la amplitud de las fluctuaciones varía en el tiempo, se habla de fatiga de amplitud variable.

2.6.1 Parámetros comunes en fatiga

Los siguientes parámetros [16] se describen en la figura 3:

$\sigma_{\max}$: Esfuerzo máximo

$\sigma_{\min}$: Esfuerzo mínimo

σ_a : Esfuerzo alternante

σ_m : Esfuerzo medio

σ_r : Rango de esfuerzo

R: Relación de esfuerzo

Ecuación 1. Rango de esfuerzo

$$\sigma_r = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

Ecuación 2. Esfuerzo alternante

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

Ecuación 3. Esfuerzo medio

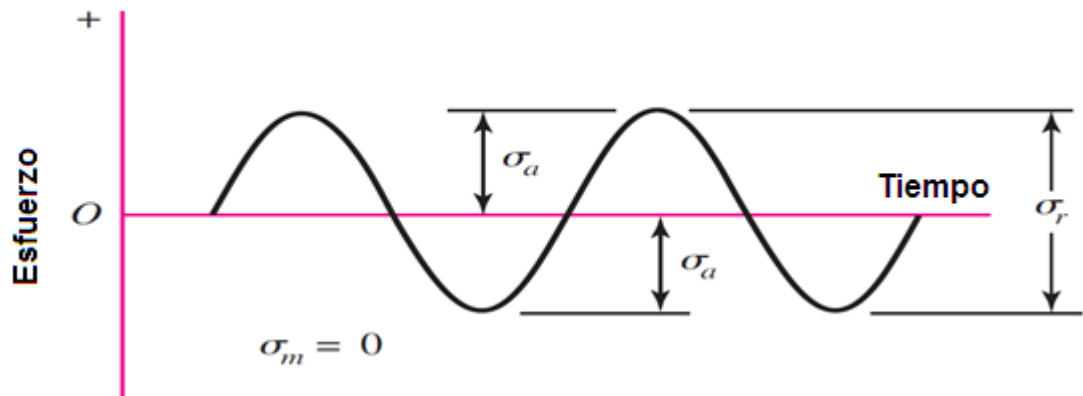
$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

Ecuación 4. Relación de esfuerzo

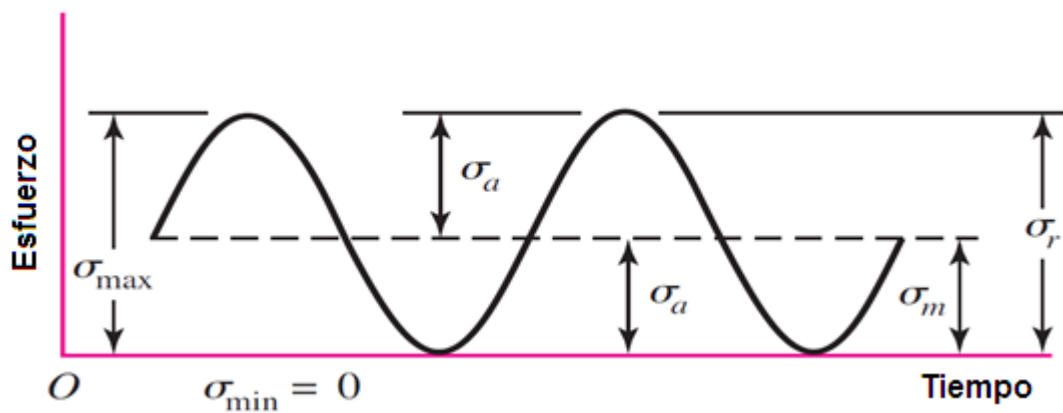
$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

Las funciones típicas de esfuerzo-tiempo experimentadas en fatiga se pueden modelar como se observa en la figura 3, mostradas de manera esquemática como ondas senoidales.

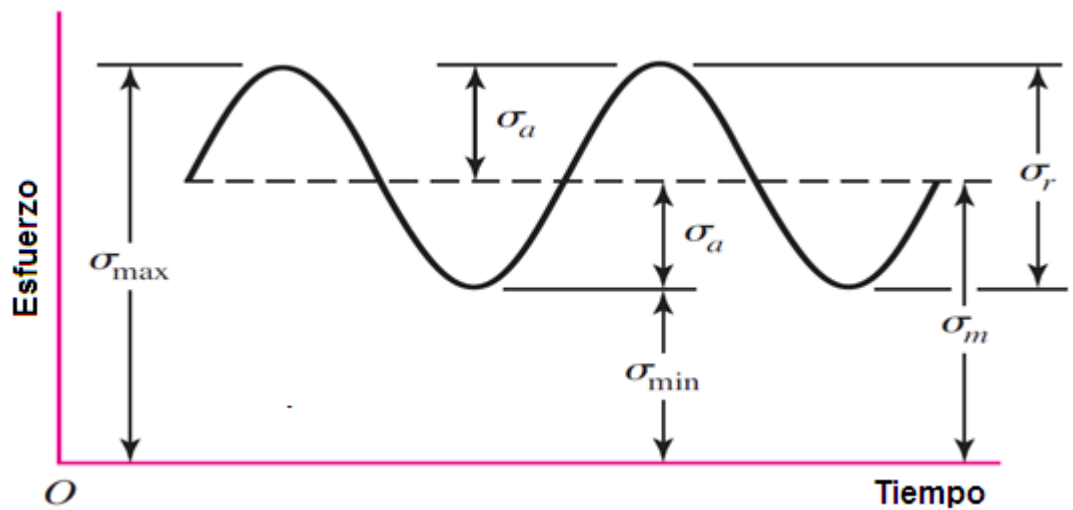
Figura 3. Esfuerzos variables en el tiempo. a) Esfuerzo totalmente alternante, b) esfuerzo repetido, c) esfuerzo fluctuante.



(a)



(b)



(c)

Fuente: BUDYNAS, Richard, et al. Fallas por fatiga resultantes de carga variable. En: Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. 8 ed. México D.F: McGraw-Hill Book Company, 2002. p. 260-348.

La figura 3a ilustra el caso de esfuerzo totalmente alternante, en el cual el valor del esfuerzo medio es igual a cero. La figura 3b muestra el esfuerzo repetido, en el cual la onda va desde cero hasta un máximo, con un valor igual al componente alternante, y la figura 3c muestra una versión más general (llamado esfuerzo fluctuante) en que todos los valores de los componentes son distintos de cero. Cualquiera de estas formas de onda se puede caracterizar mediante dos parámetros, sus componentes medio y alternante, sus valores máximo y mínimo o la relación entre estos valores.

2.6.2 Fatiga en materiales compuestos

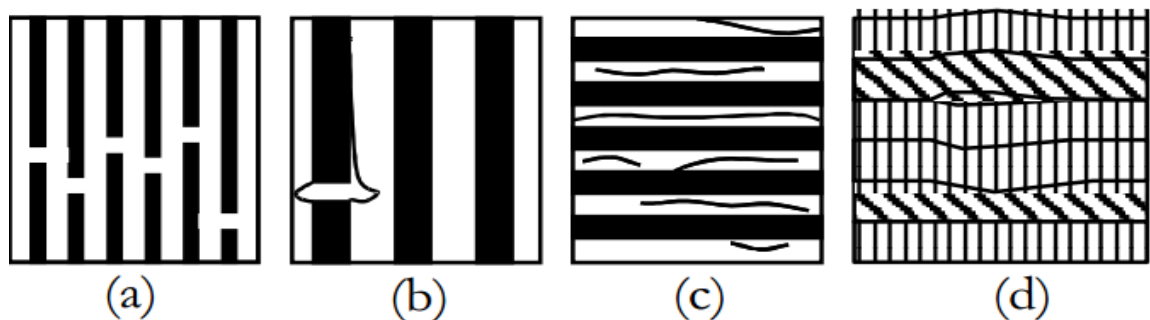
En la actualidad, el material mejor conocido, más ensayado y más fiable en cuanto a predicciones a fatiga es el acero. Sin embargo, el comportamiento a fatiga no es el mismo para todos los materiales. Para materiales compuestos se dispone de muy poca información sobre el comportamiento a la fatiga, por lo cual es un tema

de investigación actual.

Miravete y Stephen [17] mencionan que los materiales compuestos presentan mecanismos de rotura muy complejos bajo cargas estáticas y de fatiga debido a las características anisótropas. La rotura a fatiga está acompañada normalmente de daños considerables que se multiplican a lo largo del volumen de la probeta en lugar de una simple fisura predominante, caso observado frecuentemente en la mayoría de materiales isótropos frágiles.

Los cuatro mecanismos básicos de rotura son fisuración en la matriz, despegue entre capas (delaminación), rotura de la fibra y despegue de la interfase (ver figura 4). Cualquier combinación de estos modos puede ser la principal responsable del daño a fatiga, el cual implica una reducción en la resistencia y rigidez a fatiga. El tipo y grado de este daño varían considerablemente en función de las propiedades del material, composición del laminado, incluyendo la secuencia de apilamiento, tipo de carga a fatiga, etc. Se ha observado que la evolución del daño es similar para cargas de fatiga y estáticas, exceptuando que a fatiga a partir de un nivel dado de esfuerzos, se originan daños adicionales en función del número de ciclos [17].

Figura 4. Mecanismos de daños en compuestos. a) Rotura de la fibra, b) despegue de la interfase, c) fisuración en la matriz, d) delaminación



Fuente: Fatiga en materiales compuestos: comportamiento y mecanismos de degradación [en línea] [consultado el 6 de febrero de 2013] Disponible en internet: <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6860/02CAPITULO.pdf;jsessionid=1EFAC72E7D3AB84B77C76E665E4C1D1C.tdx2?sequence=3>

2.6.3 Curva S-N

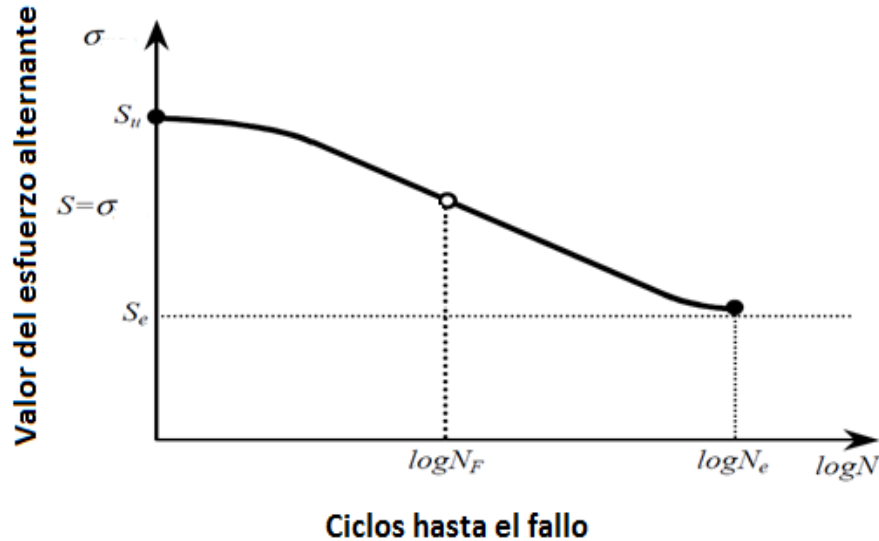
La curva esfuerzo-vida S-N se obtiene a través de una serie de ensayos donde probetas del material se someten a esfuerzos cíclicos con una amplitud máxima relativamente grande hasta rotura. Este procedimiento se repite en otras probetas a amplitudes máximas decrecientes, contando los ciclos en todos los casos.

Los resultados se disponen en un diagrama donde las coordenadas son el esfuerzo aplicado frente al número de ciclos registrados hasta la falla, que normalmente se representan en un plano semilogarítmico *esfuerzo-log(N)*.

La curva S-N esquemática de la figura 5 muestra las tres zonas principales que se representan en los aceros: una zona inicial donde la pendiente es relativamente suave, una zona central donde se incrementa la pendiente y una zona final donde la pendiente vuelve a suavizarse hasta estabilizar en un esfuerzo límite. Schijve [18] menciona que el límite de fatiga es de interés práctico para muchas estructuras que son sometidos a millones de ciclos de carga en servicio, por lo que las fallas por fatiga son inaceptables.

En materiales compuestos el número de ciclos para llegar a esta zona es tan elevado que prácticamente no se realiza experimentación en ella. Por lo tanto usualmente se ignora si existe un límite a la fatiga en compuestos [19].

Figura 5. Las curvas S-N muestran la disminución de la resistencia (S), desde su valor estático (S_u) hasta el límite de fatiga (S_e)



Fuente: Fatiga en materiales compuestos: comportamiento y mecanismos de degradación [en línea] [consultado el 6 de febrero de 2013] Disponible en internet: <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6860/02CAPITULO.pdf;jsessionid=1EFA72E7D3AB84B77C76E665E4C1D1C.tdx2?sequence=3>

2.7 ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

Polímeros reforzados con fibras han sido objeto de investigaciones analíticas y experimentales desde la década de los 50 en el contexto de las aplicaciones aeroespaciales, marinas y mecánicas [20]. Actualmente los materiales compuestos son objeto de estudio para su aplicación en reemplazo de otros materiales comúnmente utilizados. A continuación se presentan algunas investigaciones que se han realizado a materiales compuestos con el fin de determinar su comportamiento mecánico y darle validez a su aplicación:

Manjunatha *et al.* (2010). [2] Estudiaron el comportamiento a la fatiga en tensión de un polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP) bajo una relación de esfuerzo $R=0,1$. El estudio se realizó para un compuesto de matriz epoxi ordenada y modificada mediante la incorporación del 10wt% de nanopartículas de sílice. Los laminados compuestos GFRP fueron fabricados por infusión de resina bajo un utillaje flexible (RIFT). En el proceso, la mezcla de resina se introduce en una tela de vidrio y se pone arriba de 50 °C y -1 atm. Una vez que la infusión queda completa, el laminado se cura manteniendo el vacío durante todo el proceso. Se determinó que la resistencia a la fatiga del GFRP se incrementó alrededor de 3 a 4 veces debido a las nanopartículas de sílice, las cuales producen la reducción del agrietamiento de la matriz y una tasa reducida de propagación de grietas en la matriz.

Tarakcioglu *et al.* (2007). [1] Estudiaron el comportamiento a la fatiga de tubos hechos de material compuesto de matriz epoxi reforzados con 6 capas fibra de vidrio tipo E, bobinado a 55 grados, con una grieta superficial semielíptica. Los tubos de la prueba de fatiga poseen una muesca con relación de aspecto $a/c=0,2$ y una relación de muesca-espesor de $a/t= 0,25, 0,38$ y $0,50$ en su dirección axial. Las pruebas se realizaron bajo tres diferentes niveles de esfuerzo, que son 50%, 40% y 30% del S_{ut} , a una frecuencia de 25 ciclos por minuto y un relación de esfuerzo $R=0,05$. Se halló que la falla se produce en la región donde se realizó la grieta semielíptica. Además en la primera etapa de la propagación de la delaminación, el área de delaminación aumentó rápidamente y luego se desaceleró, además la vida a la fatiga máxima se obtuvo para una relación $a/t = 0,25$.

Kumagai *et al.* (2005). [21] Estudiaron el comportamiento a la fatiga en tensión en laminados tejidos de GFRP tipo G-11, con matriz epoxi a una temperatura de -196°C (temperatura del nitrógeno líquido) y a temperatura ambiente. Observaron en los diagramas S-N que al aumentar el esfuerzo disminuye la resistencia a la fatiga y encontraron un límite de fatiga a 10^6 ciclos (temperatura ambiente) de 100

MPa y a 10^5 ciclos (-196°C) de 200 MPa. Durante los ensayos de fatiga las probetas se mantienen sumergidas en helio líquido manteniendo una temperatura de -196°C . Por lo tanto las propiedades de fatiga no se afectan significativamente por el calentamiento interno de las probetas durante la prueba.

Kawaguchi *et al.* (2003). [5] Investigaron sobre la resistencia a los golpes de ariete de tres tipos de termoplásticos reforzados con fibra de vidrio corta. En este estudio varios tipos de muestras se prepararon para investigar el efecto del espesor y la forma en la resistencia a los golpes de ariete. Estas muestras fueron discos obtenidos a partir de moldeo por compresión o moldeo por inyección. En la investigación el éter de polifenileno (GFPEE) mostró poca resistencia a los golpes de ariete en comparación que el sulfuro de polifenileno (GFPPS) y polioximetileno (GBPOM). Se encontró que el aspecto de las superficies de fractura es atribuible a la rotura de las fibras de vidrio.

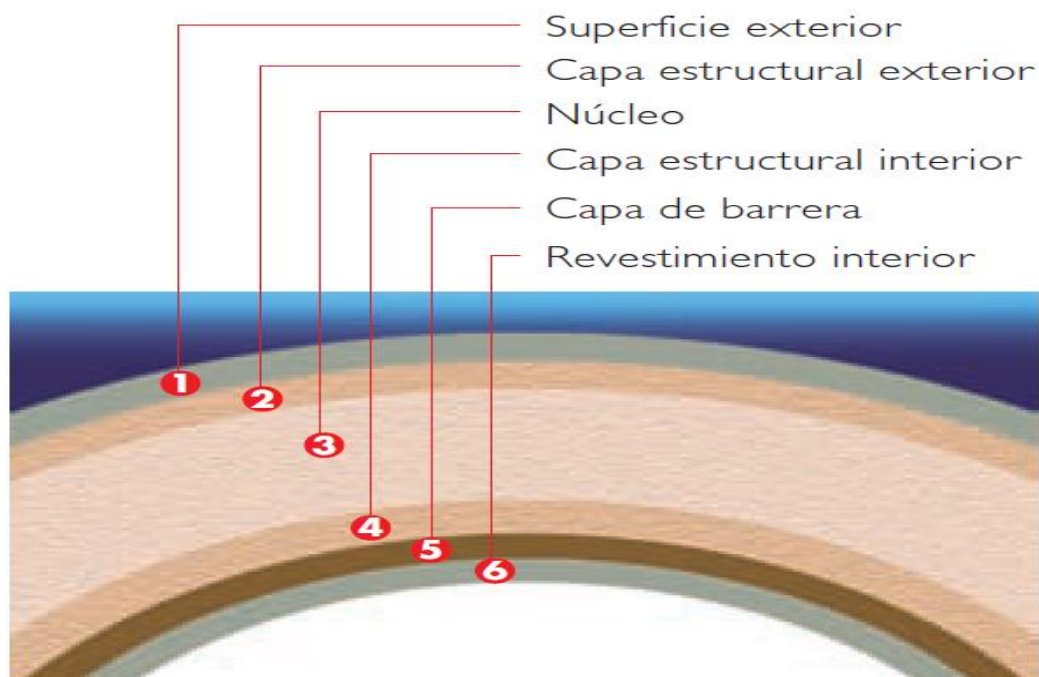
Demers (1998). [20] Investigó el comportamiento a la fatiga en tensión de un material compuesto de resina de éster de vinilo con refuerzo de vidrio- E, para valores de relación R de 0,05, 0,1, 0,5 y 0,9, y valores de frecuencia de 1,3 Hz y 5 Hz. Demers encontró que la resistencia a la fatiga depende de la combinación de varios parámetros como la frecuencia de la carga aplicada, la relación R, tipo de fibra, porcentaje de fibra y tipo de resina. Además halló que al aumentar la relación R, independientemente de la frecuencia de prueba, la resistencia a la fatiga incrementa, caso contrario a lo que sucede en los aceros. Además la frecuencia más alta que minimiza la generación de calor interna es de 5 Hz.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 ESPÉCIMEN DE PRUEBA

A partir de un tubo GFRP Tipo I (GRPDN 1100 PN 10 SN 02500) de 1,1 m de diámetro y espesor de 16 mm, con capacidad de presión nominal 1 MPa, se extrajeron probetas para la realización de pruebas experimentales de tensión y de fatiga sobre la dirección axial. Mientras que anillos de igual material se extrajeron de un tubo GFRP Tipo II (GRPDN 0300 PN 20 SN 02500) de 0,3 m de diámetro y espesor de 5 mm con capacidad de presión nominal de 2 MPa para la realización de pruebas de tensión y de fatiga sobre la dirección circunferencial. Los tubos son estructuras tipo sándwich compuestas de resina de poliéster, arena y fibra de vidrio como se observa en la figura 6.

Figura 6. Composición de la tubería de GFRP



Fuente: Tuberías de PRFV FLOWTITE [en línea]. España: AMITECH SPAIN [consultado el 5 de julio de 2013] Disponible en internet: http://www.amitechspain.es/documentos/downloads/Tuberia_PRFV_AMITECH_SPAIN.pdf

Las tuberías tienen incorporado los dos tipos de refuerzos de fibra de vidrio (hilos continuos y discontinuos) en la superficie exterior y en el revestimiento interior, para lograr mayor resistencia circunferencial y axial. La arena se utiliza para aumentar la rigidez del tubo y se aplica cerca al eje neutro. Se aplican resinas especiales en el revestimiento interno del tubo para aplicaciones altamente corrosivas mientras se emplea una resina menos costosa para la parte exterior y estructural del laminado [4]. De lo anterior se puede diferenciar las tres capas en la estructura de las tuberías.

- Capa interior fibra + resina
- Capa media resina + arena
- Capa superior fibra + resina

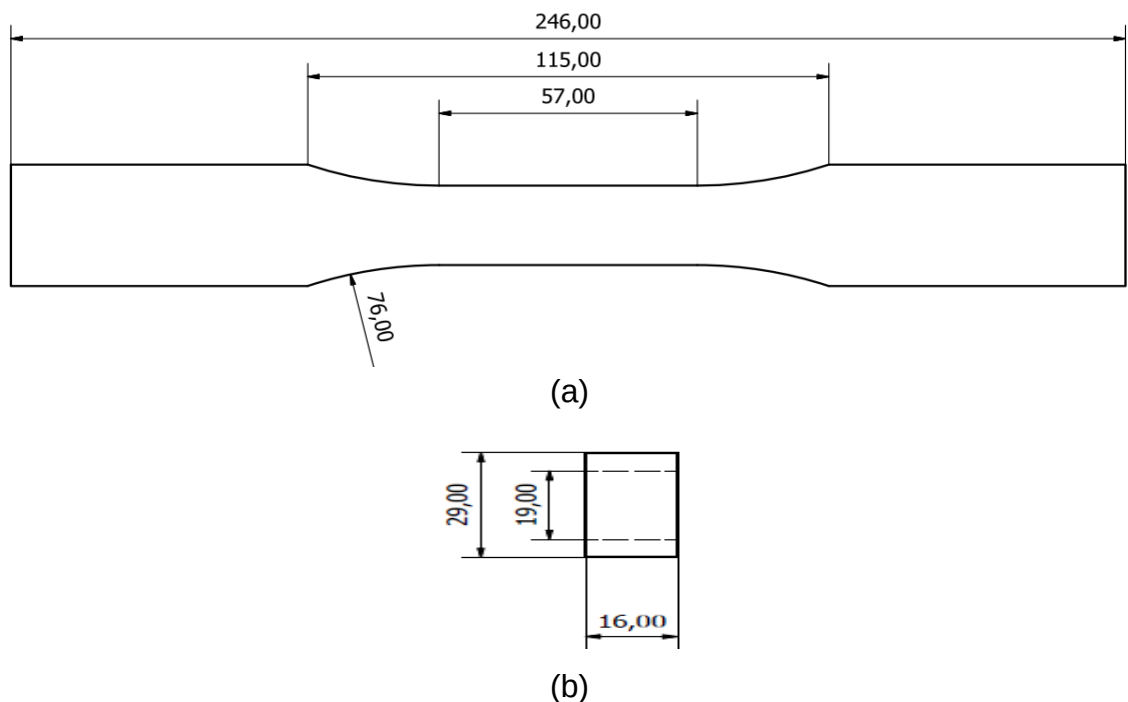
3.2 MAQUINADO DE PROBETAS

Las probetas ensayadas en la dirección axial de la tubería se maquinaron inicialmente mediante una pulidora. Los discos de corte utilizados son de material para corte de cerámica de 4 1/2 in. El contorno y el cuello de la probeta se realizaron en el centro de mecanizado mediante una fresa a la cual se le adaptó pastillas de carburo de tungsteno recubierto con titanio. Por otro lado, los anillos ensayados sobre la dirección circunferencial de la tubería se cortaron en el torno PINACHO y las muescas se realizaron en el centro de mecanizado ubicado en la Escuela de Ingeniería Mecánica en el edificio 345.

3.3 ENSAYO DE Tensión AXIAL

Para la realización de las pruebas de tensión axial se usó la norma ASTM D 3517 [22]. De esta norma se extrajo la ASTM D 638 [23], de la cual se dedujo que se requerían ensayar 5 probetas en tensión axial a una velocidad de 1 mm/min. La geometría de las probetas se muestra en la figura 7.

Figura 7. Dimensión en mm de probetas para pruebas de tensión y fatiga en dirección axial. a) Vista frontal, b) vista lateral izquierda



Esta prueba sobre la dirección axial se realizó para determinar la resistencia última de tensión (S_{ut}). Las pruebas de tensión axial se realizaron en la máquina de ensayos estáticos y dinámicos HUNGTA, la cual tiene una capacidad de carga de 25 KN (ver figura 8)

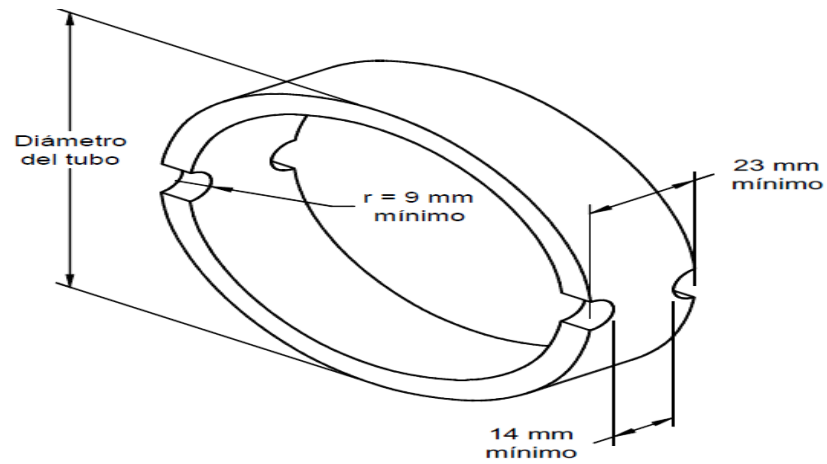
Figura 8. Máquina de ensayos estáticos y dinámicos HUNGTA, Laboratorio de ensayos dinámicos y materiales fibro-reforzados, Escuela de Ingeniería Mecánica, UNIVALLE



3.4 ENSAYO DE TENSIÓN CIRCUNFERENCIAL

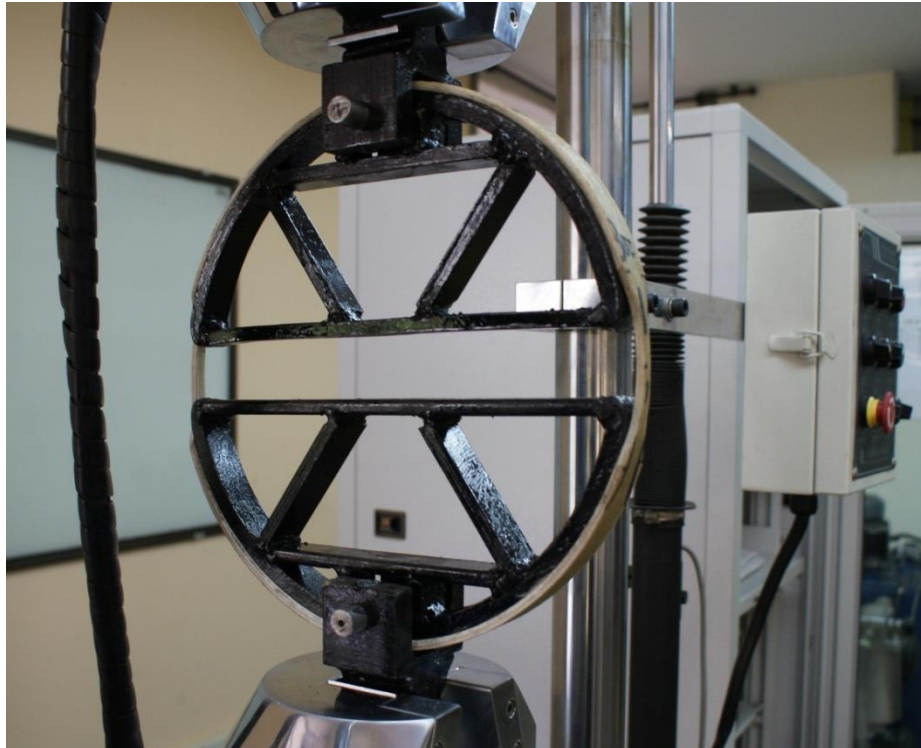
Para la realización de la prueba de tensión circunferencial se usó la ASTM D 2290 [24]. La norma indicó que se ensayaran 5 probetas a una velocidad constante de 5mm/min. La geometría de las probetas se muestra en la figura 9.

Figura 9. Dimensión en mm de probetas para pruebas de tensión circunferencial



Para la realización de esta prueba la norma indica que el ensayo sea acompañado de una estructura la cual se adapta a la probeta de ensayo. Por lo tanto se mecanizó una estructura en forma de aro con refuerzos internos (ver figura 10), para permitir que el esfuerzo se concentrara en las muescas y no en los puntos de sujeción de la probeta, de esta manera el anillo se deforma sobre el aro.

Figura 10. Estructura en forma de aro para la realización de los ensayos de tensión y de fatiga circunferencial



Debido a que la resistencia última de tensión circunferencial superó la capacidad de los 25 kN de máquina HUNGTA, se procedió a realizar los ensayos de tensión en la máquina universal dinámica de ensayos alemana WPM (ver figura 11), la cual tiene una capacidad de carga de 100 kN.

Figura 11. Máquina Universal Dinámica de Ensayos alemana WPM, Laboratorio de Estructuras, Escuela de Ingeniería Civil, UNIVALLE



3.5 ENSAYOS DE FATIGA AXIAL

Con los resultados de la resistencia última en tensión se obtienen los niveles de esfuerzo para realizar las pruebas de fatiga. La norma ASTM D3479 [25] indica que se deben establecer tres niveles de esfuerzo respecto al esfuerzo último para realizar la curva S-N. Los tres niveles de esfuerzo establecidos para la prueba fueron del 75%, 65% y 55% del esfuerzo último. La norma establece que para pruebas de investigación y desarrollo de componentes y estructuras se deben ensayar como mínimo doce probetas.

La geometría de las probetas que se utilizaron en fatiga axial fue igual a la que se utilizó en los ensayos de tensión axial (ver figura 7). Estas pruebas de fatiga se realizaron en la máquina de ensayos estáticos y dinámicos HUGNTA como se muestra en la figura 8.

Las pruebas se realizaron bajo una carga sinusoidal con una relación de esfuerzos $R=0,1$, a una frecuencia de 3 Hz. A partir de los resultados de las pruebas de

fatiga axial se construyó la curva S-N, la cual se realizó garantizando un porcentaje de error inferior al 5% y una confiabilidad del 95%.

3.6 ENSAYOS DE FATIGA CIRCUNFERENCIAL

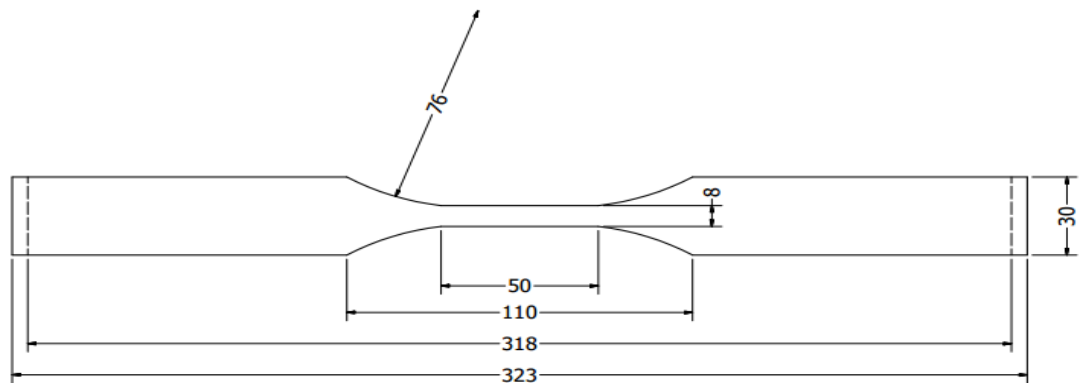
Los ensayos de fatiga en dirección circunferencial se realizaron usando probetas de anillos con mancuerna no normalizadas como la representada en la figura 12, extraídas de los tubos Tipo II. Ésta figura muestra la forma de los anillos utilizados en fatiga, el cual se les maquinó una sección reducida en lugar de una muesca. La geometría de ésta probeta se realizó teniendo en cuenta la relación de aspecto de las probetas ensayadas en fatiga axial respecto al ancho y la longitud de la sección reducida. En la prueba se establecieron tres niveles de esfuerzo correspondientes a 50%, 42% y 34% del esfuerzo último, para estimar la curva S-N, la cual se realizó garantizando un porcentaje de error inferior al 5% y una confiabilidad del 95% en las mediciones.

Las pruebas se realizaron en la máquina para ensayos estáticos y dinámicos HUNG TA (ver figura 8) a una frecuencia de 3 Hz, con una relación de esfuerzos $R=0,1$ y con variación de carga sinusoidal.

Figura 12. Anillo utilizado en fatiga axial. (a) Probeta ensayada a fatiga circunferencial, (b) dimensión en mm de la sección reducida



(a)
55



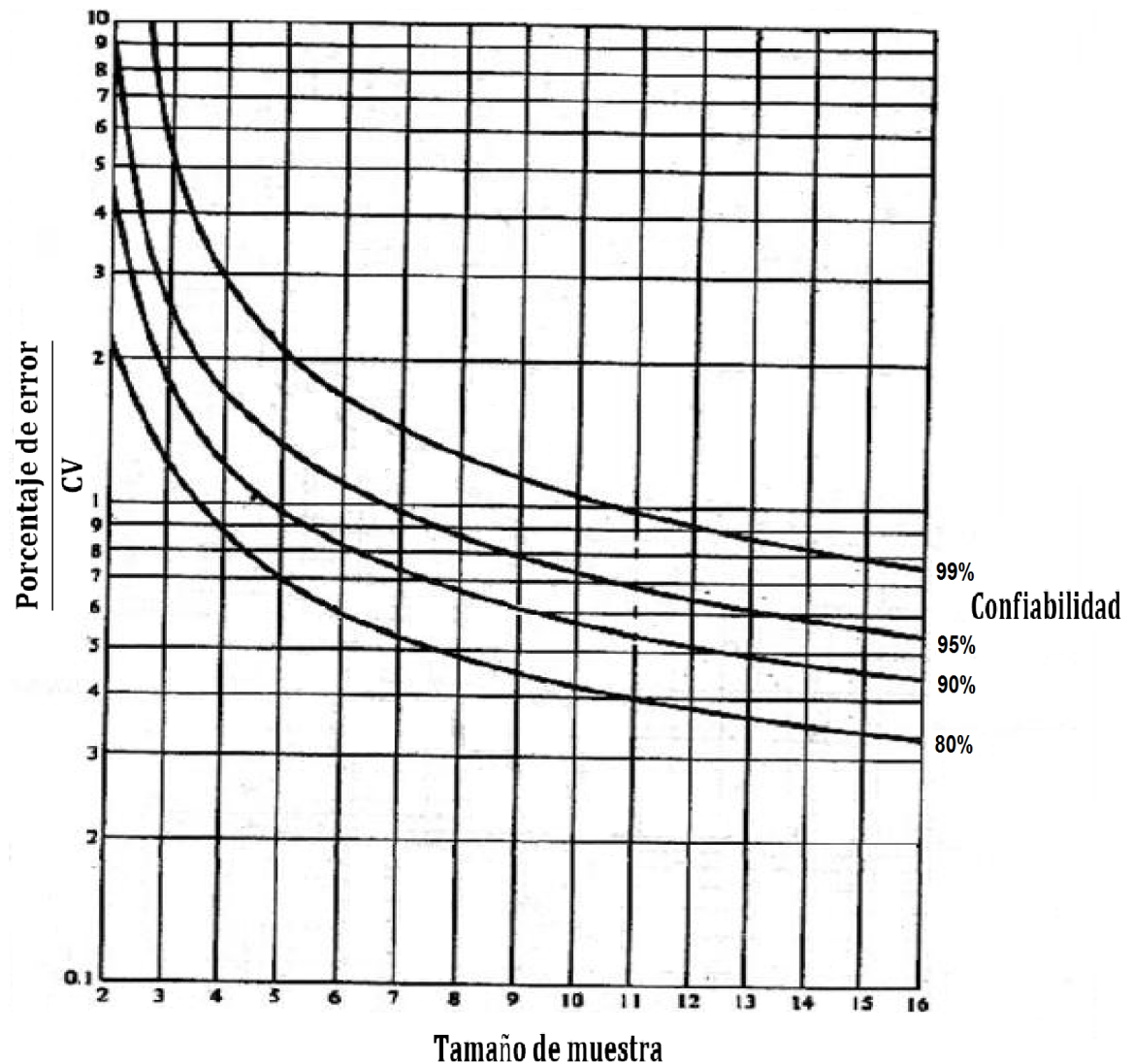
(b)

3.7 TAMAÑO DE LA MUESTRA

El número de probetas utilizadas en los ensayos de fatiga se justificó estadísticamente mediante el porcentaje de error y el nivel de confiabilidad para realizar las curvas S-N en escala logarítmica, el cual reduce la distribución a una distribución normal [26].

Por cada nivel de esfuerzo se realizaron tres ensayos preliminares para determinar el promedio y la desviación estándar del logaritmo en base diez del número de ciclos. A partir de estos resultados se calculó el coeficiente de variación (CV) porcentual el cual es la relación entre la desviación estándar y el promedio. Hallado el CV y teniendo en cuenta el porcentaje de error (5%) y la confiabilidad (95%) se determinó el número de probetas que se utilizó por cada nivel de esfuerzo mediante la gráfica 1.

Gráfica 1. Determinación del tamaño de la muestra para realizar la curva S-N



Fuente: LIPSON, Charles y SHETH, Narendra J. Fatigue Experiments. En: Statistical Design and Analysis of Engineering Experiments. Estados Unidos: McGraw-Hill, 1973. p. 262-310.

En esta Gráfica sobre el eje vertical se encuentra la relación entre el porcentaje de error y el CV, el cual se proyecta sobre la curva de confiabilidad para determinar el tamaño de la muestra ubicada en el eje horizontal. Ensayadas las probetas

indicadas en la gráfica 1, se debe obtener un CV inferior al determinado en la prueba preliminar y un porcentaje de error inferior al 5%. De lo contrario debe de realizarse una corrección equivalente a la relación entre el porcentaje de error y el valor de CV hallado en el nivel de esfuerzo dado para determinar el número de probetas adicionales a ensayar.

3.8 ANÁLISIS DE SUPERFICIE DE FRACTURA

El análisis de las superficies de fractura se realizó a través de un estereoscopio, ubicado en la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del valle, con el fin de determinar los mecanismos de falla del material tanto en la dirección axial como en la dirección circunferencial de la tubería

Para realizar el análisis de superficie de fractura en fatiga axial se seleccionaron probetas ensayadas al 75%, 65% y 55% del esfuerzo último, mientras que para fatiga circunferencial se seleccionó la probeta número 3 ensayada al 42% del esfuerzo último para identificar los mecanismos de falla.

4. RESULTADOS

4.1 RESULTADOS DEL ENSAYO DE TENSIÓN AXIAL

El número total de probetas analizadas en el ensayo de tensión axial fueron cinco (5). Los resultados obtenidos del ensayo se presentan en la tabla 5 y la tabla 6 como se muestra a continuación.

Tabla 5. Resultados estimados del ensayo de tensión axial

Probeta	Carga (N)	Área (mm ²)	S _{ut} (MPa)
1	11256,98	294,40	38,24
2	10361,81	286,40	36,18
3	10570,28	268,80	39,32
4	11318,29	283,20	39,97
5	11391,86	320,00	35,60

Tabla 6. Resultados de la media ($\bar{x}$), desviación estándar (s) y coeficiente de variación (CV) de los ensayos de tensión en dirección axial

Promedio $\bar{x}$ (MPa)	37,86
s (MPa)	1,91
CV (%)	5,06

En la tabla 6 se presentan los resultados de esfuerzo de fractura promedio de los ensayos de tensión en la dirección axial. Como puede apreciarse hay poca dispersión

El esfuerzo último de cada ensayo se determina a través de la siguiente expresión:

Ecuación 5. Esfuerzo último presente en la sección transversal de la probeta

$$S_{ut} = \frac{F_{max}}{A}$$

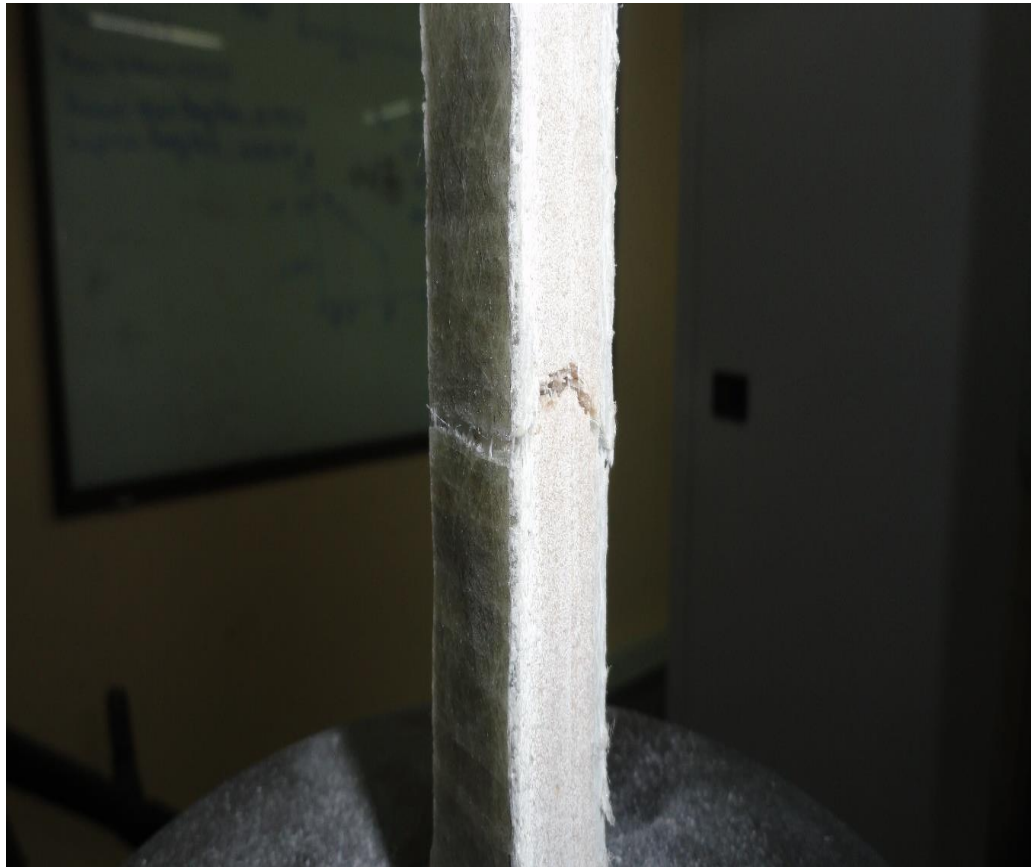
Dónde: S_{ut} = Esfuerzo último

F_{max} = Fuerza máxima soportada por la probeta

A = Área de la sección transversal

Las probetas ensayadas a tensión axial no presentaron una deformación plástica visible. En la figura 13 se observa una probeta ensayada a tensión la cual muestra la zona de fractura.

Figura 13. Fractura de una probeta ensayada en tensión axial



4.2 RESULTADOS DEL ENSAYO DE TENSION CIRCUNFERENCIAL

El número total de probetas analizadas en el ensayo de tensión circunferencial fueron cinco (5). Los valores obtenidos del ensayo se presentan en la tabla 7 y la tabla 8 como se muestra a continuación.

Tabla 7. Resultados estimados de los ensayos de tensión circunferencial

Probeta	Carga(N)	Área(mm ²)	S _{ut} (MPa)
6	33844,5	80	423,06
7	29430	79,5	370,19
8	31882,5	82	388,81
9	30901,5	80	386,27
10	31392	79,9	392,84

Tabla 8. Resultados de la media ($\bar{x}$), desviación estándar (s) y coeficiente de variación (CV) de los ensayos de tensión en dirección circunferencial

Promedio $\bar{x}$ (MPa)	392,23
s (MPa)	19,26
CV (%)	4,91

Según los resultados de la resistencia a la tensión, la dirección axial de la tubería es diez veces menos resistente que la dirección circunferencial.

En todos los casos las probetas fracturaron en una sola muesca como se muestra en la figura 14.

Figura 14. Fractura de una probeta ensayada a tensión circunferencial



El esfuerzo de fractura se obtuvo como la razón entre la carga de fractura y dos veces el área de la sección transversal mínima como lo indica la norma ASTM 2290. El esfuerzo último se determina a partir de la siguiente expresión:

Ecuación 6. Esfuerzo último presente en el anillo

$$S_{ut} = \frac{F_{max}}{2A_m}$$

Dónde: S_{ut} = Esfuerzo último

F_{max} = Fuerza máxima soportada por la probeta

A_m = Área de la sección transversal mínima de las dos mediciones

4.3 RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA FATIGA TENSIÓN-TENSIÓN

4.3.1 Resistencia a la fatiga axial

Debido a que no se encontró en la literatura valores del coeficiente de variación (CV) estándar para la realización de curvas S-N de materiales compuestos, se procedió a realizar tres ensayos preliminares por cada nivel de esfuerzo (ver tabla 9) para determinar el promedio ($\bar{x}$), la desviación estándar (s) y el CV respecto al logaritmo en base diez del número de ciclos reportados en la tabla 10.

Tabla 9. Resultados de los ensayos preliminares de fatiga axial en los tres niveles de esfuerzo

Porcentaje de esfuerzo aplicado (% S_{ut})	# de Probeta	Esfuerzo aplicado σ (MPa)	Esfuerzo alternante σ_a (MPa)	Ciclos de falla N	LOG(N)	LOG(σ_a)
75%	16	28,40	12,78	848	2,93	1,11
	29	28,40	12,78	715	2,85	1,11
	30	28,40	12,78	1867	3,27	1,11
65%	1	24,61	11,07	3051	3,48	1,04
	5	24,61	11,07	6215	3,79	1,04
	6	24,61	11,07	6047	3,78	1,04
55%	17	20,82	9,37	43011	4,63	0,97
	18	20,82	9,37	46216	4,66	0,97
	20	20,82	9,37	14354	4,16	0,97

Tabla 10. Resultados del promedio ($\bar{x}$), desviación estándar (s) y el coeficiente de variación (CV) del log(N) de los ensayos preliminares de fatiga axial

NIVEL DE ESFUERZO								
0,75 S_{ut} = 28,40 MPa			0,65 S_{ut} = 24,61 MPa			0,55 S_{ut} = 20,82 MPa		
$\bar{x}$	s	C.V (%)	$\bar{x}$	s	C.V (%)	$\bar{x}$	s	C.V (%)
3,02	0,22	7,37	3,69	0,18	4,75	4,49	0,28	6,35

A partir de los CV de cada nivel de esfuerzo, el porcentaje de confiabilidad (95%) y el porcentaje de error (5%), se procedió a determinar el número de muestras a ensayar por medio de la gráfica 1, dando como resultado un número mínimo de probetas de 11, 7 y 9 para 75%, 65% y 55% del esfuerzo último respectivamente.

Dado el número mínimo de probetas se procedió a realizar los ensayos de fatiga axial. Los resultados de los ensayos de fatiga axial se registran en la tabla 11. Con los resultados de estos ensayos se calculó de nuevo el promedio ($\bar{x}$), la desviación estándar (s), coeficiente de variación experimental (CV) y adicionalmente el intervalo de confianza (Iconf) y el porcentaje de error por cada nivel de esfuerzo respecto al logaritmo en base diez del número de ciclos, registrados en la tabla 12.

Tabla 11. Resultados de los ensayos de fatiga axial en los diferentes niveles de esfuerzo

Porcentaje de esfuerzo aplicado (% S_{ut})	# de Probeta	Esfuerzo aplicado σ (MPa)	Esfuerzo alternante σ_a (MPa)	Ciclos de falla N	Log(N)	Log(σ_a)
75%	16	28,40	12,78	848	2,93	1,11
	29	28,40	12,78	715	2,85	1,11
	30	28,40	12,78	1867	3,27	1,11
	31	28,40	12,78	677	2,83	1,11
	32	28,40	12,78	415	2,62	1,11
	33	28,40	12,78	478	2,68	1,11
	34	28,40	12,78	409	2,61	1,11
	35	28,40	12,78	473	2,67	1,11
	36	28,40	12,78	576	2,76	1,11
	37	28,40	12,78	716	2,85	1,11
	38	28,40	12,78	792	2,90	1,11
65%	1	24,61	11,07	3051	3,48	1,04
	5	24,61	11,07	6215	3,79	1,04
	6	24,61	11,07	6047	3,78	1,04
	11	24,61	11,07	3794	3,58	1,04
	8	24,61	11,07	2437	3,39	1,04
	9	24,61	11,07	4509	3,65	1,04

	12	24,61	11,07	3865	3,59	1,04
55%	17	20,82	9,37	43011	4,63	0,97
	18	20,82	9,37	46216	4,66	0,97
	20	20,82	9,37	14354	4,16	0,97
	21	20,82	9,37	13306	4,12	0,97
	22	20,82	9,37	29643	4,47	0,97
	23	20,82	9,37	51246	4,71	0,97
	26	20,82	9,37	18006	4,26	0,97
	27	20,82	9,37	24842	4,40	0,97
	28	20,82	9,37	10211	4,01	0,97

Tabla 12. Resultados del promedio ($\bar{x}$), desviación estándar (s), coeficiente de variación experimental (CV), intervalo de confianza (Iconf) y el porcentaje de error de los ensayos de fatiga axial.

NIVEL DE ESFUERZO	0,75S _{ut} =28,40 MPa	$\bar{x}$	2,82
		s	0,19
		Iconf	0,13
		Error	3,64%
		CV Experimental	6,66%
		CV Esperado	7,37%
	0,65S _{ut} =24,61 MPa	$\bar{x}$	3,61
		s	0,15
		Iconf	0,14
		Error	3,02%
		CV Experimental	4,11%
		CV Esperado	4,75%
	0,55S _{ut} =20,82 MPa	$\bar{x}$	4,38
		s	0,26
		Iconf	0,20
		Error	3,65%
		CV Experimental	5,88%
		CV Esperado	6,35%

El porcentaje de error se calcula a partir de la siguiente expresión:

Ecuación 7. Cálculo del porcentaje de error

$$\text{Porcentaje de error} = \frac{t_{\alpha/2, v} * CV}{\sqrt{n}}$$

Dónde: $t_{\alpha/2, v}$ =valor estadístico de la distribución t de student.

v =grados de libertad (n-1).

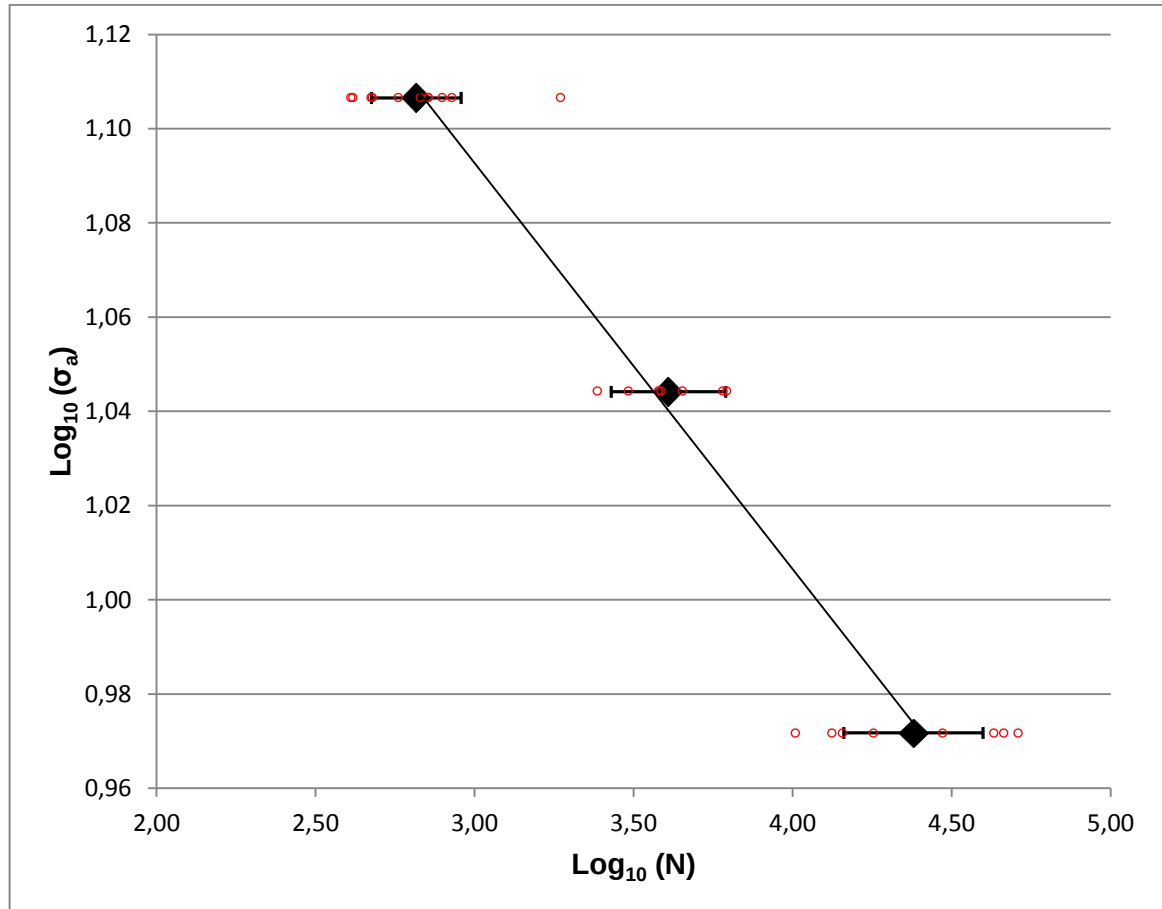
CV =coeficiente de variación.

n =tamaño de la muestra

Como se puede observar en la tabla 12 los coeficientes de variación experimental obtenidos en la pruebas de fatiga por cada porcentaje de esfuerzo aplicado, fueron inferiores a los coeficientes de variación de referencia esperados. De igual manera el porcentaje de error por cada nivel de esfuerzo es inferior al 5%, por lo tanto se considera que los resultados son estadísticamente adecuados y no fue necesario ensayar más especímenes. Además por cada nivel de esfuerzo el porcentaje de error fue menor al 5%, por lo tanto la curva S-N (en escala log-log) mostrada en la gráfica 2 se ajusta al porcentaje de error y nivel de confiabilidad indicado.

En la gráfica 2 se presentan los resultados de todos los ensayos (puntos rojos), los valores medios para cada nivel de esfuerzo (rombos negros) y el intervalo de confianza al 95% (barras). Sobre el eje vertical se presentan los valores del logaritmo en base diez de los esfuerzos alternantes de cada nivel; mientras que sobre el eje horizontal se presentan el logaritmo en base diez del número de ciclos resistidos por cada ensayo.

Gráfica 2. Curva $\text{Log } \sigma_a$ vs. $\text{Log } N$ experimental de la dirección axial de la tubería GFRP con un nivel de confianza del 95% y un porcentaje de error del 5%



Se encontró un comportamiento lineal en doble escala logarítmica también encontrada en la vida a fatiga de aceros, lo que facilita el diseño con base en resultados experimentales, sin ninguna evidencia de la existencia de un límite de resistencia a la fatiga. La dispersión de los datos es semejante a la encontrada en ensayos de fatiga para aceros, lo que demuestra que bajo condiciones que garanticen la repetitividad de proceso de producción, los resultados de ensayos experimentales como los presentados pueden ser usados para el diseño y especificación de estas tuberías.

Las pruebas se realizaron hasta un valor máximo de 52000 ciclos, por lo tanto, de la curva S-N se calcula el valor de resistencia a la fatiga para 10^6 ciclos extrapolando. El valor correspondiente del esfuerzo alternante a este número de ciclos se calcula a partir de la ecuación de la recta que arroja la gráfica 2:

Ecuación 8. Linealización de la Gráfica 2

$$y = -0,0862x + 1,3512$$

Dónde: $x = \text{Log}_{10}(10^6) = 6$

$y = \text{valor del } \text{Log}_{10}(\sigma_a)$

Para un valor de $x=6$, el valor correspondiente a y será igual a 0,83. Por lo tanto el valor correspondiente del esfuerzo alternante a este número de ciclos es:

$$\sigma_a = 6,82 \text{ MPa}$$

Teniendo en cuenta las dimensiones del tubo GFRP Tipo I, se calculó la carga alternante axial (F_a) correspondiente a 6,82 MPa, la cual se determinó a partir de la siguiente expresión:

Ecuación 9. Carga alternante axial presente sobre la sección transversal de la tubería Tipo I GFRP

$$F_a = \sigma_a * A$$

Dónde: $\sigma_a = 6,82 \text{ MPa}$

$$A = 27847,08 \text{ mm}^2$$

Por lo tanto la carga alternante axial correspondiente a 6,82 MPa es:

$$F_a = 189917,07 \text{ N}$$

4.3.2 Resistencia a la fatiga circunferencial

Al igual que para fatiga axial, no se encontró en la literatura valores del coeficiente de variación (CV) estándar para la realización de curvas S-N de materiales compuestos. Por lo tanto se procedió a realizar tres ensayos preliminares por cada nivel de esfuerzo (ver tabla 13) para determinar el promedio ($\bar{x}$), la desviación estándar (s) y el CV respecto al logaritmo en base diez del número de ciclos reportados en la tabla 14.

Tabla 13. Resultados de los ensayos preliminares de fatiga circunferencial en los tres niveles de esfuerzo

Porcentaje de esfuerzo aplicado (% S_{ut})	# de Probeta	Esfuerzo aplicado σ (MPa)	Esfuerzo alternante σ_a (MPa)	Ciclos de falla N	Log(N)	Log(σ_a)
50%	6	196,12	88,25	3015	3,48	1,95
	12	196,12	88,25	3636	3,56	1,95
	5	196,12	88,25	3639	3,56	1,95
42%	3	164,74	74,13	7209	3,86	1,87
	4	164,74	74,13	4191	3,62	1,87
	9	164,74	74,13	6531	3,81	1,87
34%	1	133,36	60,01	16749	4,22	1,78
	2	133,36	60,01	8988	3,95	1,78
	13	133,36	60,01	14658	4,17	1,78

Tabla 14. Resultados del promedio ($\bar{x}$), desviación estándar (s) y el coeficiente de variación (CV) del log(N) de los ensayos preliminares de fatiga circunferencial

NIVEL DE ESFUERZO								
0,5 S_{ut} = 196,12 MPa			0,42 S_{ut} = 164,74 MPa			0,34 S_{ut} = 133,36 MPa		
$\bar{x}$	s	C.V (%)	$\bar{x}$	s	C.V (%)	$\bar{x}$	s	C.V (%)
3,53	0,05	1,33	3,77	0,13	3,33	4,11	0,14	3,46

A partir de los CV de cada nivel de esfuerzo, el porcentaje de confiabilidad (95%) y el porcentaje de error (5%), se procedió a determinar el número de muestras a ensayar por medio de la gráfica 1, dando como resultado un número mínimo de probetas de 3, 5 y 7 para 50%, 42% y 34% del esfuerzo último respectivamente.

Dado el número mínimo de probetas se procedió a realizar los ensayos de fatiga circunferencial. Los resultados de los ensayos de fatiga circunferencial se registran en la tabla 15. Con los resultados de estos ensayos se calculó de nuevo el promedio ($\bar{x}$), la desviación estándar (s), coeficiente de variación experimental (CV) y adicionalmente el intervalo de confianza (Iconf) y el porcentaje de error por cada nivel de esfuerzo respecto al logaritmo en base diez del número de ciclos, registrados en la tabla 16.

Tabla 15. Resultados de los ensayos de fatiga circunferencial en los diferentes niveles de esfuerzo

Porcentaje de esfuerzo aplicado (% S_{ut})	# de Probeta	Esfuerzo aplicado σ (MPa)	Esfuerzo alternante σ_a (MPa)	Ciclos de falla N	Log(N)	Log(σ_a)
50%	6	196,12	88,25	3015	3,48	1,95
	12	196,12	88,25	3636	3,56	1,95
	5	196,12	88,25	3639	3,56	1,95
42%	3	164,74	74,13	7209	3,86	1,87
	4	164,74	74,13	4191	3,62	1,87
	9	164,74	74,13	6531	3,81	1,87
	8	164,74	74,13	5540	3,74	1,87
	7	164,74	74,13	7817	3,89	1,87
34%	1	133,36	60,01	16749	4,22	1,78
	2	133,36	60,01	8988	3,95	1,78
	13	133,36	60,01	14658	4,17	1,78
	14	133,36	60,01	16935	4,23	1,78
	16	133,36	60,01	12825	4,11	1,78
	17	133,36	60,01	16956	4,23	1,78
	18	133,36	60,01	13682	4,14	1,78

Tabla 16. Resultados del promedio ($\bar{x}$), desviación estándar (s), coeficiente de variación experimental (CV), intervalo de confianza (Iconf) y el porcentaje de error de los ensayos de fatiga circunferencial

NIVEL DE ESFUERZO	0,5S _{ut} =196,12 MPa	$\bar{x}$	3,53
		s	0,05
		Iconf	0,05
		Error	2,25%
		CV Experimental	1,33%
		CV Esperado	1,33%
	0,42S _{ut} =164,74 MPa	$\bar{x}$	3,79
		s	0,11
		Iconf	0,09
		Error	2,70%
		CV Experimental	2,83%
		CV Esperado	3,33%
	0,34S _{ut} =133,36 MPa	$\bar{x}$	4,15
		s	0,10
		Iconf	0,09
		Error	1,75%
		CV Experimental	2,38%
		CV Esperado	3,46%

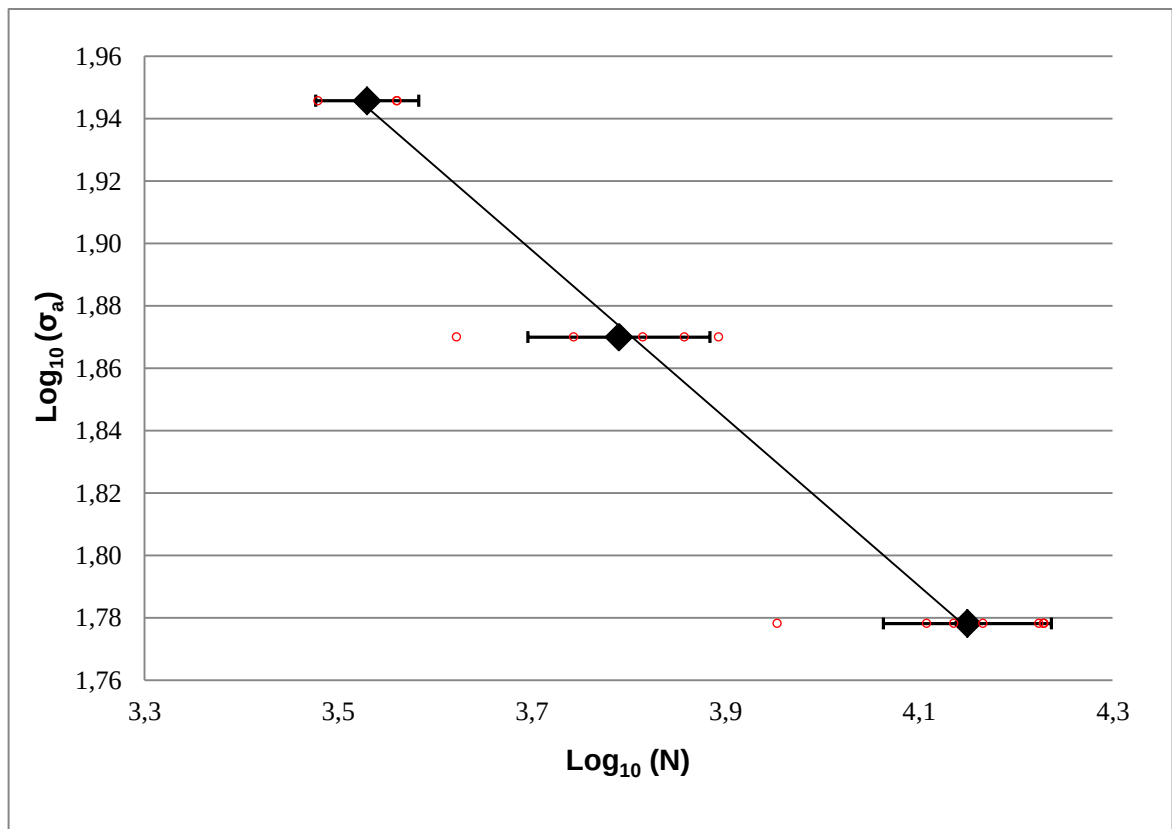
De igual manera que en fatiga axial, se calcula el porcentaje de error en fatiga circunferencial.

Como se puede observar en la tabla 16 los coeficientes de variación experimental obtenidos en la pruebas de fatiga para cada porcentaje de esfuerzo aplicado, fueron inferiores a los coeficientes de variación de referencia esperados. De igual manera el porcentaje de error por cada nivel de esfuerzo es inferior al 5%, por lo

tanto se considera que los resultados son estadísticamente adecuados y no fue necesario ensayar más especímenes. Además por cada nivel de esfuerzo el porcentaje de error fue menor al 5%, por lo tanto la curva S-N (en escala log-log) mostrada en la gráfica 3 se ajusta al porcentaje de error y nivel de confiabilidad indicado.

En la gráfica 3 se presentan los resultados de todos los ensayos (puntos rojos), los valores medios para cada nivel de esfuerzo (rombos negros) y el intervalo de confianza al 95% (barras).

Gráfica 3. Curva $\text{Log } \sigma_a$ vs. $\text{Log } N$ experimental de la dirección circunferencial de la tubería GFRP con un nivel de confianza del 95% y un porcentaje de error del 5%



Al igual que en la dirección axial, en la dirección circunferencial no se encontró evidencia de límite de resistencia a la fatiga. Las pruebas se realizaron hasta un valor máximo de 17000 ciclos, por lo tanto, de la curva S-N se calcula el valor de resistencia a la fatiga para 10^6 ciclos extrapolando. El valor correspondiente del esfuerzo alternante (σ_a) a este número de ciclos se calcula a partir de la ecuación de la recta que arroja la gráfica 3:

Ecuación 10. Linealización de la Gráfica 3

$$y = -0,2692x + 2,8939$$

El esfuerzo alternante circunferencial a 10^6 ciclos se calcula de igual manera que en fatiga axial. Por lo tanto el valor correspondiente del esfuerzo alternante es:

$$\sigma_a = 19 \text{ MPa}$$

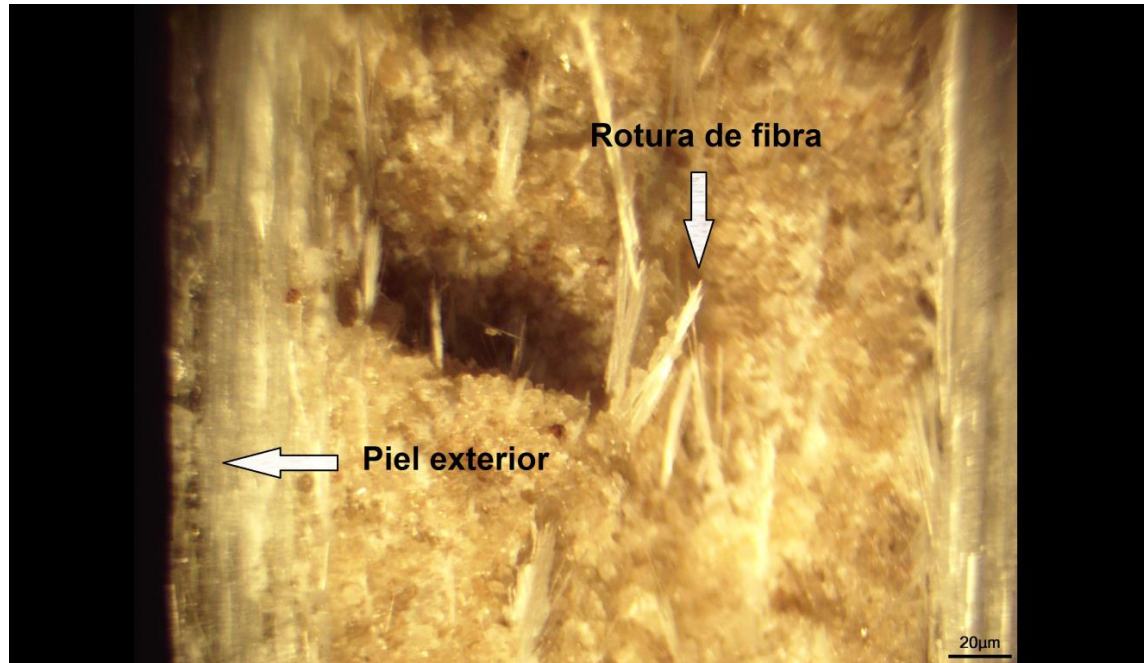
4.4 ANÁLISIS DE FRACTOGRAFÍA

4.4.1 Inspección de superficies de fractura de probetas ensayadas a fatiga axial

En las figuras 15, 16 y 17 se pueden observar las superficies de fractura de la probeta 35 ensayada al 75% del esfuerzo último, la probeta 5 ensayada al 65% del esfuerzo último y la probeta 23 ensayada al 55% del esfuerzo último respectivamente.

Una similitud que tienen estas figuras es que la superficie de fractura es irregular, es decir rugosa. Esto es debido a que el núcleo es de poliéster, el cual se comporta como un material frágil. En la figura 15, se observa que fibras rotas sobresalen en el núcleo. A medida que el porcentaje de esfuerzo disminuye, la presencia de fibras rotas disminuye sobre la superficie.

Figura 15. Foto en estereoscopio de la superficie de fractura de una probeta sometida al 75% del esfuerzo último en fatiga axial



En la figura 16 se observa una menor cantidad de fibras rotas sobre el núcleo respecto a la figura 15, mientras en la figura 17 se observa la menor cantidad de fibras rotas sobre el núcleo.

Figura 16. Foto en estereoscopio de la superficie de fractura de una probeta sometida al 65% del esfuerzo último en fatiga axial

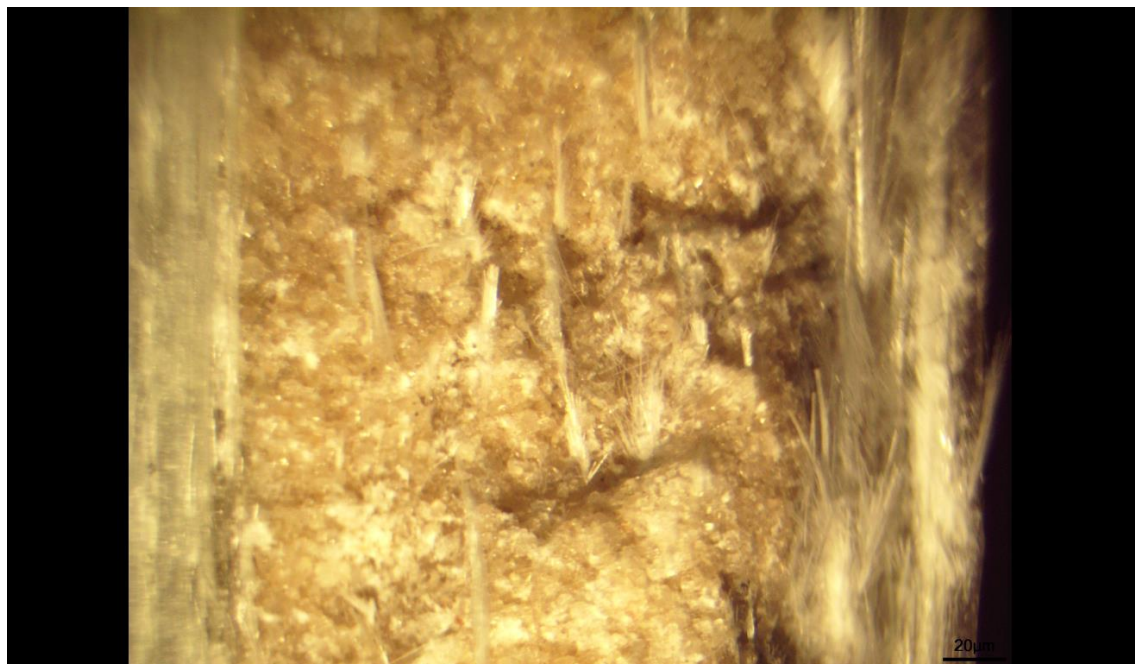
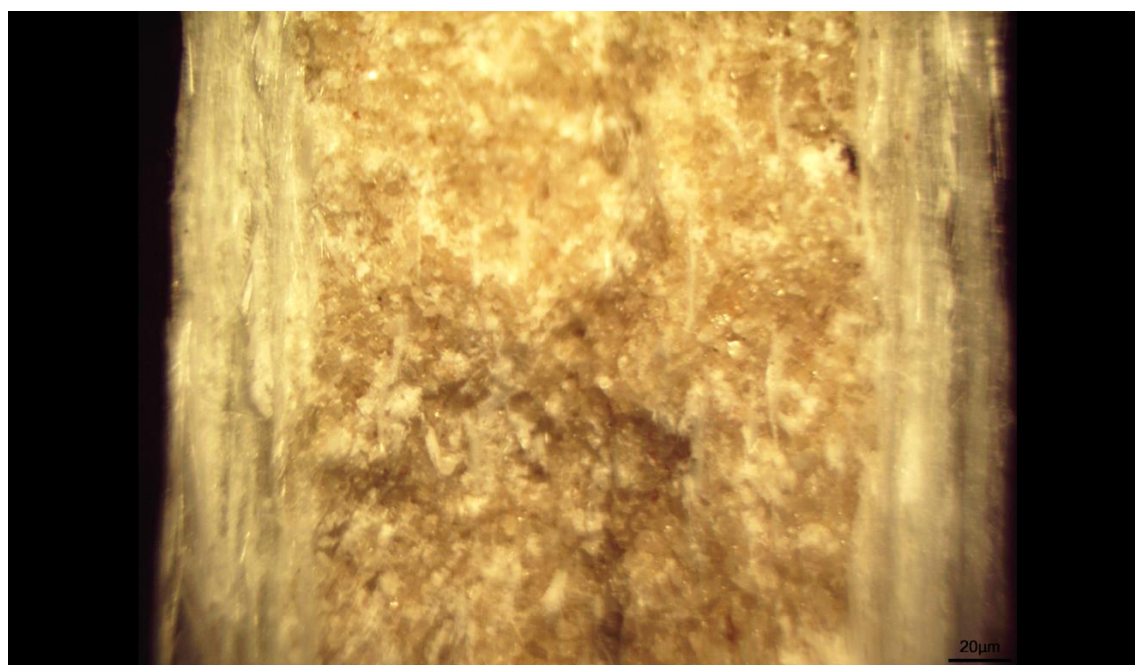


Figura 17. Foto en estereoscopio de la superficie de fractura de una probeta sometida al 55% del esfuerzo último en fatiga axial



Una característica de las figuras anteriores es que no se observa rotura de fibras sobre las pieles exteriores. Esto es debido a que las fibras se encuentran orientadas principalmente sobre la dirección circunferencial de la tubería.

Por otro lado, durante las pruebas se observó que se formaban no solo una sino varias fisuras sobre el núcleo. A partir de un número de ciclos se fueron formando fisuras en las pieles exteriores debido a que el núcleo les transmite la carga. Sin embargo en esta prueba la carga estaba aplicada perpendicularmente sobre la dirección circunferencial, es decir la dirección de mayor resistencia.

Respecto a lo anterior, en algunas pruebas no solo se observó fisuración en el núcleo sino también fractura interfase piel-núcleo como se observa en la figura 18 y en la figura 19

Figura 18. Fractura en interfase piel-núcleo de una probeta ensayada a 55% del S_{ut}

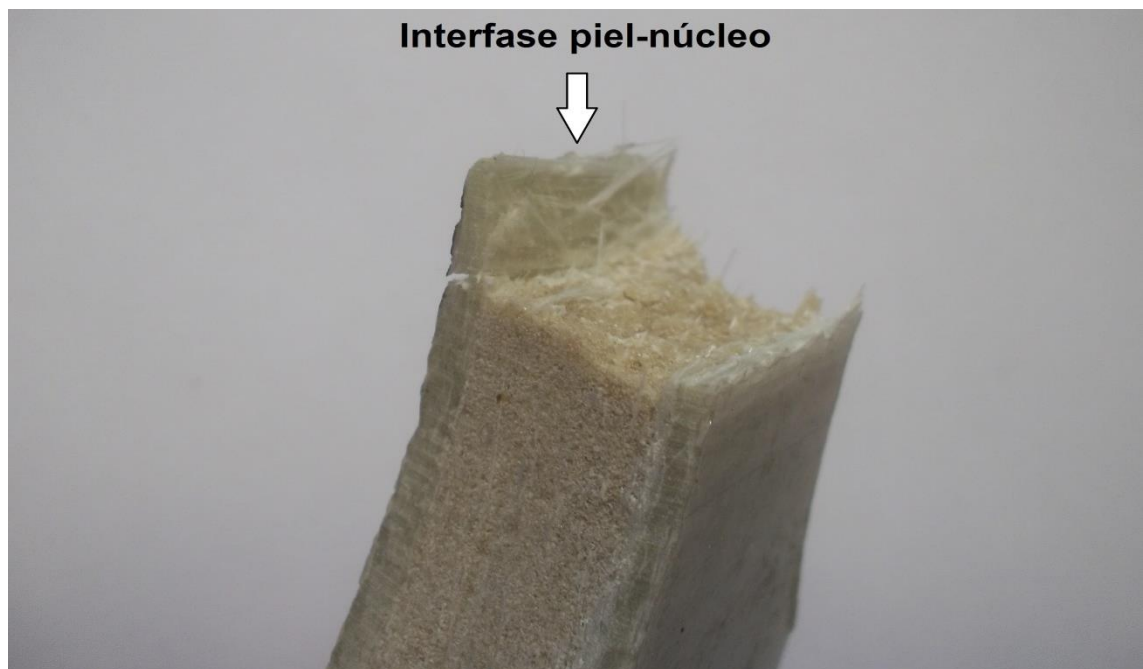
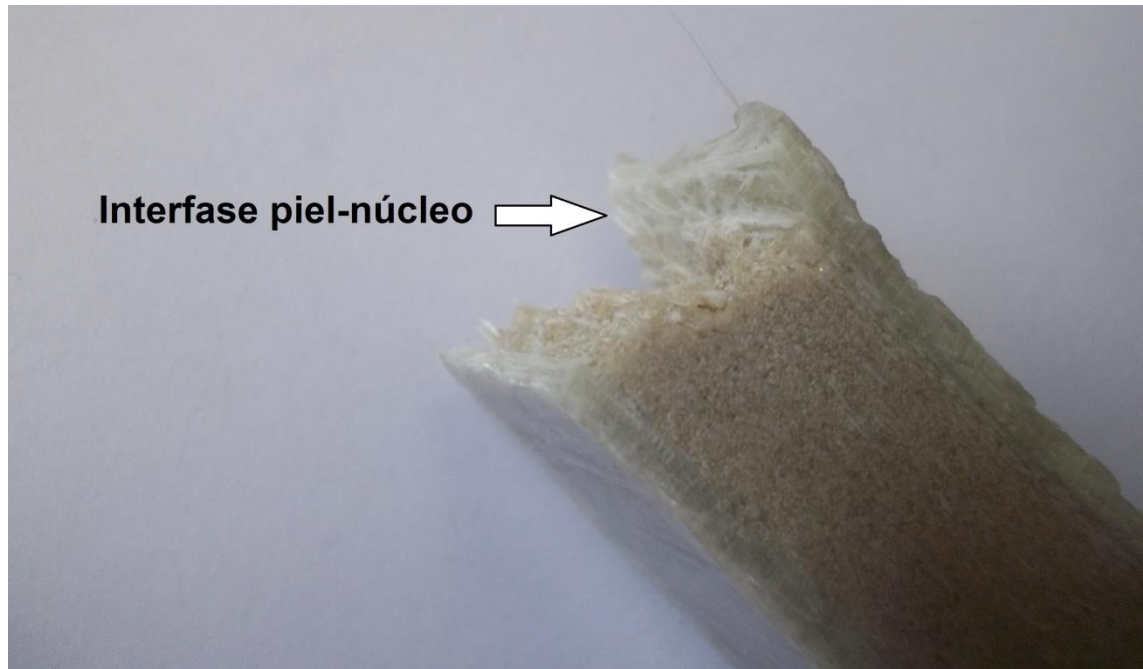


Figura 19. Interfase piel-núcleo de una probeta ensayada a 65% del S_{ut}



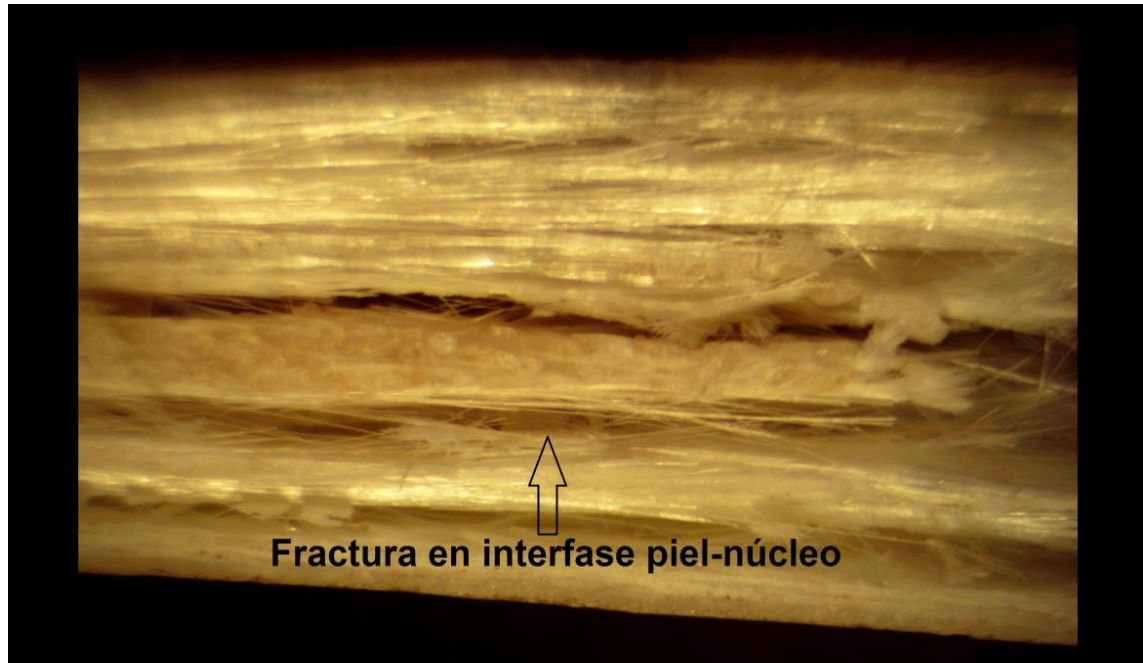
4.4.2 Inspección de superficies de fractura de probetas ensayadas a fatiga circunferencial

En el ensayo de fatiga circunferencial se pueden observar distintos mecanismos de falla en la superficie de fractura. Estos mecanismos de falla son repetitivos en todos los niveles de esfuerzo presentando similares características en la superficie de fractura.

En las figuras 20, 21 y 22 se pueden observar las superficies de fractura de la probeta número 3 ensayada al 42% del esfuerzo último.

La figura 20 representa un costado de la sección reducida donde se produjo la falla. En esta figura se observa principalmente una fractura en la interfase piel-núcleo.

Figura 20. Fractura en interfase piel-núcleo de una probeta ensayada al 42% del S_{ut}



La figura 21 representa la superficie superior de la sección reducida donde se produjo la falla. En esta figura se observa la rotura de fibras que en gran cantidad se encuentran orientadas sobre la dirección circunferencial, es decir, que las fibras están orientadas en la dirección de la carga aplicada.

Por otro lado, la figura 22 representa un costado de la sección reducida donde se produce la falla. En esta figura se puede observar dos mecanismos de falla como son el despegue entre las capas y la fractura del núcleo.

Figura 21. Rotura de fibras de una probeta ensayada al 42% del S_{ut}

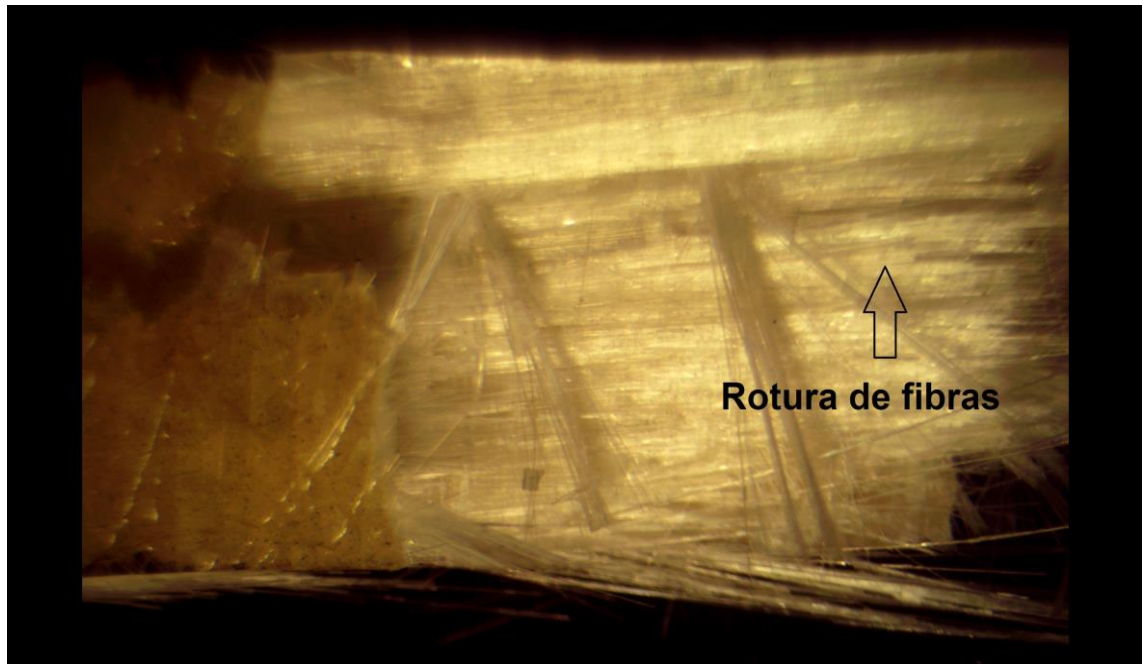
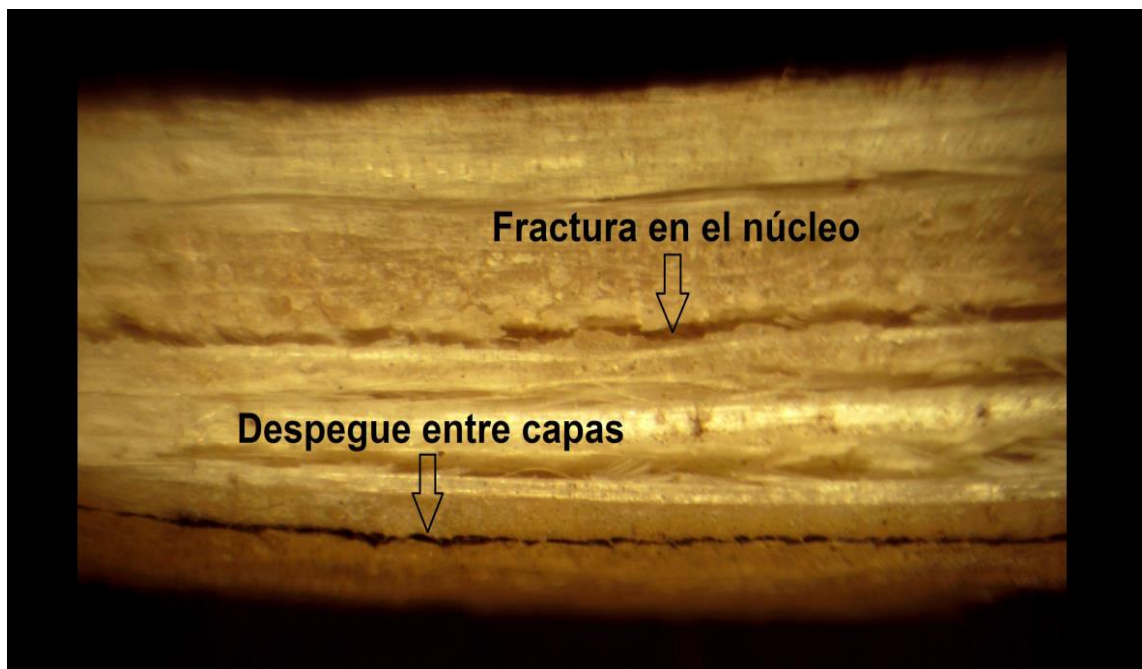


Figura 22. Fractura en el núcleo y despegue entre capas de una probeta ensayada al 42% del S_{ut}



Durante la realización de las pruebas de fatiga circunferencial se observa una flexión mínima en la zona de la sección reducida. Por esta razón se implementa la estructura en forma de aro para reducir al más mínimo la flexión. Pero la mínima flexión que se produce es la que causa la fractura en el núcleo y la fractura en la interfase piel-núcleo.

4.5 COMPARACIÓN DE LA TUBERÍA GFRP CON UNA TUBERÍA DE ACERO

4.5.1 Resistencia a la tensión

En esta comparación se considera que la tubería de acero tendrá el mismo valor del diámetro interno que la tubería GFRP, es decir de 1100mm. En este caso el espesor de la tubería será el mismo que el de la tubería instalada por EPSA el cual es de 10mm.

Respecto a la carga que causará rotura en la dirección axial se tiene en cuenta las propiedades mecánicas del acero ASTM A36 [27]

$$S_y = 250 \text{ MPa}$$

$$S_{ut} = 400 \text{ MPa}$$

La carga última (F_{ut}) se calcula a partir de la Ecuación 5:

$$F_{ut} = S_{ut} * A$$

El valor de A es el área de la sección transversal de la tubería de acero. Esta área se calcula a partir de la siguiente expresión:

Ecuación 11. Área de la sección transversal de una tubería

$$A = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}$$

Dónde: D =diámetro exterior de la tubería de acero (1110 mm = 43,70 in)

d = diámetro interior de la tubería de acero (1100 mm = 43,31 in)

El valor correspondiente es: $A = 17357,3\text{mm}^2 = 26,9\text{in}^2$

Por lo tanto la carga que causará la falla en la dirección axial en la tubería de acero será igual a:

$$F_{ut} = 6942919,76\text{N}$$

Teniendo en cuenta que el S_{ut} en la dirección axial de la tubería GFRP es de 37,86 MPa y el área de la sección transversal ya calculada es de 27847,08 mm², el valor de la carga que causará rotura en esta dirección es de:

$$F_{ut} = 1054290,45\text{N}$$

Comparando la carga que causa rotura entre la tubería de acero ASTM A36 y la tubería GFRP sobre la dirección axial, se obtiene que la carga que causa la rotura en la tubería de acero es 6,6 veces mayor que la carga que causa la rotura en la tubería GFRP. Sin embargo en una instalación industrial las cargas que se generan en esa dirección (debidas al peso propio principalmente) deberán ser coherentes con la carga de fractura en dirección axial manteniendo factores de seguridad apropiados.

En cuanto a la dirección circunferencial de la tubería Tipo II GFRP, el esfuerzo último (392,23±21,44 MPa) es equivalente al del acero ASTM A36.

4.5.2 Resistencia a la fatiga

Para comparar la tubería GFRP con una tubería de acero ASTM A36 se halló el valor del esfuerzo alternante (σ_a) correspondiente a 10⁶ ciclos. Por lo tanto se

determinó el valor de resistencia a la fatiga teórico del acero teniendo en cuenta los respectivos factores de corrección. [28]

La estimación teórica de la resistencia a la fatiga de los aceros se determina a partir de la siguiente expresión [28]:

Ecuación 12. Límite de resistencia a la fatiga sin corregir

$$S_e' = 0,5 * S_{ut}$$

$$S_e' = 200 \text{ MPa}$$

Para determinar la resistencia a la fatiga corregida se aplicaron los factores de corrección [28], que reducen el valor teórico estimado a partir de la siguiente expresión:

Ecuación 13. Resistencia a la fatiga corregida

$$S_e = C_{carga} * C_{tamaño} * C_{temperatura} * C_{confiabilidad} * C_{superficie} * S_e'$$

Dónde:

- El factor de carga (C_{carga}) es de 0,7 debido a que la carga es transmitida de forma axial.
- El factor de tamaño ($C_{tamaño}$) es igual a 1 debido a que la carga es transmitida de forma axial.
- El factor de temperatura ($C_{temperatura}$) es igual a 1. ($T < 450^{\circ}\text{C}$)
- El factor de confiabilidad ($C_{confiabilidad}$) es igual a 0,85 debido a que en la realización de los ensayos se trabajó a un 95% de confiabilidad.

- Debido a que la superficie está en contacto con agua, el factor de superficie ($C_{superficie}$) es igual 0,64 [28].

Por lo tanto el valor de la resistencia a la fatiga corregida es:

$$S_e = 76,16 \text{ MPa}$$

Para determinar el valor del esfuerzo alternante (σ_a) a 10^6 se considera el valor de la relación de esfuerzo $R=0,1$. Por lo tanto la resistencia a la fatiga estará afectada por la presencia de un esfuerzo medio (σ_m). Por consiguiente se recurre al diagrama de Goodman modificado [28], específicamente a la línea de Goodman modificada representada por la siguiente expresión:

Ecuación 14. Línea de Goodman modificada

$$\frac{\sigma_m}{S_{ut}} + \frac{\sigma_a}{S_e} = 1$$

El valor del esfuerzo medio (σ_m) y el esfuerzo alternante (σ_a) se calcula a partir de la ecuación 2 y ecuación 3.

Se calcula el valor del esfuerzo mínimo por medio de la ecuación 4, el cual corresponde a $\sigma_{min} = 0,1\sigma_{max}$. Relacionando la ecuación 4 con la ecuación 2 y la ecuación 3, se obtiene la siguiente expresión:

Ecuación 15. Esfuerzo alternante y esfuerzo medio relacionados con el esfuerzo máximo

$$\sigma_a = 0,45\sigma_{max}$$

$$\sigma_m = 0,55\sigma_{max}$$

Reemplazando los valores de la ecuación 15 en la ecuación 14 y despejando σ_{max} se obtiene la siguiente expresión:

Ecuación 16. Esfuerzo máximo

$$\sigma_{max} = \frac{1}{\frac{0,55}{S_{ut}} + \frac{0,45}{S_e}}$$

Reemplazando los valores de S_{ut} y S_e en la ecuación 16 se obtiene el valor del esfuerzo máximo correspondiente a:

$$\sigma_{max} = 137,29 \text{ MPa}$$

A partir de la ecuación 15 se determinó el valor del esfuerzo alternante y el esfuerzo medio:

$$\sigma_a = 61,78 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m = 75,51 \text{ MPa}$$

La carga alternante (F_a) que corresponde para un $\sigma_a = 61,78 \text{ MPa}$ a 10^6 ciclos en la tubería de acero se determina a partir de la ecuación 9:

$$F_a = \sigma_a * A$$

Dónde A es el área de la sección transversal de la tubería de acero ($17357,3 \text{ mm}^2$). Por lo tanto la carga alternante correspondiente es:

$$F_a = 1072334 \text{ N}$$

Relacionado la carga alternante axial de la tubería de acero con la carga alternante axial de la tubería GFRP ($189917,07 \text{ N}$) a 10^6 ciclos, se obtiene que la tubería de acero ASTM A36 le corresponde una carga axial alternante seis veces mayor que la tubería GFRP. Igual que en el caso de carga monotónica, ésta

dirección es la menos resistente de la tubería y debe prestarse especial atención a las cargas que se generen en operación.

Por otro lado, en cuanto a la dirección circunferencial, el esfuerzo alternante que resiste la tubería GFRP a 10^6 ciclos (19 MPa) es tres veces menos resistente que la tubería de acero ASTM A36 (61,78 MPa).

5. CONCLUSIONES

En este proyecto de grado se estudió el comportamiento a la fatiga en tubos hechos de material compuesto de GFRP y se obtuvieron las siguientes conclusiones:

La dirección axial de la tubería GFRP es diez veces menos resistente que la dirección circunferencial, mientras que la dirección circunferencial de la tubería GFRP es tan resistente como un acero estructural ASTM A36 con un esfuerzo último de $392,23 \pm 21,44$ MPa.

Se encontró experimentalmente la curva esfuerzo vida (S-N) en dirección axial y circunferencial de la tubería GFRP, con porcentajes de error inferiores al 5% y una confiabilidad del 95%. La dispersión de los datos es semejante a la encontrada en ensayos de fatiga para aceros. De la curva S-N se estimó la resistencia a la fatiga para 10^6 ciclos extrapolando, el valor correspondiente del esfuerzo alternante a este número de ciclos es de 6,82 MPa en la dirección axial y 19 MPa en la dirección circunferencial.

Para una tubería de acero ASTM A36 en condiciones similares la resistencia a la fatiga para 10^6 ciclos es seis veces mayor que para la tubería GFRP en la dirección axial y tres veces mayor que para la tubería GFRP en la dirección circunferencial.

Por último, en las superficies de fractura se observó la combinación de diferentes modos de falla. En cuanto a las probetas ensayadas en fatiga axial se observó que a medida que disminuyó el esfuerzo aplicado, también disminuyó la presencia de fibras rotas sobre la superficie de fractura. Por otro lado, los modos de falla presentados en las probetas ensayadas en fatiga circunferencial fueron similares para todos los niveles de esfuerzo, presentado fisuración en el núcleo, despegue entre capas, rotura de fibras y falla en la interfase piel-núcleo.

6. RECOMENDACIONES

Las tuberías GFRP pueden usarse como sustitutos de tuberías de acero en tuberías de carga de plantas hidroeléctricas desde que sean verificadas y controladas las cargas en dirección axial (dirección más débil de la tubería) de forma que sean coherentes con la carga de fractura en dirección axial y la resistencia a la fatiga, manteniendo factores de seguridad apropiados con base a las caracterizaciones presentadas en este proyecto. En la dirección circunferencial que es la más exigida en la operación debe prestarse especial atención a los factores de seguridad a fatiga. En instalaciones industriales de GFRP debe analizarse el efecto de golpes de ariete sobre los esfuerzos alternantes, debido a que los esfuerzos generados en las dos tuberías son radicalmente diferentes debido a la elasticidad propia de la tubería GFRP que podría disminuir este efecto. Se recomienda en caso de una instalación usando tubería GFRP verificar la distancia entre apoyos de la tubería, favorecer cargas compresivas y verificar las memorias de cálculo.

BIBLIOGRAFÍA

1. TARAKCIOGLU, N, et al. A. The fatigue behaviour of $(\pm 55)_3$ filamen wound GFRP. En: Composite Structures. Septiembre, 2007. vol. 80, p. 207-211.
2. MANJUNATHA, C.M, et al. The tensile fatigue behaviour of a silica nanoparticle-modified glass fibre. En:Composites Science and Technology. Enero, 2010. vol. 70, p. 193-199.
3. O-tek realiza la mayor obra de rehabilitación sin zanja con CIPP de un alcantarillado en Colombia [en línea]. Colombia: O-TEK, 2012 [consultado 27 de abril 2013] Disponible en internet: <http://www.o-tek.com/7-blog/72-o-tek-realiza-la-mayor-obra-de-rehabilitacion-sin-zanja-de-un-alcantarillado-en-colombia>
4. Tuberías de PRFV Flowtite [en línea]. España: AMITECH SPAIN [consultado el 5 de julio de 2013] Disponible en internet: http://www.amitechspain.es/documentos/downloads/Tuberia_PRFV_AMITECH_SPAIN.pdf
5. KAWAGUCHI, Takafumi, et al. Resistance of glass fiber-reinforced thermoplastics to water hammer. En:Polymer Testing. Mayo, 2003. vol. 22, p. 327-33.
6. STUPENENGO, franco. Materiales compuestos. En: Guía didáctica: Materiales y materias primas. Buenos Aires: Educ.ar, 2011. p. 5-26

7. MONTERO GARCÍA, Laura. Estudio del mecanizado de materiales compuestos. Trabajo de grado Ingeniera Mecánica. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2010. 114 p.
8. MIRAVETE, Antonio y CASTEJÓN, Luis. Materiales compuestos. En: Temes de disseny. 2002. no. 20, p. 123-139.
9. BESEDNJAK, Alejandro. Los materiales compuestos. [en línea]. Barcelona. [consultado el 6 de febrero de 2013] Disponible en internet: <http://ocw.upc.edu/sites/default/files/materials/15012220/22636-3142.pdf>
10. GONZALES IGLESIAS, Javier. El efecto del tratamiento superficial de fibras de vidrio en la resistencia mecánica de materiales compuestos de matriz epoxídica. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2010. 125 p.
11. Laminado G11 clase F epoxy fibra de vidrio [en línea]. Guadalajara: Brunssen de Occidente, S.A. [consultado el 11 de mayo de 2013] Disponible en internet: <http://www.comercioindustrial.net/productos.php?id=g11&mt=aislantes%20electricos>
12. Introducción a la estructuras sándwich [en línea] [consultado 2 de Julio de 2013] Disponible en internet: <http://ocw.uc3m.es/mecanica-de-medios-continuos-y-teoria-de-estructuras/elasticidad-resistencia-de-materialesii/material-de-clase-1/materiales-compuestos/capitulo7.pdf>
13. RODRÍGUEZ, José Manuel. Estructuras sándwich [en línea] [consultado 2 de julio de 2013] Disponible en internet: <http://materiales.wikispaces.com/Estructuras+sandwich>

14. El golpe de ariete [en línea]. Ciudad Real: Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real. [consultado el 24 de febrero de 2013] Disponible en internet: http://www.uclm.es/area/ing_rural/Trans_hidr/Tema10.PDF
15. INTERNATIONAL ASTM. Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing. E1823–11. Estados Unidos. 2011, 24 p.
16. BUDYNAS, Richard, et al. Fallas por fatiga resultantes de carga variable. En: Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. 8 ed. México D.F: McGraw-Hill Book Company, 2002. p. 260-348.
17. TSAI, Stephen y MIRAVETE DE MARCO, Antonio. Comportamiento a fatiga. En: Diseño y análisis de materiales compuestos. Barcelona: Reverté S.A., 1998.
18. SCHIJVE, J. Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art. En: International Journal of Fatigue. Febrero, 2003, vol. 25, p. 679-702.
19. Fatiga en materiales compuestos: comportamiento y mecanismos de degradación [en línea] [consultado el 6 de febrero de 2013] Disponible en internet: <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6860/02CAPITULO.pdf?sequence=3>
20. DEMERS, Cornelia E . Tension–tension axial fatigue of E-glass fiber-reinforced polymeric composites: fatigue life diagram. En: Construction and Building Materials. Julio, 1998, vol. 12, p. 303-310.

21. KUMAGAI, Susumu, et al. Tension–tension fatigue behavior of GFRP woven laminates at low temperatures. En: Cryogenics. Junio, 2004, vol. 45, p. 123-128.
22. INTERNATIONAL ASTM. Standard Specification for “Fiberglass” (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Pressure Pipe. D3517-11. Estados Unidos. 2011, 12 p.
23. INTERNATIONAL ASTM. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. D638-10. Estados Unidos. 2010, 16 p.
24. INTERNATIONAL ASTM. Standard Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe by Split Disk Method. D2290-08. Estados Unidos. 2008, 6 p.
25. INTERNATIONAL ASTM. Standard test method for tension–tension fatigue of polymer matrix composite materials. D3479M-07. Estados Unidos. 2007, 6 p.
26. LIPSON, Charles y SHETH, Narendra. Fatigue Experiments. En: Statistical Design and Analysis of Engineering Experiments. Estados Unidos: McGraw-Hill, 1973. p. 262-310.
27. MATWEB. Acero ASTM A36 [en línea] [consultado el 27 de marzo de 2013] Disponible en internet: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=d1844977c5c8440cb9a3a967f8909c3a&ckck=1>
28. NORTON, Robert L. Teorías de falla por fatiga. En: Diseño de máquinas. México D.F.: PRETTICE HALL, 1999, p. 345-471.