



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

“Fatiga a flexión rotativa en materiales compuestos en base de fibra de vidrio”

Hernández Ganán, Pablo René y Yandún Sánchez Carlos Andrés

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico

Ing. Pérez Rosales, José Emilio

18 de agosto de 2023



TESIS HERNANDEZ YANDUN FINAL.pdf

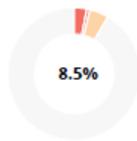
Scan details

Scan time: August 18th, 2023 at 14:42 UTC

Total Pages:
100

Total Words:
24925

Plagiarism Detection



Types of plagiarism		Words
Identical	3.1%	763
Minor Changes	0.8%	210
Paraphrased	4.6%	1150
Omitted Words	0%	0

AI Content Detection



Text coverage

- AI text
- Human text

Plagiarism Results: (137)

FormatosTrabajosdeTitulacion2022.docx 0.5%

<https://biblioteca.espe.edu.ec/wp-content/uploads/2022/04/...>

Calderon Garcia Angel David

Resultados de la herramienta para verificación y/o análisis de similitud de contenidos [image:] Nota: Colocar únicamente la página que ...

CD-3802 0.5%

<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4036/1/cd-380...>

Villacís Salazar, Héctor Guillermo

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
OBTENCIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS HÍBRIDOS DE MATRIZ POLIÉSTE...

CAPITULO 4 ANÁLISIS POR EL MÉTODO DE LOS ELEM... 0.4%

<https://docplayer.es/161009273-capitulo-4-analisis-por-el-m...>

Iniciar la sesión ...



Escanea el código QR para:
JOSE EMILIO PEREZ
ROSALLES



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular **“Fatiga a flexión rotativa en materiales compuestos en base de fibra de vidrio”** fue realizado por los señores **Hernández Ganán Pablo René y Yandún Sánchez Carlos Andrés**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 18 de agosto de 2023



JOSE EMILIO PÉREZ
ROSALES

.....
Ing. Pérez Rosales, José Emilio

C.C. 1706481957



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Hernández Ganán, Pablo René**, con cédula de identidad n° 1722418116 y **Yandún Sánchez Carlos Andrés**, con cédula de identidad n° 1003967849, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **"Fatiga a flexión rotativa en materiales compuestos en base de fibra de vidrio"** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 18 de agosto de 2023

Hernández Ganán Pablo René

C.C. 1722418116

Yandún Sánchez Carlos Andrés

C.C. 1003967849



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Autorización de publicación

Nosotros, **Hernández Ganán, Pablo René**, con cédula de identidad n° 1722418116 y **Yandún Sánchez Carlos Andrés**, con cédula de identidad n° 1003967849, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **“Fatiga a flexión rotativa en materiales compuestos en base de fibra de vidrio”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 18 de agosto de 2023

Hernández Ganán Pablo René

C.C. 1722418116

Yandún Sánchez Carlos Andrés

C.C. 1003967849

Dedicatoria

A mi padre, por ser el ángel que me guía y me cuida en cada decisión que tomo en la vida, desde el cielo.

A mi madre, por ser el pilar más importante que tengo en la vida, por el apoyo ilimitado e incondicional que siempre me ha dado y por su amor incondicional a sus hijos, hoy en día gracias a ella puedo cumplir este objetivo.

A mis hermanos, por su constante apoyo en mi carrera universitaria.

Pablo René Hernández Ganán

A mis padres, por quienes soy lo que soy y de los que me siento muy orgulloso, porque gracias a ellos y a su apoyo incondicional he logrado crecer como persona, porque en ellos he visto el ejemplo de lucha, sacrificio, honestidad, responsabilidad y respeto.

A mi hermano, el cual me ha brindado el ejemplo de constancia y perseverancia en todo momento, quien me ha guiado durante todo este proceso de aprendizaje y quien ha sido un pilar fundamental de apoyo diario.

A mi abuelita quien durante la mayor parte de mi etapa universitaria me brindó su sabiduría y compañía, la persona que siempre estuvo presente para brindarme un consejo o una sonrisa y que sé que me guía y me protege en todo momento.

Carlos Andrés Yandún Sánchez

Agradecimientos

A Dios, por darme la sabiduría para mantenerme en este camino y ser la fortaleza en los momentos de dificultad y debilidad que he tenido.

A mis padres, por brindarme ese apoyo emocional y económico, que empezó desde que inicie este camino de la ingeniera mecánica.

A mis hermanos, Karla, Kelvin e Ivonne por sus enseñanzas y amor que me han dado en todos estos años.

Al ingeniero José Pérez, por ser nuestro tutor ya que gracias a sus directrices, conocimientos, dedicación y paciencia se lograron alcanzar los resultados requeridos en el proyecto de grado.

Al ingeniero Francisco Navas, por su ayuda constante en los trabajos realizados en el laboratorio de mecánica de materiales.

Al ingeniero Xavier Sánchez, por su predisposición para facilitar los trabajos en los laboratorios de materiales compuestos.

Al personal del CICTE, por su dedicación para dar los mejores resultados en el laboratorio de materiales compuestos.

A mi compañero de tesis y amigo Carlos, por su sentido de responsabilidad y compromiso que me brindo desde que iniciamos este proyecto.

A mis amigos de la universidad, ya que esta amistad va más allá de las aulas, gracias por las horas compartidas, las tareas realizadas y las historias vividas.

Pablo René Hernández Ganán

A Dios, por brindarme la fuerza, conocimiento y el coraje para crecer en el ámbito personal y profesional, así como también en lo moral.

A mis padres Pepe y Consuelo, por su esfuerzo y sacrificio diario que han hecho todo lo posible por brindarme un mejor futuro.

A mi tía y prima que han sido un pilar fundamental en mis estudios, brindándome acogida, bienestar y cuidado durante mi estancia universitaria.

A los Ingenieros José Pérez y Francisco Navas por el tiempo y predisposición durante el desarrollo de la Unidad de Integración Curricular.

Al Ingeniero Xavier Sánchez por su valioso aporte y predisposición para el desarrollo del proyecto.

Al departamento del CICTE, por su valiosa colaboración en el proceso de fabricación de las probetas de material compuesto para el desarrollo experimental del proyecto de grado.

A mi amigo y compañero de proyecto de grado Pablo, por su ayuda en el desarrollo del presente proyecto, por sus enseñanzas y sus consejos para mi propio crecimiento personal y profesional.

Finalmente, a mis amigos Danilo, Andrés, y Joselin, por su valiosa amistad y su apoyo a lo largo de mi carrera universitaria, quienes en su momento me brindaron un consejo.

Carlos Andrés Yandún Sánchez

ÌNDICE DE CONTENIDO

Dedicatoria.....	6
Agradecimientos	7
Resumen	18
Abstract.....	19
Capítulo I Generalidades	20
Introducción	20
Antecedentes	21
Definición del problema.....	21
Justificación	22
Alcance	23
Objetivos.....	24
Objetivo general.....	24
Objetivos específicos	24
Capítulo II Marco Teórico.....	25
Materiales compuestos	25
Clasificación de los materiales compuestos	26
Propiedades de los materiales compuestos	28
Aplicaciones de los materiales compuestos	30
Proceso de fabricación de los materiales compuestos	32
Diseño	32
Preparación de fibras	32
Preparación de la matriz.....	33

	10
Moldeo	33
Curado	34
Acabado	34
Fibra de vidrio	36
Fibra de vidrio tipo E	38
Propiedades de la fibra de vidrio	39
Resinas termoestables.....	39
Fenómeno de la fatiga.....	41
Fatiga según el número de ciclos	42
Fatiga a flexión rotativa	43
Fatiga en materiales compuestos.....	45
Degradación a fatiga de un laminado	46
Daño por fatiga.....	46
Ensayo a tracción estática en materiales compuestos	48
Máquina de ensayos a fatiga R.R. Moore.....	48
Partes de la máquina de ensayo a flexión rotativa.....	50
Normas para ensayos a fatiga y para probetas de materiales compuestos	53
Curvas esfuerzo – vida en materiales compuestos	55
Efecto de la tensión media en la vida a fatiga.....	55
Capítulo III Simulación y Rediseño.....	58
Simulación SAP 2000	58
Rediseño de la Máquina de ensayos a fatiga R.R. Moore	60
Diseño de miembros a flexión	61

Procedimiento de diseño estructural.....	64
Cálculo de pernos de montaje.....	65
Construcción de estructura para la adecuación de la máquina R.R. Moore.....	70
Pasos de fabricación de la estructura metálica.....	71
Fabricación.....	71
Calibración de la máquina de ensayos de fatiga R.R. Moore	77
Comparativa de carga aplicada a través de los rodachines.....	77
Cable tensor con recubrimiento plástico.....	79
Cable tensor sin recubrimiento plástico	81
Determinación del módulo de elasticidad del material compuesto.....	82
Cálculo del % de corrección para la carga aplicada	87
Capítulo IV Experimentación y Análisis.....	88
Estudio de porcentaje en volumen de la cantidad de fibra a considerar en los ensayos.....	88
Fracción Volumétrica.....	88
Caso 1 $V_f=0,30$	88
Caso 2 $V_f=0,40$	90
Caso 3 $V_f=0,50$	92
Análisis estadístico del tamaño de muestra.....	94
Población	94
Muestra	94
Fabricación de las probetas	96
Ensayos de tracción.....	107
Equipos	108
Instrumentos	108

Materiales	108
Procedimiento	109
Análisis resistencia a la tracción del material compuesto (teórico).....	110
Gráficas de ensayo a tracción en material compuesto	111
Comparación de resistencia a la tracción del material compuesto real vs teórico.....	111
Análisis de carga a utilizar en el ensayo de fatiga	112
Ejecución de los ensayos a fatiga utilizando la máquina de R.R. Moore	116
Determinación de las curvas esfuerzo-vida para fibra de vidrio.....	117
Aplicando propiedades de logaritmos de base 10:	119
Análisis de resultados	121
Capítulo V Análisis de costos.....	130
Análisis de costos	130
Capítulo VI Conclusiones y Recomendaciones	133
Conclusiones	133
Recomendaciones	134
Bibliografía.....	136
Apéndices	139

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Clasificación de los materiales compuestos	26
Tabla 2	Clasificación de los materiales compuestos según la forma de sus constituyentes	27
Tabla 3	Composición del vidrio (% en peso)	37
Tabla 4	Clasificación de resinas termoestables según el estado de temperaturas	41
Tabla 5	Número de ciclos para el fenómeno de fatiga	42
Tabla 6	Tipo de flexión en ensayo de fatiga	44
Tabla 7	Especificaciones técnicas – Máquina de fatiga	52
Tabla 8	Tabla de Selección para la Aplicación del Capítulo F Secciones	62
Tabla 9	Cargas disponibles de la máquina R.R. Moore	79
Tabla 10	Medidas teóricas y reales de cargas en [kg] para el cable con recubrimiento	80
Tabla 11	Medidas teóricas y reales de cargas en [kg] para el cable sin recubrimiento	81
Tabla 12	Datos geométricos probeta 30% de fibra de vidrio	83
Tabla 13	Ensayo para determinación del Módulo de Elasticidad del material compuesto	83
Tabla 14	Resultados de los cálculos para el desarrollo de las probetas según el % de volumen de la matriz y la fibra	94
Tabla 15	Número de muestras de acuerdo con el tipo de prueba	94
Tabla 16	Valores estadísticos para el cálculo de muestra	95
Tabla 17	Materiales para el proceso de fabricación de probetas de material compuesto	97
Tabla 18	Proceso de fabricación de probetas de material compuesto	100
Tabla 19	Medidas geométricas en probetas al 50% de fibra de vidrio	105
Tabla 20	Medidas geométricas en probetas al 40% de fibra de vidrio	106
Tabla 21	Medidas geométricas en probetas al 30% de fibra de vidrio	107
Tabla 22	Especificaciones Máquina de Ensayos Universales	109
Tabla 23	Resistencia a la tracción del material compuesto	111
Tabla 24	Carga para ensayo de fatiga - 50% Fibra de vidrio	114

Tabla 25	Carga para ensayo de fatiga - 40% Fibra de vidrio	114
Tabla 26	Carga para ensayo de fatiga - 30% Fibra de vidrio	115
Tabla 27	Pesas disponibles para ensayo a fatiga en la máquina R.R. Moore	115
Tabla 28	Esfuerzos aplicados y el número de ciclos con $V_f=0,5$	118
Tabla 29	Datos del ensayo de fatiga a flexión rotativa de material compuesto $V_f=0,50$	119
Tabla 30	Datos del ensayo de fatiga a flexión rotativa de material compuesto $V_f=0,40$	120
Tabla 31	Datos del ensayo de fatiga a flexión rotativa de material compuesto $V_f=0,30$	120
Tabla 32	Gastos de materia prima.....	130
Tabla 33	Otros gastos	132
Tabla 34	Costo total del proyecto	132

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Aplicación de materiales compuestos (Boeing 777)	30
Figura 2 Aplicaciones de los materiales compuestos	31
Figura 3 Aplicación de materiales compuestos.....	31
Figura 4 Esquema del proceso de fabricación tipo Layup	35
Figura 5 Tipos de configuración de fibras de vidrio	36
Figura 6 Fibra de Vidrio tipo E (Eléctrica)	38
Figura 7 Curvas esfuerzo-deformaciones de fibras de refuerzos.....	39
Figura 8 Máquina R.R. Moore para materiales compuestos	44
Figura 9 Mecanismo de daño en materiales compuestos	47
Figura 10 Esquema de la máquina R.R. Moore.....	50
Figura 11 Máquina R.R. Moore	51
Figura 12 Familia de curvas S-N	56
Figura 13 Tensiones de amplitud constante que superan el límite de resistencia a tracción(derecha) y límite de resistencia por compresión(izquierda)	56
Figura 14 Curvas de vida constante $S(\sigma_m \sigma_a)$ de la resistencia.....	57
Figura 15 Simulación SAP 2000.....	58
Figura 16 Simulación vibraciones Modal 1	59
Figura 17 Simulación vibraciones Modal 2	59
Figura 18 Simulación vibraciones Modal 3	60
Figura 19 Flexión en vigas	61
Figura 20 Valores de los ángulos (Dipac).....	63
Figura 21 Esquema del perfil estructural tipo L.....	63
Figura 22 Factor de relleno	66
Figura 23 Coeficiente de deslizamiento.....	66
Figura 24 Pretensión mínima del perno.....	67

Figura 25	Resistencia nominal al corte del perno	68
Figura 26	Resistencia al rodamiento y al desgarró en los orificios de los pernos	68
Figura 27	Resistencia a la cortadura	70
Figura 28	Procedimiento de construcción de una estructura metálica	71
Figura 29	Trazado de medidas.....	72
Figura 30	Corte del material con amoladora.....	73
Figura 31	Soldadura de componentes.....	74
Figura 32	Partes de una Soldadura GMAW	74
Figura 33	Soldadura de rodachines.....	75
Figura 34	Máquina de ensayos de fatiga R.R. Moore para materiales compuestos.....	76
Figura 35	Medición de la carga aplicada en la máquina de ensayos de fatiga	79
Figura 36	Carga Aplicada con cable tensor con recubrimiento plástico	80
Figura 37	Carga Aplicada con cable tensor sin recubrimiento	81
Figura 38	Probeta de material compuesto 30% fibra de vidrio con Strain Gages	82
Figura 39	Gráfica módulo de elasticidad del material compuesto a base de fibra de vidrio	84
Figura 40	Máquina de Ensayos Universales	87
Figura 41	Dimensionamiento de la probeta	104
Figura 42	Máquina de ensayos universal AMSLER.....	108
Figura 43	Ensayo de tracción de material compuesto en diferentes composiciones.....	111
Figura 44	Curva S-N del Material Compuesto $V_f=0,50$ $V_m=0,50$	121
Figura 45	Probeta #1 al 50 % en fibra de vidrio y 50% de resina de poliéster	122
Figura 46	Probeta #4 al 50 % en fibra de vidrio y 50% de resina de poliéster	122
Figura 47	Probeta #7 al 50 % en fibra de vidrio y 50% de resina de poliéster	123
Figura 48	Probeta #10 al 50 % en fibra de vidrio y 50% de resina de poliéster	123
Figura 49	Curva S-N del Material Compuesto $V_f=0,40$ $V_m=0,60$	124
Figura 50	Probeta #2 al 40 % en fibra de vidrio y 60% de resina de poliéster	124

Figura 51 Probeta #5 al 40 % en fibra de vidrio y 60% de resina de poliéster	125
Figura 52 Probeta #8 al 40 % en fibra de vidrio y 60% de resina de poliéster	125
Figura 53 Probeta #11 al 40 % en fibra de vidrio y 60% de resina de poliéster	126
Figura 54 Curva S-N del Material Compuesto $V_f=0,30$ $V_m=0,70$	126
Figura 55 Probeta #3 al 30 % en fibra de vidrio y 70% de resina de poliéster	127
Figura 56 Probeta #6 al 30 % en fibra de vidrio y 70% de resina de poliéster	127
Figura 57 Probeta #9 al 30 % en fibra de vidrio y 70% de resina de poliéster	128
Figura 58 Probeta #12 al 30 % en fibra de vidrio y 70% de resina de poliéster	128
Figura 59 Curva S-N del Material Compuesto al 30%, 40%, 50% de Fibra de Vidrio.....	129

Resumen

El presente proyecto de trabajo tiene por objetivo obtener las curvas de vida S-N de un material compuesto fabricado con matriz de resina de poliéster y refuerzos de fibra de vidrio en 3 porcentajes diferentes siendo estos de 30% fibra – 70% resina, 40% fibra – 60% resina y 50% fibra – 50% resina para cada lote a fabricar, el lote está formado por 15 probetas en las cuales se realizaron ensayos a tracción y a fatiga. Al no contar con una norma que ejecute los ensayos a fatiga por flexión rotativa para materiales compuestos se utilizó la norma ASTM E-466, la cual direcciona los lineamientos a seguir para realizar el ensayo. El ensayo a fatiga por flexión rotativa se realiza en la máquina R.R. Moore donde las cargas en los puntos de apoyo de la probeta están en dirección en el eje Y +, dirección provocada por el uso de una estructura metálica que ayudó a evitar la deflexión de la probeta en el estado estático. Las cargas aplicadas para llegar a la rotura en la probeta son del 80%, 40%, 60% y 20% del esfuerzo último a tracción. Además, se realiza el cálculo del módulo elástico práctico y teórico de la probeta para evaluar su variación, en función a esto se obtiene un factor de corrección que se aplica a las cargas para evitar pérdidas provocadas por la geometría de la estructura que modifica la dirección en las cargas de los apoyos de la probeta. Con los valores obtenidos del ensayo a fatiga por flexión rotativa, se realiza un análisis de dispersión de datos para poder graficar la curva S-N, determinando hasta que ciclos puede trabajar cada porcentaje de probeta y esto genera un importante aporte para futuros diseños en la industria que conlleve el uso de materiales compuestos a base de fibra de vidrio y resina de poliéster.

Palabras clave: Modulo elástico, Máquina R.R. Moore, Curvas de vida S-N, Material compuesto.

Abstract

The objective of this work project is to obtain the S-N life curves of a composite material made of fiberglass and polyester resin in 3 different percentages, these being 30% fiber - 70% resin, 40% fiber - 60 % resin and 50% fiber – 50% resin for each batch to be manufactured. The batch will consist of 15 test samples in which tensile and fatigue tests will be carried out. In the absence of a standard that executes the fatigue tests by rotary flexion for composite materials, the ASTM E-466 standard was used, which directs the guidelines to follow to carry out the test. The rotary bending fatigue test is carried out on the R.R. Moore where the loads in the support points of the specimen are in the direction of the Y + axis, a direction caused by the use of a metallic structure that helped to avoid the deflection of the specimen in the static state. The loads applied to reach the break in the test sample are 80%, 40%, 60% and 20% of the ultimate tensile stress. In addition, the practical and theoretical elastic modulus of the specimen is calculated to evaluate the variation based on this, a correction factor is obtained that is applied to the loads to avoid losses caused by the geometry of the specimen. structure that modifies the direction in the loads of the supports of the specimen.

Lastly, with the values obtained from the rotary bending fatigue test, a data dispersion analysis is carried out to be able to graph the S-N curve, determining up to what cycles each batch of test pieces can work and this generating a valuable contribution for future designs in the industry that involves the use of composite materials based on fiberglass and polyester resin.

Keywords: Elastic modulus, Machine R.R. Moore, Life S-N curves, Composite material.

Capítulo I

Generalidades

Introducción

Los materiales compuestos, hoy en día son muy requeridos por la industria debido a sus ventajas y facilidades de trabajo, siendo alternativas de uso en vez del acero. El avance en la tecnología de los materiales compuestos y sus aplicaciones ha permitido desarrollar un entorno investigativo debido a sus altas propiedades mecánicas, la resistencia a cargas dinámicas que estos tienen resulta de interés para el análisis de su comportamiento en la industria aeronáutica, automotriz, metalmecánica, etc.

Un elemento sometido a cargas dinámicas es el resultado de soportar esfuerzos cíclicos, esfuerzos que son causantes de la mayor cantidad de fallas dentro de un conjunto de elementos siendo contraproducentes para el desarrollo del sistema. Consecuencia de esto se realiza el estudio experimental del comportamiento de materiales compuestos que permitan mejorar las propiedades de elementos que son sometidos a cargas dinámicas, por tal motivo es fundamental determinar las curvas de vida de los materiales, identificando sus límites de resistencia a la fatiga variando su fracción volumétrica de los elementos que forman el compuesto.

El material compuesto es la combinación de un matriz polimérica y fibras de refuerzo, donde en la matriz se usará elementos termoestables como la resina de poliéster y en fibras la fibra de vidrio tipo E, siendo esta la más comercial en la industria, estas fibras mejoraran las propiedades mecánicas en el compuesto tales como resistencia, rigidez, etc.

La máquina de ensayo R.R. Moore, permite realizar pruebas en probetas aplicando fatiga a flexión rotativa, para lo cual, se desarrolló el rediseño de los componentes mecánicos con la finalidad de realizar el ensayo a fatiga en probetas de materiales compuestos en base de fibra de vidrio.

Antecedentes

El estudio del fenómeno de fatiga como propiedad mecánica de los materiales, surge a causa de la determinación del comportamiento de los elementos mecánicos que se someten a cargas cíclicas en el tiempo; con el fin de conocer sus límites de vida útil. En los inicios del siglo XIX, August Wohler implantó la denominación “Límite de resistencia a la fatiga”, en la cual estimaba mediante el desarrollo de ensayos en probetas fabricadas, la cantidad de ciclos que puede soportar el material hasta llegar al punto de rotura, y así, representar en una gráfica esfuerzo vs vida el comportamiento de diferentes tipos de materiales; así, se puede determinar los esfuerzos máximos que soporta el material y los ciclos de vida útil que presenta. Los ensayos a la fatiga varían en función del tipo de carga a la que se encuentra sometido el elemento, estos pueden ser de tipo: torsional, flexionante, de combinación, entre otros.

En la actualidad los materiales compuestos son un área del conocimiento de la ingeniería que se encuentra en constante investigación, esto debido a sus características y propiedades que presentan dichos materiales, por ejemplo: su peso ligero, alta resistencia, elevada rigidez, buena resistencia a la fatiga y corrosión. La fibra de vidrio es el conjunto de hilos de vidrio de sección diminuta que se entrelazan entre sí para la generación de un mallado, tiene la capacidad de reforzar a los materiales al momento de elaborar mezclas con resinas. Por lo tanto, los materiales compuestos son dependientes de la fracción de volumen de la fibra y la matriz que aportan un incremento de la resistencia mecánica. En la industria, la fibra de vidrio es un material muy utilizado en tanques de almacenamiento, perfiles estructurales, aislamientos térmicos, carrocería de automóviles y accesorios, gracias a los beneficios que proporciona al material. (Pertuz Comas et al., 2018)

Definición del problema

Actualmente el Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”, cuenta con la máquina de ensayos R.R. Moore para el estudio del fenómeno de fatiga en probetas solamente de materiales metálicos específicamente en aceros de

transmisión. En función del último apartado mencionado, hace que se deba rediseñar la máquina de ensayos de R.R. Moore con la finalidad de permitir el estudio del fenómeno de fatiga en probetas de materiales compuestos en base de fibra de vidrio.

A lo largo de los años el proceso de elaboración de probetas de material compuesto en base de fibra de vidrio ha sido un tema de interés para su estudio debido a los beneficios que presentan sus propiedades mecánicas y su variedad de uso en la industria automotriz, por lo que permitirá estudiar y describir de forma detallada el comportamiento de las curvas esfuerzo – vida generadas a partir de una carga cíclica aplicada a través de la máquina de ensayos R.R. Moore en las probetas de material compuesto previamente fabricadas.

Actualmente en el Ecuador el estudio del comportamiento mecánico de materiales compuestos sometidos a cargas dinámicas ha resultado ser nulo, por lo tanto, es de gran utilidad el análisis del comportamiento mecánico de estos materiales que se encuentran bajo la aplicación de cargas cíclicas, de manera que se generen nuevos conocimientos en función del procesamiento de datos obtenidos bajo el desarrollo del proyecto de titulación.

Justificación

El presente proyecto representa una alternativa innovadora dentro del uso de los materiales compuestos en base de fibra de vidrio, importante para analizar el fallo por fatiga que se da en, máquinas rotativas, tornillos, alas de aviones, productos de consumo, ruedas de ferrocarril, plataformas marítimas, barcos, vehículos y puentes. Actualmente la máquina R.R. Moore es utilizada para realizar ensayos a fatiga en acero de transmisión. Para poder realizar estos ensayos en materiales compuestos, se debe adecuar la máquina ejecutando un rediseño mecánico, con el fin de obtener el mismo procedimiento hacia los materiales compuestos.

En los últimos años, ha surgido una necesidad de buscar nuevos materiales compuestos para la fabricación de elementos mecánicos en donde la fibra de vidrio presenta muy buenas propiedades tales como: no presentar sensibilidad a las variaciones de

temperatura e higrometría, presentando un bajo coeficiente de expansión lineal, gran capacidad de combinarse con muchas resinas sintéticas y ciertas matrices minerales, como el cemento.

En el país no existe información del análisis de curvas esfuerzo – vida de materiales compuestos en base de fibra de vidrio cuyo uso principal se evidencia en la reparación automotriz, considerando que tampoco se evidencian simulaciones a fatiga de elementos sólidos en base a un material compuesto. Es por esto por lo que el estudio de fatiga a flexión rotativa en materiales compuestos en base de fibra de vidrio por medio de la obtención de curvas Esfuerzo – Vida del material permite una mejor comprensión de cómo actúan los materiales compuestos ante cargas dinámicas.

Como resultado, este proyecto será de utilidad para el laboratorio de Mecánica de Materiales en donde se podrán realizar ensayos a la fatiga en materiales compuestos en base de fibra de virio.

Alcance

El presente proyecto tiene como objetivo determinar las curvas Esfuerzo–Vida de materiales compuestos en base de fibra de vidrio, utilizando el método de R. R Moore. Para lo que se adecuará la máquina de fatiga de R. R Moore del Laboratorio de Mecánica de Materiales del DCEM (LMM), que actualmente se la utiliza para realizar ensayos a fatiga en acero de transmisión. En la adecuación de la máquina de fatiga se realizará un rediseño mecánico que ayude a realizar los ensayos de resistencia a la fatiga en materiales compuestos en base de fibra de vidrio. Luego se modificará elementos desgastados que se presente en la máquina para un mejor desempeño. A parte, se diseñará y manufacturará un molde bajo normativas existentes, con el cual se fabricará las probetas de material compuesto, utilizando materiales como base la resina y fibra de vidrio, disponibles a nivel nacional y que se encuentran en los talleres de reparaciones automotrices. Se hará un estudio previo para determinar el porcentaje en volumen de la cantidad de fibra a considerar en los ensayos;

tomando en cuenta un mínimo de tres porcentajes en volumen de fibra de vidrio para un análisis estadístico del tamaño de muestra a utilizar.

Lo siguiente es fabricar las probetas y ejecutar los ensayos a fatiga utilizando la máquina de R. R Moore, determinando las curvas (Esfuerzo – Vida) para mínimo tres porcentajes en volumen de fibra de vidrio, con su correspondiente análisis de resultados.

Como resultado del proyecto:

- La Máquina R. R Moore del LMM, será rediseñada para ensayos a fatiga en material compuesto en base de fibra de vidrio.
- Se tendrá el diseño y manufactura de un molde para probetas a fatiga de material compuesto en base de fibra de vidrio.
- Se realizará el análisis estadístico para determinar el tamaño de muestra.
- Se determinarán las Curvas Esfuerzo-Vida para diferentes porcentajes en volumen de fibra de vidrio.
- Se realizará un análisis de los resultados obtenidos en el laboratorio.

Objetivos

Objetivo general

- Determinar las curvas esfuerzo-vida de materiales compuestos en base de fibra de vidrio, utilizando el método de R.R. Moore.

Objetivos específicos

- Adecuar mecánicamente la máquina de ensayos a la fatiga en acero del LMM, para realizar ensayos a fatiga en material compuesto en base de fibra de vidrio.
- Obtener las curvas esfuerzo-vida de material compuesto en base de fibra de vidrio.

Capítulo II

Marco Teórico

Materiales compuestos

Los materiales compuestos son materiales que se componen de dos o más elementos diferentes que al momento de ser combinados producen un material con propiedades únicas, y que a su vez pueden lograr mejorar ciertas propiedades mecánicas en función de la necesidad de su aplicación. (Héctor & Salazar, 2011)

Los materiales compuestos se caracterizan principalmente por su ligereza, elevada resistencia y a su vez su elevado costo de adquisición; sin embargo, sus aplicaciones son variadas dentro de la industria mecánica, automotriz, aeroespacial, construcción y hasta la médica, he ahí la importancia del estudio del comportamiento de los materiales para el desarrollo de la ciencia y tecnología. (Jácome et al., 2022)

Los materiales compuestos presentan varias fases químicamente distintas, en donde las propiedades mecánicas son superiores a la simple suma de propiedades de cada componente, para lo cual, las propiedades del material compuesto en base de fibra de vidrio y resina dependen de la geometría, elementos constituyentes y la orientación de las fibras a lo largo de la probeta fabricada. (Rodríguez, 2013)

Entre las principales propiedades que se pueden mejorar creando un material compuesto son:

- Mejora la rigidez
- Aislamiento térmico y acústico
- Comportamiento en función de la temperatura
- Eleva la vida a la fatiga

Es necesario mencionar, que en los materiales compuestos no se mejora significativamente las propiedades en su totalidad, por lo que, la finalidad del diseño de

materiales compuestos es la creación de un tipo de material que presente características propias para su uso independiente. Por ejemplo, la elaboración de un material compuesto en base de fibra de vidrio con resina tiene una elevada relación entre peso-resistencia y peso-rigidez, lo que les hace un material innovador y de uso común en aviones o vehículos espaciales, con la finalidad de garantizar una elevada resistencia pero que no se vea alterado el peso de la estructura.

Clasificación de los materiales compuestos

Los materiales compuestos suelen clasificarse en función de su forma o de la naturaleza de su fase dispersa, que se forman por dos o más componentes que se pueden distinguir de forma física y tienen la capacidad de separarse mecánicamente. (Hull, 1987)

Tabla 1

Clasificación de los materiales compuestos

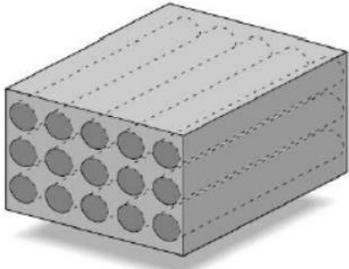
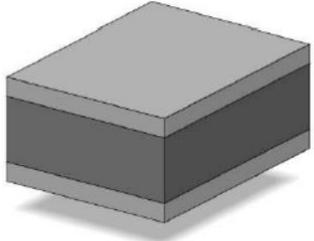
Tipo	Ejemplos
Materiales compuestos naturales	<ul style="list-style-type: none"> • Madera / Bambú • Hueso / Músculos / Otros Tejidos
Materiales microcompuestos	<ul style="list-style-type: none"> • Aleaciones metálicas (aceros) • Termoplásticos endurecidos (poliestireno de impacto, ABS) • Hojas para moldeo continuo (SMC) • Termoplásticos reforzados
Macrocomposites (Productos ingenieriles)	<ul style="list-style-type: none"> • Acero galvanizado • Vigas de hormigón armado • Palas de helicópteros

Nota. La tabla hace referencia a la clasificación de los materiales compuestos de acuerdo con el tipo de material. Tomado de *An introduction to composite materials* (p.1), por (Hull, 1987).

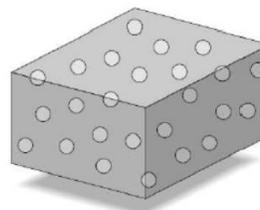
Otro tipo de clasificación de los materiales compuestos es:

Tabla 2

Clasificación de los materiales compuestos según la forma de sus constituyentes

TIPO	DESCRIPCIÓN	EJEMPLO
	<ul style="list-style-type: none"> • Cuyos elementos constituyentes son las fibras en una matriz (resinas). 	<ul style="list-style-type: none"> • Adobe • Yeso • Cañizos
Materiales compuestos fibrosos	<ul style="list-style-type: none"> • Las fibras pueden variar, así como también su matriz dependiendo la resina orgánica o inorgánica. • También denominados compósito fibro-reforzados. 	 <p>Compósito reforzado con Fibras</p>
Materiales compuestos laminados	<ul style="list-style-type: none"> • Material con diferentes capas de componentes. • Conocidos como materiales tipo Sándwich en donde distintos materiales son unidos por presión. 	<ul style="list-style-type: none"> • Maderas contrachapas  <p>Compósito reforzado con Láminas</p>

TIPO	DESCRIPCIÓN	EJEMPLO
Materiales compuestos de partículas	<ul style="list-style-type: none"> • Compuestos de partículas en su matriz 	<ul style="list-style-type: none"> • Morteros • Hormigones
	<ul style="list-style-type: none"> • Las partículas pueden variar en tamaño y distribución. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aleaciones ligeras con partículas cerámicas



Compósito reforzado con Partículas

Nota. Tomado de *Módulos El Mundo de los Materiales MWM “Composite”* (p.18), por (Martínez et al., 2021)

La clasificación de los materiales compuestos se basa en función de su composición de la matriz, los tipos y la distribución de los refuerzos, las diferentes propiedades mecánicas de cada componente, el proceso de fabricación y la necesidad de la aplicación a la cual estará sometida; por lo que estos aspectos permiten categorizar a los materiales compuestos.

Propiedades de los materiales compuestos

Los materiales compuestos presentan una variedad de propiedades mecánicas que los convierten en materiales únicos; estas propiedades difieren entre sí, dependiendo de la composición de la matriz y los distintos refuerzos posibles que se pueden utilizar para las distintas aplicaciones, por lo que se manejan diversas combinaciones en sus propiedades como, por ejemplo:

- Resistencia mecánica. - Su elevada resistencia mecánica se debe a la combinación de refuerzos y matriz, que al momento de trabajar en conjunto tiene la capacidad de soportar cargas y deformaciones.

- Rigidez. - El uso de diferentes fibras beneficia al material compuesto a proporcionarle un incremento en su rigidez de manera significativa ya que presenta un mayor valor comparado a la matriz que la compone.
- Ligereza. - El peso de los materiales compuestos está relacionado con los tipos de refuerzos que lo contiene, como es el caso de las fibras que permiten aligerar el peso del material.
- Resistencia a la corrosión. - Esta propiedad mecánica está relacionada con la selección de la matriz, sea este el caso del uso de matrices poliméricas; sin embargo, también se puede utilizar matrices metálicas siempre que se utilicen recubrimientos o aditivos que favorezcan a la resistencia a la corrosión.
- Resistencia a elevadas temperaturas. - Sea este el caso de los refuerzos cerámicos o de matrices cerámicas, las cuales tiene la capacidad de soportar elevadas temperaturas sin verse afectada su estructura significativamente, por lo que en la actualidad son utilizados en aplicaciones espaciales, y de aviación.

Las propiedades de los materiales compuestos están relacionadas con las propiedades de la matriz y el refuerzo, geometría y distribución de los componentes o fibras, es decir, un aspecto relevante es el fraccionamiento volumétrico de la matriz y su refuerzo, ya que de éste dependerá el mejoramiento en las propiedades mecánicas de los materiales, de modo que se obtengan propiedades únicas para cada material compuesto. (Rodríguez, 2013)

Según un estudio de (Gibson, 2010), “Los materiales compuestos suelen tener una alta resistencia a la tracción y a la compresión, una alta rigidez y una baja densidad en comparación con los materiales tradicionales”. Es por ello por lo que los materiales compuestos pueden ser diseñados para ser resistentes a la corrosión y al fuego, lo que los hace ideales para aplicaciones en ambientes hostiles.

Aplicaciones de los materiales compuestos

A lo largo de la historia se han desarrollado un sin número de aplicaciones a gran escala en la que se incluyen a los materiales compuestos como una opción accesible y conveniente para las empresas, por ejemplo, el Boeing 777, donde se utilizan materiales compuestos en la estructura del avión, con el objetivo de aligerar peso y garantizar su funcionalidad en extremas condiciones medioambientales y sobre todo la permisibilidad de implementar sensores dentro de las estructuras como una medida de control y mantenimiento. Otro gran ejemplo del uso de los materiales compuestos es el Airbus A380, el cual está fabricado a base de láminas de vidrio, epoxi y aluminio; en donde casi su totalidad de estructura fabricada está hecha a base de materiales compuestos tipo sándwich. (Kong et al., 2013)

Figura 1

Aplicación de materiales compuestos (Boeing 777)



Nota. Tomado de *Boeing 777*, por (Boeing, 2023), Boeing (<https://www.boeing.es/productos-y-servicios/commercial-airplanes/777.page>).

Entre las principales aplicaciones de los materiales compuestos, son:

Figura 2

Aplicaciones de los materiales compuestos

Industria aeroespacial

- Fabricación de estructuras para aviones y cohetes.
- Implementación de alas, fuselajes, paneles, otros.

Automotriz

- Reconstrucción de carrocería, chasis y elaboración de piezas estructurales que conforman al automóvil.

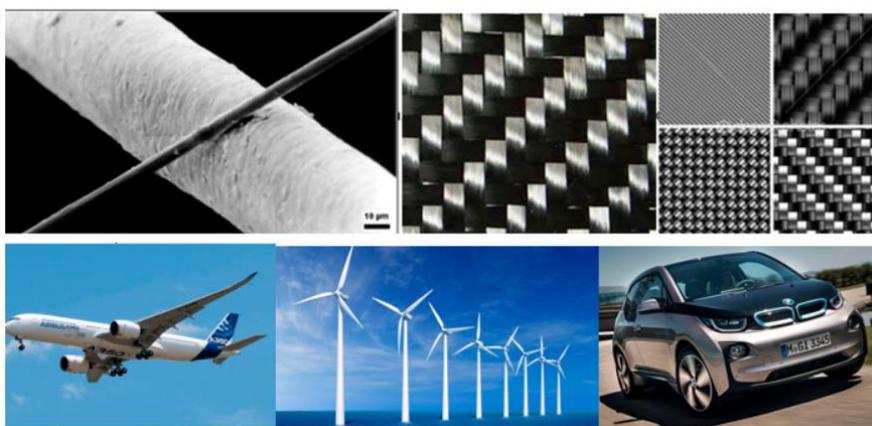
Energía

- Fabricación de palas de turbinas generadoras de energía eólica.
- Mejoran la eficiencia de las palas.

Nota. La figura hace referencia a las aplicaciones de los materiales compuestos. Tomado de *Patrones y mecanismos de fractura en los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras*, por (Rodríguez, 2013)

Figura 3

Aplicación de materiales compuestos



Nota. Tomado de *Composite o Materiales Compuestos*, por (Girón Martínez, 2014), eadic (<https://eadic.com/blog/entrada/composite-o-materiales-compuestos/>), EADIC 2022.

Actualmente existe una gran variedad de aplicaciones de materiales compuestos, sin embargo, estas son las principales en donde se evidencia la capacidad de personalizar las propiedades mecánicas de los materiales en función de las necesidades, lo que les convierte en materiales de gran interés para ser estudiados, debido a los beneficios que ofrecen.

Proceso de fabricación de los materiales compuestos

El proceso de fabricación de los materiales compuestos se conforma por tres subprocesos que son: Diseño, Método y Materiales. (Daniel & Ishai, 2006)

Existen diferentes métodos que permiten fabricar los materiales compuestos; cada proceso depende de las especificaciones del material y la aplicación a la cual estará sometido; por lo que las propiedades del material son directamente proporcionales al método de fabricación utilizado. Sin embargo, de manera general, la elaboración de los composites, son:

Diseño

Es la etapa inicial de los materiales compuestos, en la cual se diseña la raíz o estructura que tendrá el material. En esta etapa se definen subetapas como son la selección de los componentes, las proporciones y la orientación de las fibras.

Es la etapa en la cual se consideran todos los aspectos de fabricación incluyéndose los moldes y matrices que serán utilizados para la elaboración del material, tomando en cuenta todas las propiedades mecánicas de sus componentes.

Preparación de fibras

Se selecciona el tipo de fibra que contendrá el material compuesto, por ejemplo:

- Fibra de carbono
- Fibra de vidrio
- Kevlar

Se define la orientación de las fibras en función de las especificaciones de los materiales; la orientación de las fibras puede variar entre 0°, 45°, 90°; todo dependerá de las

características finales que se desea tener en el material, así como también el comportamiento deseado frente a cargas cíclicas o estáticas.

En esta etapa el rollo de fibra es cortado de forma longitudinal y distribuidas en función del análisis previo realizado en la etapa de diseño.

Preparación de la matriz

La preparación de la matriz resulta importante a la hora de garantizar una buena adherencia que permita entrelazar las fibras con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas. Existen diferentes tipos de matrices que pueden ser compatible con la variedad de fibras, como es el caso de:

- Resina Epoxi
- Resina de Poliéster
- Polímero
- Cerámicos
- Metales

La matriz es mezclada y preparada de acuerdo con las fichas técnicas de los fabricantes, es por ello por lo que cada matriz tiene la capacidad de mejorar propiedades mecánicas del material compuesto en función de las proporciones de químicos añadidas a la solución. (Daniel & Ishai, 2006)

Moldeo

El proceso de moldeo para los materiales compuestos difiere en diferentes técnicas, en función de los requerimientos de aplicación. En este apartado existe una gran variedad de moldeo que permiten fabricar los materiales compuestos, por ejemplo:

- Moldeo por compresión
- Moldeo por inyección
- Moldeo por vacío
- Moldeo por transferencia de resina

De forma general, todos los procesos de moldeo consisten en colocar las redes de fibra y colocar la matriz a su alrededor, comportándose como una capa líquida que favorece la compactación de las fibras.

Curado

La etapa de curado es sin duda, una etapa importante en el proceso de fabricación ya que permite obtener las propiedades mecánicas deseadas; tener un buen proceso de curado en los materiales compuestos garantiza el alcance y mejoramiento de sus resistencias mecánicas.

El proceso de curado consiste en aplicar presión y calor hacia las probetas, de manera que la matriz se endurezca y se genere una adhesión de firmeza en las fibras. El tiempo de curado y la temperatura sometida varía en función de la matriz aplicada; para ello el fabricante en su ficha técnica especificará el rango de temperaturas a la cual puede estar sometida la matriz sin que se vea deteriorado. (Daniel & Ishai, 2006)

Acabado

El proceso de acabado de los materiales compuestos es la etapa final del proceso de fabricación, en esta etapa se evidencian subprocesos, como:

- Acabados superficiales
- Recorte de forma
- Alcance de tamaño
- Aplicación de revestimientos
- Aplicación de pinturas
- Alcance de especificaciones

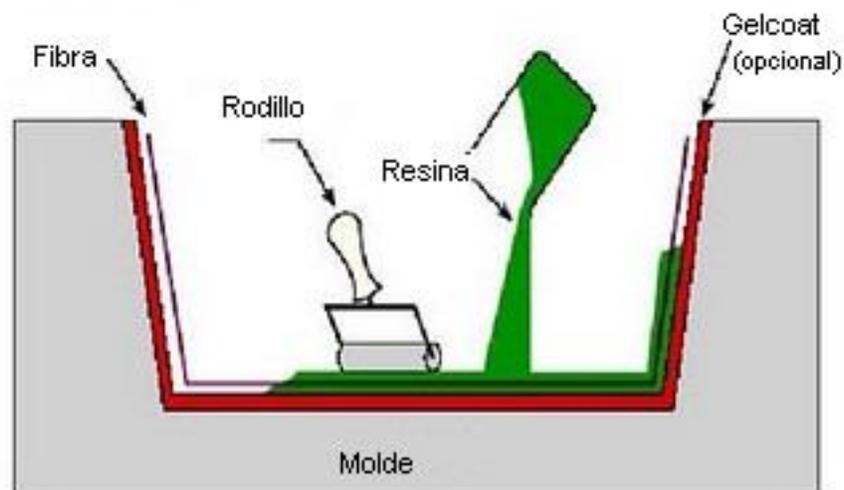
El proceso de acabado permite eliminar pequeñas imperfecciones que por factores externas durante el proceso de fabricación pudieron haberse generado defectos en la estructura del material, más, sin embargo, el proceso de acabado no debe ser invasivo a la

hora de cambiar la geometría del material, ya que podría verse afectada sus propiedades y las especificaciones solicitadas.

El método más conocido y práctico que se utiliza para la fabricación de los materiales compuestos de fibras es el conocido como **Layup**, que consiste en distribuir las fibras sobre un molde generalmente de material metálico, en él se colocan por capas los cortes de fibra y se coloca resina mediante el uso de brochas, de manera que se compactan las fibras de vidrio entre si hasta llegar a las especificaciones deseadas de moldeo y espesor. En estos procesos se utiliza en la etapa de curado hornos que permitan acelerar el secado del material, por ello, es común utilizar este tipo de método de fabricación a materiales compuestos de poliéster y fibras de vidrio con geometrías no complejas y regulares. (Daniel & Ishai, 2006)

Figura 4

Esquema del proceso de fabricación tipo Layup



Nota. Tomado de *Tecnología de los plásticos*, por (Mariano, 2011),

(<https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/11/moldeo-manual-de-materiales-compuestos.html>).

Fibra de vidrio

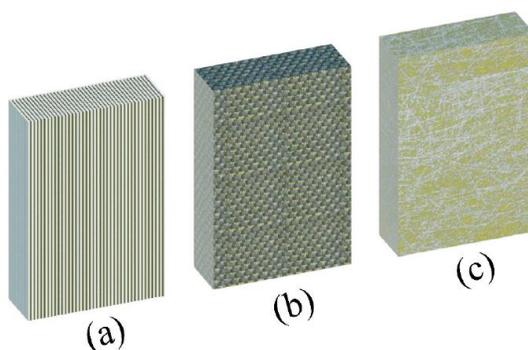
La fibra de vidrio es un material compuesto que contiene filamentos de vidrio tejidos que permite formar una estructura mallada. La fibra de vidrio es conocida por su resistencia a la tracción y a la compresión, así como por su durabilidad y su gran capacidad para soportar ambientes donde la temperatura es extrema.

La fibra de vidrio es considerada la fibra más común de ser utilizada, debido a su costo en comparación con otro tipo de fibra como son las de carbono o aramidas, utilizando como matriz a la resina de poliéster como la más compatible con las fibras. Cuando se somete al vidrio, considerando que es un material frágil a esfuerzos tensionales, los defectos que presentan en un sólido son aleatorios, la ruptura se genera a esfuerzos mucho menores que su propia resistencia teórica. (Corbella & Maguyo, 2004)

Las propiedades mecánicas son en general anisotrópicas y varía según la distribución de las fibras en su interior del material compuesto, las cuales pueden ser ordenadas de diferentes formas, como:

Figura 5

Tipos de configuración de fibras de vidrio



Nota. Imágenes que representan a) Fibras unidireccional continua b) Fibras tejidas continuas c) Fibras de hebras cortadas. Tomado de *Effect of Fibers Configuration and Thickness on Tensile Behavior of GFRP Laminates Exposed to Harsh Environment*, por (Bazli et al., 2019).

Entre las características que presenta la fibra de vidrio está la versatilidad para presentarse en diferentes formas, como:

- Tubos
- Mallas
- Tejidos

La fibra de vidrio está diseñada principalmente para ser compatible con resinas de tipo epoxica y poliéster, teniendo características de tipo:

- Fácil impregnación
- Uniformidad
- Elevada resistencia a la tracción

Existen diferentes tipos de fibras de vidrio, dependiendo la composición de estas, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 3

Composición del vidrio (% en peso)

	Vidrio E	Vidrio C	Vidrio S
SiO ₂	52,4	64,4	64,4
Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	14,4	4,1	25
CaO	17,2	13,4	-
MgO	4,6	3,3	10,3
Na ₂ O, K ₂ O	0,8	9,6	0,3
Ba ₂ O ₃	10,6	4,7	-
BaO	-	0,9	-

Nota. La tabla hace referencia al porcentaje de composición del vidrio E, C, S. Tomado de *An introduction to composite materials* (p.16), por (Hull, 1987).

Fibra de vidrio tipo E

El vidrio de tipo E o también conocido como vidrio eléctrico es un material muy utilizado en la fabricación de materiales compuestos en base de fibras (90% de uso), debido a sus elevadas propiedades de resistencia, rigidez, aislante eléctrico y de resistencia al desgaste. El proceso de fabricación de las fibras de vidrio de tipo E, se obtienen mediante la fundición del material en crisoles, teniendo como resultado finos filamentos que por factores externos como la gravedad se permite estirar de forma mecánica fibras de vidrio con diámetros nominales de aproximadamente $11\mu\text{m}$, las cuales al unirse y colocarse en tambores giratorios benefician a la obtención de metrajes por minutos mediante el uso de máquinas. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que las propiedades del material están ligadas de forma directa con las condiciones del proceso de fabricación y el ambiente al que está sometida la fibra de vidrio. (Hull, 1987)

Figura 6

Fibra de Vidrio tipo E (Eléctrica)



Nota. La imagen hace referencia al tipo de fibra de vidrio tipo E. Tomado de *Tipos de Fibra de Vidrio*, por (Yuridia, n.d.), PLAREMESA (<https://www.plaremesa.net/tipos-de-fibra-de-vidrio/>).

Propiedades de la fibra de vidrio

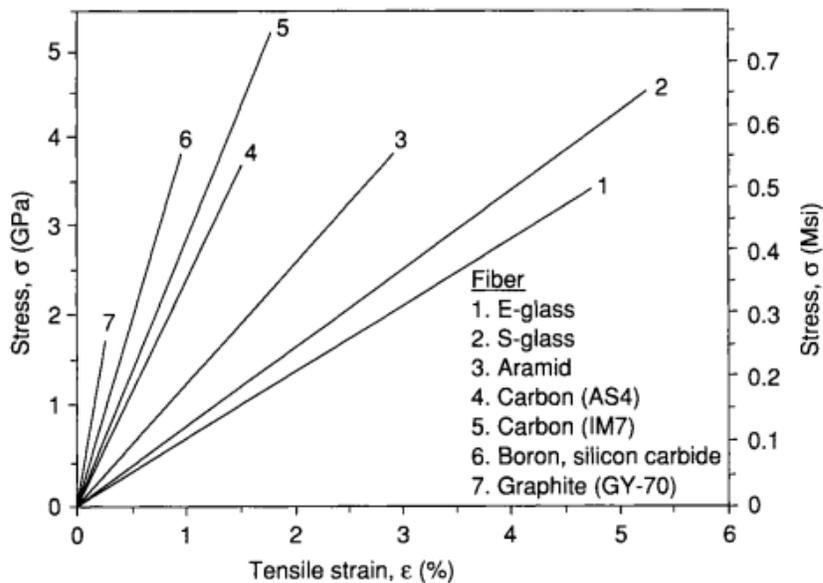
La fibra de vidrio es conocida por sus elevadas propiedades mecánicas y térmicas.

Entre las principales propiedades y características que contiene la fibra de vidrio son:

- Resistencia mecánica.
- Resistente a la tracción.
- Resistente a elevadas temperaturas.
- Baja conductividad térmica.
- Maleable.
- Elevada adherencia entre fibra de refuerzo-matriz.

Figura 7

Curvas esfuerzo-deformaciones de fibras de refuerzos



Nota. Tomado de *Engineering mechanics of composite materials* (p.32), por (Daniel & Ishai, 2006).

Resinas termoestables

Las resinas termoestables se definen como matrices de materiales compuestos que mediante el uso de reacciones químicas irreversibles se vuelve un material rígido y resistente a

elevadas temperaturas. Esta reacción química se denomina reticulación, en donde las moléculas se entrelazan entre sí formando una estructura tridimensional con elevada rigidez.

Dentro del grupo de resinas termoestables se encuentran dos grandes subgrupos como lo son las resinas epoxica y de poliéster.

La principal diferencia de las resinas termoestables respecto con las resinas termoplásticas es, que la resina termoplástica en estado natural se las encuentra de forma sólida y es necesario incrementar su temperatura para conseguir un estado líquido y utilizar en las diferentes aplicaciones; es decir, las resinas termoestables tienen la capacidad de cambiar de estado de líquido a sólido mediante el uso de aceleradores de curado que tienen la capacidad de solidificarla. (Jácome et al., 2022)

Las resinas termoestables son utilizadas en diferentes aplicaciones industriales en el área de los materiales compuestos, ocupando una parte fundamental como lo son las matrices que finalmente servirán como soporte de las fibras de refuerzos. Entre las principales resinas termoestables, están:

- Resina epoxi
 - Presenta una buena adherencia.
 - Aplicaciones en la industria aeroespacial, automotriz, electrónica.
- Resina de poliéster
 - Buena resistencia a la intemperie y agua.
 - Resistencia a la tracción y torsión.
 - Amplio uso en la industria de construcción.
- Resina de fenol-formaldehído
 - Elevada resistencia térmica.
 - Utilizadas en la fabricación de aislamiento eléctricos.

Las resinas termoestables se pueden clasificar en función de las temperaturas de uso en las diferentes aplicaciones, por ejemplo:

Tabla 4

Clasificación de resinas termoestables según el estado de temperaturas

Temperaturas	Resina Termoestable	Tipos
Bajas Temperaturas	Poliéster	Isoftálica/ Ortoftálica
Medias Temperaturas	Vinilester / Epoxi	
	Bismaleimida / Polimida	
Altas Temperaturas	Esteres cianato / Polieteramida	

Nota. La tabla hace referencia a la clasificación de los tipos de resinas termoestables en función del estado al que se encuentra a diferentes temperaturas. Tomado de *Materiales Compuestos I*, (p.47), por (Miravete et al., 2007).

Fenómeno de la fatiga

La fatiga es un tipo de falla progresivo que sufre un material bajo la acción de cargas repetitivas o también conocidas como cargas cíclicas. Este fenómeno es relevante en materiales estructurales que se encuentran sometidos a cargas dinámicas, como metales, polímeros y caso especial los materiales compuestos. (Velásquez Salazar, 2018)

Cuando se aplican cargas dinámicas a un material específico, se evidencia la generación de deformaciones en la estructura del material. Aunque dichas deformaciones pueden incluir por debajo del límite elástico, es decir, se pueden generar tensiones internas que con el tiempo se van a ir acumulando de forma que se produzca la falla a través de agrietamientos en su microestructura.

El fenómeno de fatiga consta de 4 etapas, que son:

- 1) Iniciación de agrietamientos
 - a. Se producen en zonas donde se generan concentradores de tensiones, debido a factores como:
 - i. Irregularidades en la superficie.
 - ii. Cambios de sección.

- 2) Propagación de las grietas
 - a. El agrietamiento se propaga en función de las cargas repetitivas que se apliquen en la misma zona de manera que se extienda y se contraiga en cada ciclo de carga.
- 3) Crecimiento y unión de grietas
 - a. A medida que aumentan el número de agrietamientos, estos tienen la capacidad de unirse y generar nuevos o más grandes agrietamientos en su microestructura.
- 4) Fractura final
 - a. También conocido como fallo a la fatiga, se produce cuando la grieta alcanza su tamaño crítico y provoca la falla o rotura del material compuesto.

Fatiga según el número de ciclos

La fatiga según el número de ciclos hace referencia a la vida útil que puede llegar a tener un material bajo el efecto de cargas dinámicas. El número de ciclos puede resistir antes de la aparición de una fractura en el material, por lo que es necesario considerar un estudio previo del diseño de materiales con el objetivo de garantizar la resistencia de los materiales previamente seleccionados.

El número de ciclos para el fenómeno de fatiga en los materiales puede variar entre:

Tabla 5

Número de ciclos para el fenómeno de fatiga

TIPO	DESCRIPCIÓN
	<ul style="list-style-type: none"> • Rango entre 10^4 y 10^5 ciclos. • Cargas aplicadas por debajo del límite elástico.
Altos Ciclos	<ul style="list-style-type: none"> • El fallo de la probeta es considerado en la rotura del material.

TIPO	DESCRIPCIÓN
Ciclos Medios	<ul style="list-style-type: none"> • Rango entre 10^3 y 10^4 ciclos. • Las cargas cíclicas superan el límite elástico.
Bajos ciclos	<ul style="list-style-type: none"> • Rango menor que 10^3 ciclos. • Las cargas superan el límite elástico y su falla se da por la aparición temprana de grietas. • Basado en el análisis de deformaciones y no de tensiones.

Nota. La tabla hace referencia al tipo de fatiga según el número de ciclos. Tomado de *Caracterización de las propiedades mecánicas del duralón*, por (Velásquez Salazar, 2018).

Fatiga a flexión rotativa

La flexión rotativa es considerada un tipo de carga aplicada a elementos mecánicos donde existe un momento de torsión combinado de una carga axial. En este caso los efectos de deformación se dan debido a la torsión y flexión provocada en el elemento.

Cuando un elemento mecánico se encuentra sometido a una flexión rotativa, se produce un efecto rotativo alrededor del eje longitudinal, juntamente con una flexión en el eje transversal o perpendicular al eje longitudinal. Dicha combinación de esfuerzos se distribuye en tensiones sobre el material, generando así una rotura por flexión rotativa.

La máquina de R.R. Moore, es ideal para desarrollar ensayos a flexión rotativa, ya que permite generar los dos tipos de cargas generando así esfuerzos en probetas inicialmente en aceros de transmisión, sin embargo, se plantea el desarrollo de ensayos a fatiga por flexión rotativa en diferentes materiales como: Polímeros, Compuestos, otros.

Figura 8

Máquina R.R. Moore para materiales compuestos



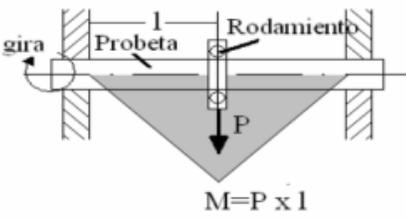
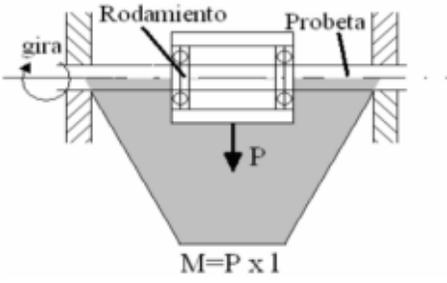
Según estudios previos, se ha realizado ensayos en probetas de material Duralón, obteniéndose buenos resultados, para lo cual, se estudiará el comportamiento de materiales compuestos a base de fibra de vidrio con resina de poliéster ante cargas dinámicas, de manera que, se obtengan las curvas de esfuerzo versus vida.

El ensayo a la fatiga se puede clasificar según el tipo de flexión a la cual se encuentre sometida, por ejemplo:

Tabla 6

Tipo de flexión en ensayo de fatiga

TIPO	DESCRIPCIÓN	EJEMPLO
Flexión rotativa en voladizo	<ul style="list-style-type: none"> Un extremo se encuentra empotrado mientras que el otro se encuentra libre. 	

TIPO	DESCRIPCIÓN	EJEMPLO
Flexión rotativa sobre dos apoyos	<ul style="list-style-type: none"> La carga es aplicada en el centro de la probeta. 	 <p style="text-align: center;">$M = P \times l$</p>
Flexión rotativa sobre dos apoyos cargados	<ul style="list-style-type: none"> La carga es aplicada en los dos apoyos de la probeta, por ende, la flexión es constante en toda la sección longitudinal. 	 <p style="text-align: center;">$M = P \times l$</p>

Nota. Tomado de *Diseño y construcción de una máquina para ensayos de resistencia a la fatiga mecánica por flexión en probetas de polímeros impresos en 3D*, (p.14), (Catagneto, 2020)

Fatiga en materiales compuestos

Prácticamente todos los materiales sufren degradaciones en sus características mecánicas con el tiempo debido a la aplicación de cargas cíclicas, o como resultado de su exposición a condiciones ambientales. La mayoría de los recursos compuestos también son susceptibles a la fatiga debido a la carga cíclica que puede provocar la falla de los factores estructurales previstos. En laminados o láminas compuestas sometidas a una serie de cargas cíclicas, se observan principalmente dos fenómenos a partir de criterios estructurales:

- (i) Degradación de su rigidez durante la aplicación de ciclos de carga
- (ii) Rotura de la pieza, tras un número de ciclos de aplicación de cargas

Este comportamiento es el mismo que ocurre cuando se carga el material de forma cuasi estática, pero las diferentes tasas de evolución y las consiguientes relaciones entre los

mecanismos cuando se ejercen cargas cíclicas conducen a diferentes métodos de degradación y fractura.(Mayugo M., 2003)

Degradación a fatiga de un laminado

Un laminado es un material altamente heterogéneo que presenta una gran anisotropía. Estas dos características influyen decisivamente en su comportamiento, así como en cómo se expresa el mecanismo de degradación por fatiga. Este comportamiento se puede observar a 2 escalas:

- (i) A nivel cuasi macroscópico, todas las láminas tienen un comportamiento mecánico anisotrópico y dependen de la orientación y el contenido de refuerzo
- (ii) A escala microestructural, grandes diferencias en las características de matriz y refuerzo conducen a aparecen tensiones y deformaciones adicionales en la carga externa.

Es decir, debido a la heterogeneidad del material da lugar a la aparición de cargas internas entre los distintos elementos del material. (Mayugo M., 2003)

Daño por fatiga

Los defectos de daño por fatiga se observan en la microestructura del material compuesto como: rotura de fibras, acumulación de grietas dentro de la matriz, pandeo en fibras mientras aún están expuestas a esfuerzos de compresión, debonding y eliminación de láminas adyacentes.(Sangoquiza, n.d.)

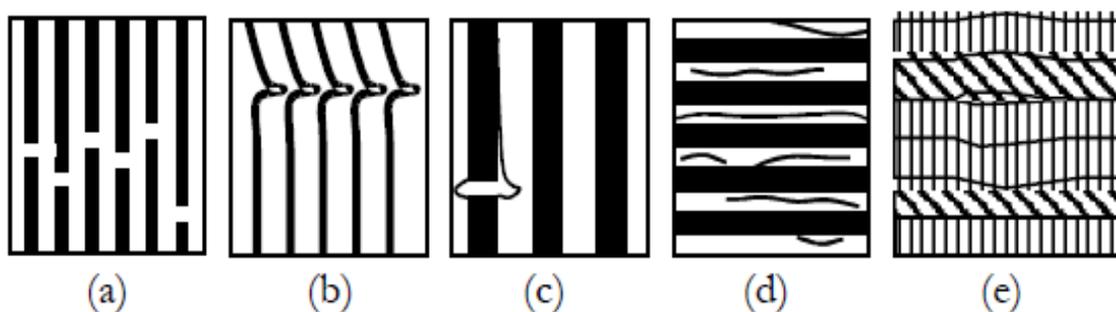
A continuación, se presenta los diferentes tipos de mecanismos de daño de materiales compuestos, como:

- Rotura de fibras: El material compuesto se somete a una carga superior al límite de deformación de la fibra, provocando el fallo.
- Agrietamiento en la matriz: Se da cuando la deformación última de la matriz es menor a la deformación del compuesto.

- Delaminación: Es la fractura de las láminas del material compuesto, generando disminución tanto en su rigidez como en la resistencia.
- Debonding: Aparece cuando hay deslizamiento entre la fibra y la matriz, generando el desprendimiento de estas.

Figura 9

Mecanismo de daño en materiales compuestos



Nota. Se visualiza los diferentes mecanismos de daño: a) rotura de fibras, b) pandeo en las fibras que están sometidas a esfuerzos de compresión, c) debonding, d) agrietamiento en la matriz, e) delaminación. Tomado de *Tratamiento de la fatiga en el diseño estructural con materiales compuestos* (p.2), por (Mayugo M., 2003)

La ruptura de un compuesto reforzado con fibras largas causada por cargas cíclicas es un proceso progresivo en el que aparecen y se combinan distintos mecanismos de degradación del laminado. La aparición de pequeñas grietas en la matriz, pueden traducirse en una propagación, de forma que genere una rotura de fibras en las zonas adyacentes y una delaminación entre las láminas. El comportamiento a fatiga de cualquier material y también de polímeros reforzados, no depende del nivel máximo de tensión a que está sometido sino al tipo de tensión cíclica que recibe. Los parámetros que definen la evolución temporal de la tensión cíclica son los valores de tensión máxima y mínima ($\sigma_{\text{máx}}$ y $\sigma_{\text{mínimo}}$) y su coeficiente ($R = \sigma_{\text{mínimo}} / \sigma_{\text{máx}}$). (Corbella & Maguyo, 2004)

Ensayo a tracción estática en materiales compuestos

El ensayo de tracción estática en materiales compuestos es un método utilizado para determinar la resistencia a la tracción y la deformación del material bajo carga uniaxial. Este ensayo es ampliamente utilizado en la industria para la caracterización de materiales compuestos y para la validación de modelos de análisis estructural.

El ensayo se realiza en una máquina de ensayo universal, en la que se coloca una muestra de forma rectangular, cuadrada o circular y se aplica una carga uniaxial de tracción en dirección longitudinal a las fibras. Durante el ensayo, se mide la carga aplicada y la deformación en la muestra, lo que permite determinar la resistencia a la tracción y la deformación del material.

Es importante seguir los procedimientos estandarizados establecidos en las normas de ensayo, como la ASTM D3039, para garantizar la reproducibilidad de los resultados y la comparabilidad entre diferentes estudios. También es importante considerar la variabilidad inherente en la fabricación de materiales compuestos y en la preparación de las muestras para el ensayo. El ensayo de tracción estática en materiales compuestos es una técnica de gran aporte para la caracterización de la resistencia mecánica de los materiales y para la evaluación del rendimiento de los materiales en aplicaciones específicas.

En los ensayos a tracción estática se deben seguir estándares establecidos, el primer paso es caracterizar las propiedades de ambos compuestos, fibra y resina. A su vez los ensayos mecánicos registran datos de carga y deformación al aplicar una fuerza longitudinal, esta prueba determina la resistencia a la rotura, deformación o desplazamiento, respuesta tensión-deformación del material, módulo elástico.(Olivares J., 2014)

Máquina de ensayos a fatiga R.R. Moore

La máquina de ensayos a fatiga R.R. Moore es una máquina de ensayos mecánicos utilizada para evaluar la resistencia a la fatiga de materiales, incluyendo materiales

compuestos. Fue desarrollada por R.R. Moore en la década de 1950 y sigue siendo una máquina popular en la actualidad.

La máquina consiste en un conjunto de brazos oscilantes, conectados a una fuente de energía mecánica, que se utilizan para aplicar cargas cíclicas a una probeta de ensayos. Las cargas pueden ser aplicadas en diferentes direcciones y con diferentes frecuencias y amplitudes, lo que permite simular diferentes condiciones de carga en el material.

La máquina R.R. Moore es capaz de realizar ensayos de fatiga a diferentes frecuencias, que van desde unos pocos ciclos por minuto. Además, puede ser utilizada para realizar ensayos de fatiga en diferentes tipos de muestras, incluyendo muestras en forma de viga, lámina o disco.

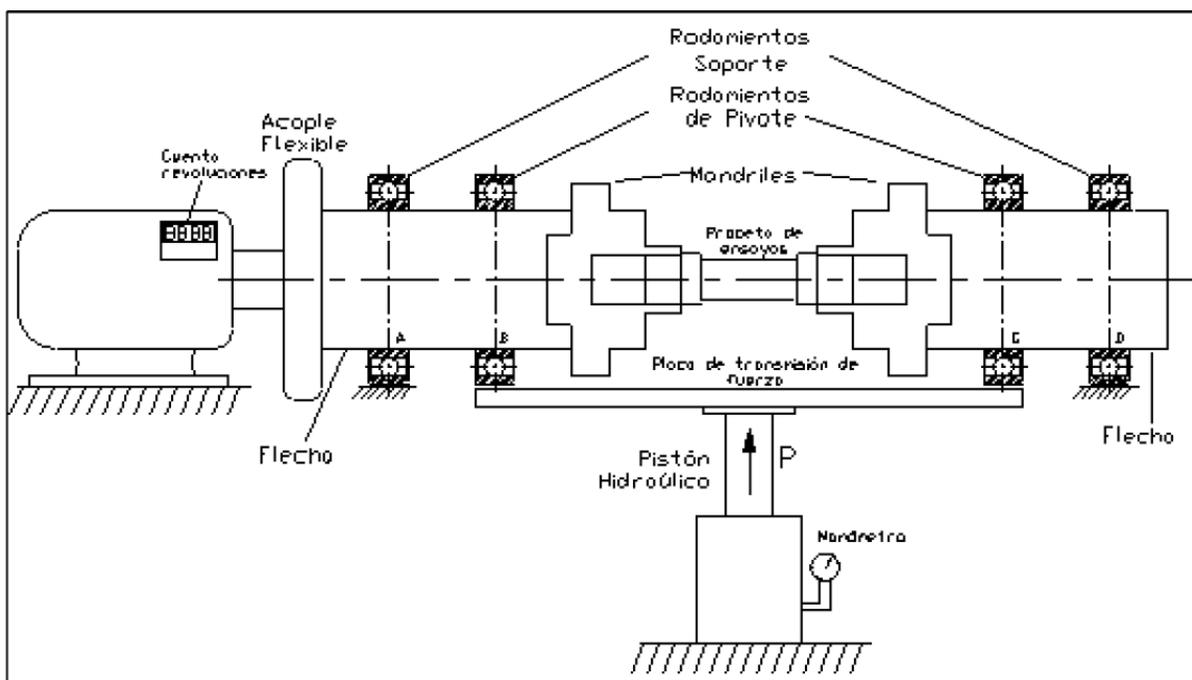
La máquina más empleada para realizar ensayos a fatiga es la de viga rotatoria de alta velocidad de R.R. Moore, donde se somete a la probeta a esfuerzos de flexión alternada (flexión pura) por medio de pesas (Tobar & Carrillo, 2010).

La máquina R.R. Moore permite una flexión rotativa de la probeta con un momento constante en la parte central, la cual es flexionada por una carga flectora P (Peso) que se encuentra en la parte inferior de la misma, la cuál va unido a los anillos porta cargas.

La probeta se encuentra sometida a un estado de flexión pura y los esfuerzos actuantes en las fibras bajo el eje neutro son invertidos desde tensión a compresión y viceversa esto sucede cada medio giro de la probeta. Al terminar la revolución, los esfuerzos se invierten de nuevo. Por ende, las fibras estarán sometidas a un tipo de esfuerzo alternante (tensión y compresión) (Córdova & Loayza, 2010)

Figura 10

Esquema de la máquina R.R. Moore



Nota. La figura representa el modelo de máquina a fatiga R.R. Moore utilizada para ensayos de fatiga a flexión rotativa. Tomado *Automatización de la máquina de ensayos de fatiga para el laboratorio de mecánica de materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE*, (p. 19), por (Borja & Tapia, 2017).

Partes de la máquina de ensayo a flexión rotativa

La máquina de ensayo a fatiga integra varios elementos de tipo: mecánicos, eléctricos y de control que en conjunto permiten realizar ensayos de fatiga a flexión rotativa en diferentes tipos de materiales (esencialmente en aceros), obteniendo resultados que permite estudiar y comprender el comportamiento de un material expuesto a cargas cíclicas; inicialmente la máquina de R.R. Moore se la utiliza para ensayos en aceros bajo la normativa ASTM E-466, pero se realizarán ensayos para materiales compuestos en base de fibra de vidrio y resina de poliéster.

Figura 11*Máquina R.R. Moore*

Los elementos que integran una máquina de ensayo de fatiga de flexión rotativa de tipo R.R. Moore, son:

1. Motor eléctrico. – El cual transmite el movimiento de rotación a los dos ejes y a la potencia a través del acople semiflexible, el movimiento generado se considera como rotación libre debido a los rodamientos, asegurando que ningún elemento de la máquina se encuentre sometido a esfuerzos de torsión.
2. Sistemas de apoyo y sujeción. – Los ejes de la máquina cuentan con mordazas(mandriles) cuya función es mantener a las probetas fijas en sus pruebas, la máquina cuenta con dos rodamientos fijos (rodamientos A y B) que sirven de soporte, y dos rodamientos libres (rodamientos B y C) que sirven de pivotes.
3. Estructura metálica. – Proporciona estabilidad, resistencia y rigidez a la máquina, así evita que las altas vibraciones que se generan provoquen desestabilidad en el ensayo.

4. Sistema de pesas. – La carga a aplicar se coloca en la placa porta pesas la cual transmite dicha fuerza a los rodamientos libres, los mismos que producen el efecto de una viga simplemente apoyada, sometida a flexión pura. Al girar el motor hace que las fibras externas de la probeta pasan de estar en tracción a compresión cada vez que los ejes dan medio giro, estos esfuerzos alternantes producen la falla por fatiga.
5. Contador de ciclos. – Permite contabilizar el número de ciclos que soporta la probeta ante una carga cíclica a un número de revoluciones del motor dada.

Tabla 7

Especificaciones técnicas – Máquina de fatiga

Máquina de Fatiga por Flexión Rotativa	
Motor Eléctrico Trifásico	
Marca	Weg
Modelo	W22
Tensión nominal de operación	220/380 [V]
Frecuencia	60[Hz]
Potencia	0.5[HP]
Corriente nominal de operación	2.10/1.22[A]
Celda de Carga Tipo S	
Alimentación	24 [V] / DC
Tipo de Salida	Analógico en voltaje (0-10 [V])
Rango de Entrada	0- 30 [Kg]
Sensibilidad	333.33 [mV/Kg]

Nota. La tabla hace referencia a las especificaciones técnicas de la máquina de R. R. Moore del Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”.

Normas para ensayos a fatiga y para probetas de materiales compuestos

Las normas de ensayos a fatiga en materiales compuestos pueden variar dependiendo de la aplicación y el tipo de material compuesto utilizado. Sin embargo, algunas de las normas más comunes son las siguientes:

1. ASTM D3479/D3479M - Esta norma establece los procedimientos para la realización de ensayos de fatiga en materiales compuestos reforzados con fibras de vidrio, utilizando una máquina de ensayo universal.
2. ASTM D7791/D7791M - Esta norma describe los procedimientos para realizar ensayos de fatiga en materiales compuestos reforzados con fibras de carbono, utilizando una máquina de ensayo universal.
3. ISO 13003: Esta norma describe el procedimiento para la realización de ensayos a fatiga de materiales compuestos reforzados con fibras de carbono o vidrio.
4. ASTM D3475: Esta norma describe el procedimiento para la realización de ensayos a fatiga de materiales compuestos reforzados con fibras de aramida.
5. ASTM D7615: Esta norma describe el procedimiento para la realización de ensayos a fatiga de materiales compuestos reforzados con fibras de boro.
6. ASTM E1823 - Esta norma establece los procedimientos para la realización de ensayos de fatiga en materiales compuestos utilizando un ensayo de flexión alternante.

Estas normas establecen los requisitos y procedimientos necesarios para la realización de ensayos a fatiga de materiales compuestos. Incluyen detalles sobre la preparación de las muestras, la configuración del equipo de ensayo, los procedimientos de carga, la frecuencia de las pruebas y los criterios de fallo. Además, estas normas también establecen los requisitos para la recolección y análisis de datos durante el ensayo.

La norma ISO 13003, titulada "Materiales compuestos reforzados con fibras - Métodos de ensayo para la determinación de la resistencia a la fatiga", establece los procedimientos para la realización de ensayos a fatiga de materiales compuestos reforzados con fibras de

carbono o vidrio. Esta norma describe los métodos de ensayo para determinar la resistencia a la fatiga de los materiales compuestos, y se aplica a muestras de tamaño estándar que se prueban bajo diferentes condiciones de carga cíclica. La norma establece las condiciones de ensayo, que incluyen la geometría de la muestra, la frecuencia y amplitud de la carga, y el método de fijación de la muestra.

ASTM (American Society for Testing and Materials) es una organización internacional de desarrollo de normas técnicas en el campo industrial, donde establecen condiciones y procedimientos requeridos en cada ensayo. En su sección de materiales compuestos el ASTM trabajan con: el ensayo D3039 para cargas estáticas y el ensayo D3479 para cargas dinámicas. (Pertuz & González, 2017)

La obtención de los parámetros para los ensayos se realiza a partir de la carga máxima obtenida de los ensayos estáticos. La norma D3479 recomienda dos métodos para la determinación de la vida a fatiga del material el cual se basa en un proceso estadístico que dará como resultado la curva S-N: distribución log-normal y distribución Weibull, se seleccionó esta última por su mejor ajuste a los datos. La distribución de Weibull se usa generalmente para representar datos de la vida a fatiga en función de dos parámetros estadísticos α y β representados por las siguientes expresiones:

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

Con estos lineamientos se obtendrán las propiedades del material que nos sirvan de conocimiento base para estudios más avanzados. Con el fin de obtener resultados válidos se definió la geometría de las probetas según la norma ASTM E- 466 donde se establecen los diferentes parámetros dimensionales considerando las limitaciones de la máquina, como la distancia entre mordazas y su diámetro máximo permisible. (Pertuz & González, 2017)

Curvas esfuerzo – vida en materiales compuestos

La principal forma de representación de las características de la degradación a fatiga es la curva tensión – vida, o curva S-N. En ella se representa la tensión cíclica de amplitud constante, normalmente en función de la tensión máxima, que causa el fallo en un número de ciclos dado (N_f). Habitualmente representa los valores medios de vida de una misma geometría (probeta) a varias pruebas sujeto al mismo nivel de tensión cíclica. Este límite para las curvas S-N es conocido como límite de fatiga el cual indica que a niveles de tensión inferiores el material no falla por fatiga. Las curvas S-N están definidas para la tensión máxima y toman como valor inicial la resistencia cuasi-estática (S_U). Son curvas tienen un comportamiento por general de forma exponencial decrecientes hasta llegar al valor (S_e) en materiales que tiene límite de fatiga. (Corbella & Maguyo, 2004)

La curva S-N muestra la percepción natural de la fatiga en término de resultados experimentales, en cambio, no proporcionan indicaciones sobre la disminución de la rigidez, el mecanismo de daño, la presencia de grietas o de cambio en las características de los materiales debido al proceso de degradación por fatiga.

Efecto de la tensión media en la vida a fatiga

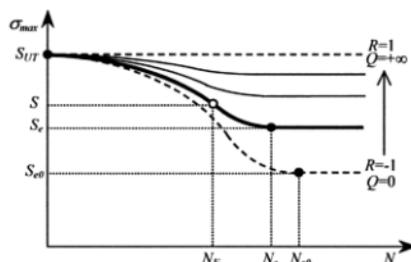
Mediante estudios se comprobó que para cargas que provoquen igual tensión máxima y distinta tensión mínima la degradación por el fenómeno de la fatiga es menos acusada en la tensión donde la componente media es más importante y por ende la componente alterna tiene menor peso. (Corbella & Maguyo, 2004)

Para representar el comportamiento global del material se necesitan toda una familia de curvas S-N en función de la componente media que tenga cada tensión cíclica. Para tensiones medias positivas ($\sigma_m > 0$), la vida de un material sometido a tensiones cíclicas de características constantes se puede mostrar dependiente de su nivel de tensiones máximas y

de su relación de esfuerzo máximos y mínimo con una familia de curvas S-N. (Corbella & Maguyo, 2004)

Figura 12

Familia de curvas S-N



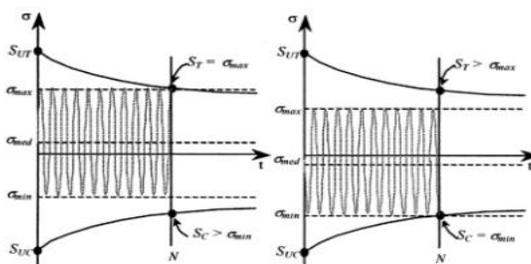
Nota. La familia de curvas S-N. Tomado de *Modelo de regresión general de las curvas S-N para la estimación de la vida a fatiga de un composite*, por (Corbella & Maguyo, 2004).

Considerando que un material tiene un límite de resistencia a tracción y uno a compresión se observa que la rotura puede dar:

$$(S_T = \sigma_{m\acute{a}x}) \text{ y } (S_C = \sigma_{m\acute{i}nimo})$$

Figura 13

Tensiones de amplitud constante que superan el límite de resistencia a tracción (derecha) y límite de resistencia por compresión (izquierda)



Nota. Para una tensión cíclica tracción – compresión, se dará de un modo u otro dependiendo de la evolución de los límites de resistencia. Tomado de *Modelo de regresión general de las curvas S-N para la estimación de la vida a fatiga de un composite*, por (Corbella & Maguyo, 2004).

Para el análisis de la fatiga se debe entender el concepto de las componentes de esfuerzos medios (S_m) y alternativos (S_a), así como el intervalo de esfuerzo ΔS y la razón de esfuerzo R, las ecuaciones vienen dadas de la siguiente manera:

$$\Delta S = S_{m\acute{a}x} - S_{m\acute{i}nimo} \quad (2)$$

$$S_m = \frac{S_{m\acute{a}x} + S_{m\acute{i}nimo}}{2} \quad (3)$$

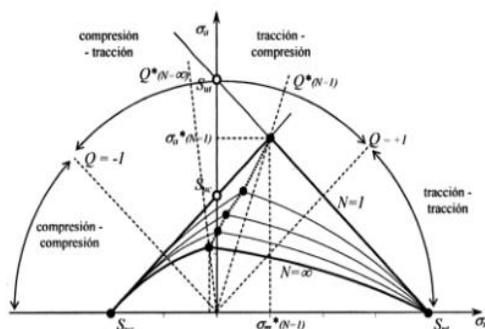
$$S_a = \frac{S_{m\acute{a}x} - S_{m\acute{i}nimo}}{2} \quad (4)$$

$$R = \frac{S_{m\acute{a}x}}{S_{m\acute{i}n}} \quad (5)$$

El valor de R responde a la naturaleza de la tensión variable aplicada. Para valores de R entre menos infinito y cero indica que se tienen ciclos de tensión – compresión (T-C). Para valores de R=-1 se obtienen cargas simétricamente oscilante T-C. Con valores de R entre 0 y 1 se obtienen ensayos T-T. Los valores de R superiores a 1 configuran ensayos a C-C. Un esfuerzo cíclico tracción – tracción superará el límite por tracción mientras que una tensión compresión – compresión lo hará por compresión. (Pertuz & González, 2017)

Figura 14

Curvas de vida constante $S(\sigma_m, \sigma_a)$ de la resistencia



Nota. Para caracterizar la predicción de vida. Tomado de *Modelo de regresión general de las curvas S-N para la estimación de la vida a fatiga de un composite*, por (Corbella & Maguyo, 2004).

Capítulo III

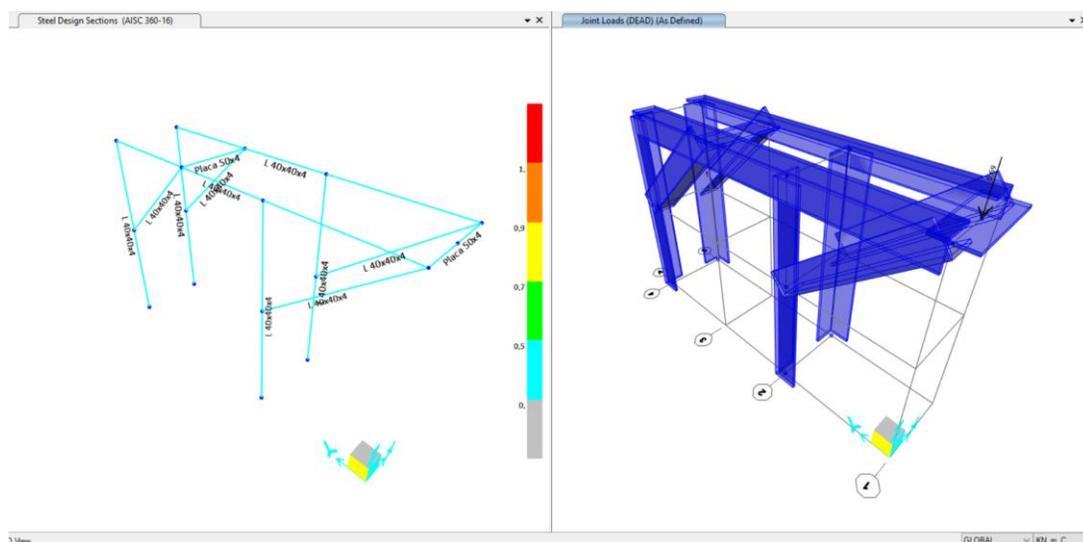
Simulación y Rediseño

Simulación SAP 2000

Realizando la simulación en SAP 2000 se garantiza la resistencia de la estructura metálica fabricada, para facilitar los ensayos de fatiga en la máquina R.R. Moore, el diseño se tomó como referencia el trabajo de titulación “Caracterización de las propiedades mecánicas del duralón” (Velásquez Salazar, 2018), en la cual se detectó como limitante la deflexión inicial que se producía por efectos de los pesos de cada elemento que compone a la máquina, por lo que es necesario implementar la estructura a la máquina, eliminando las cargas iniciales que producían la deflexión inicial en la probeta.

Figura 15

Simulación SAP 2000

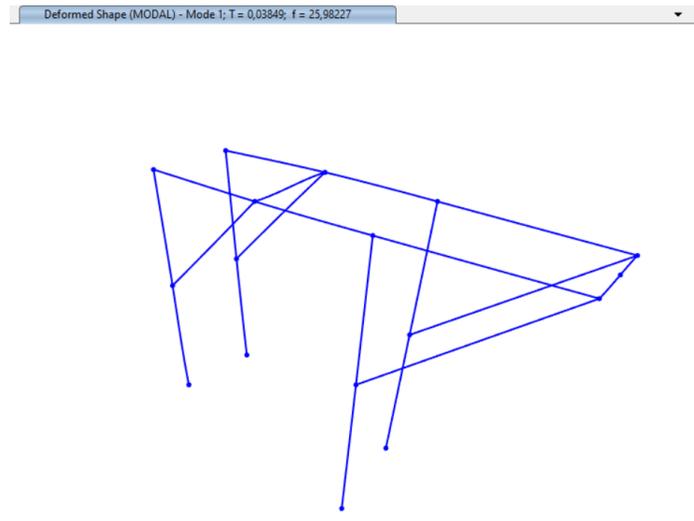


En la figura 15 se identifica la simulación realizada con la herramienta de software SAP 2000 bajo los criterios de estructuras metálicas, considerando cargas de tipo flexionante que pueden generar limitantes al momento de realizar los ensayos de fatiga en la máquina de R. R. Moore en el material compuesto. Adicional se implementa a la simulación cargas vivas por

efectos de las vibraciones en los puntos de apoyo a causa de la rotación del eje generado por el motor.

Figura 16

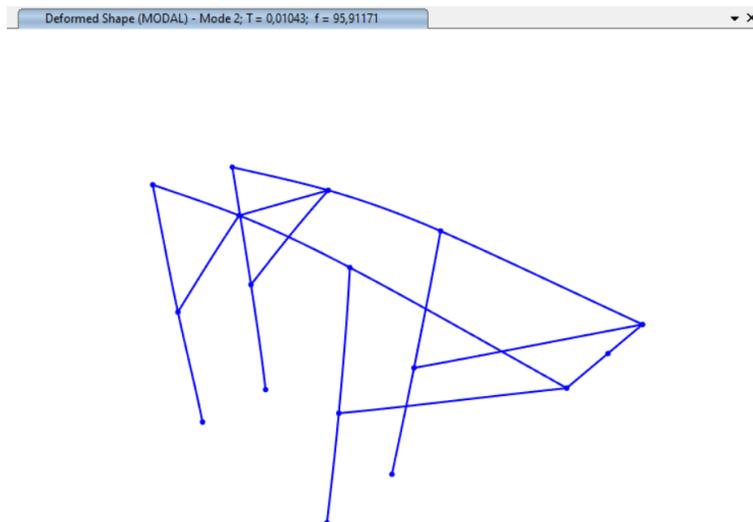
Simulación vibraciones Modal 1



- Modal 1 = Traslación eje axial
- Periodo $T=0,03849$
- Frecuencia $f=25,98$ Hz

Figura 17

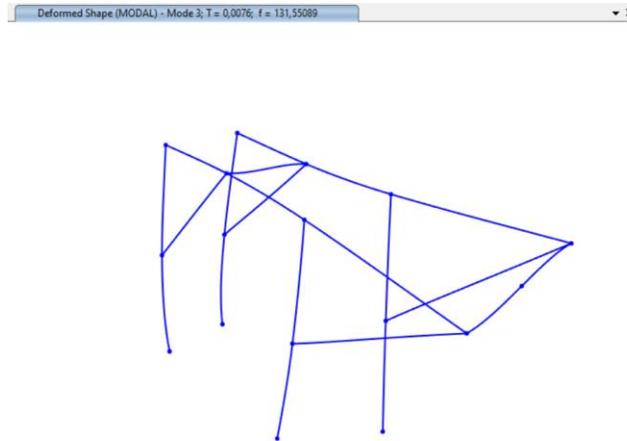
Simulación vibraciones Modal 2



- Modal 2 = Traslación eje longitudinal (Eje Y)
- Periodo $T=0,01043$
- Frecuencia $f=95,91$ Hz

Figura 18

Simulación vibraciones Modal 3



- Modal 3 = Torsión Eje Z
- Periodo $T=0,0076$
- Frecuencia $f=131,55$ Hz

Se observa que con el perfil L 40x40x4 [mm] y placas de 50x4 [mm] se consigue rigidizar la estructura y soportar sin problemas los pesos que integra la máquina y sus vibraciones. De esta forma, se procede a fabricar e implementar la estructura en la máquina de R.R. Moore para realizar ensayos de fatiga a flexión rotativa en diferentes tipos de materiales.

Rediseño de la Máquina de ensayos a fatiga R.R. Moore

Para el rediseño de la máquina de ensayos a fatiga R.R. Moore es necesario realizar una inspección visual considerando las posibles limitaciones que presente la máquina actualmente, como:

- Peso de elementos mecánicos.
- Deflexión inicial en la probeta.

Para lo cual se identificó que por efecto del peso de cada componente se generaban deflexiones iniciales en las probetas de material compuesto, lo que ocasionaba que, al momento de poner en funcionamiento, la probeta choque con la tuerca de la porta pesas y se descentre respecto a las mordazas, ocasionando que la sujeción sea deficiente. Es por ello, por lo que se procede a diseñar una estructura metálica que permita contrarrestar los pesos iniciales de cada componente y así la probeta se encuentre solamente bajo la acción de cargas cíclicas. Para el diseño de los miembros estructurales, hay que considerar las cargas fluctuantes en el mismo, estas son de tipo flexionante, para lo cual se sigue el siguiente procedimiento.

Diseño de miembros a flexión

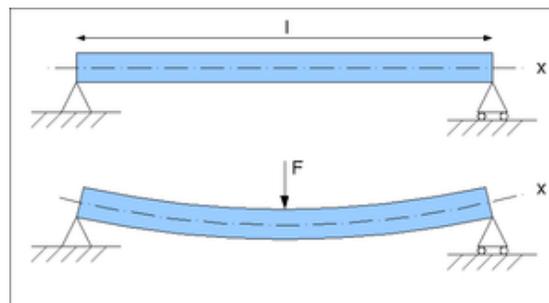
La flexión es la deformación que sufre la viga por esfuerzos que se generan en ella, hay dos clases de flexión estas son:

- Flexión pura
- Flexión no uniforme

La flexión que se genera en las vigas se produce en el momento en el que se deforman al aplicar las cargas, por lo tanto, su diseño se limita a que esa deformación no sea perceptible y que no ocasione daños en la estructura.

Figura 19

Flexión en vigas



Nota. Tomado de *Specification for Structural Steel Buildings*, por (AISC 360-16, 2016).

Para obtener el equilibrio en la probeta al colocar en la máquina RR. Moore y evitar deflexiones, se realiza la construcción de una estructura metálica fijada a la bancada de la máquina, a continuación, se realiza el diseño de miembros a flexión.

Tabla 8

Tabla de Selección para la Aplicación del Capítulo F Secciones

TABLE USER NOTE F1.1 Selection Table for the Application of Chapter F Sections				
Section in Chapter F	Cross Section	Flange Slenderness	Web Slenderness	Limit States
F7		C, NC, S	C, NC, S	Y, FLB, WLB, LTB
F8		N/A	N/A	Y, LB
F9		C, NC, S	N/A	Y, LTB, FLB, WLB
F10		N/A	N/A	Y, LTB, LLB
F11		N/A	N/A	Y, LTB
F12	Unsymmetrical shapes, other than single angles	N/A	N/A	All limit states

Y = yielding, CFY = compression flange yielding, LTB = lateral-torsional buckling, FLB = flange local buckling, WLB = web local buckling, TFY = tension flange yielding, LLB = leg local buckling, LB = local buckling, C = compact, NC = noncompact, S = slender, N/A = not applicable

Nota. Tomado de Specification for Structural Steel Buildings, por (AISC 360-16, 2016).

Figura 20

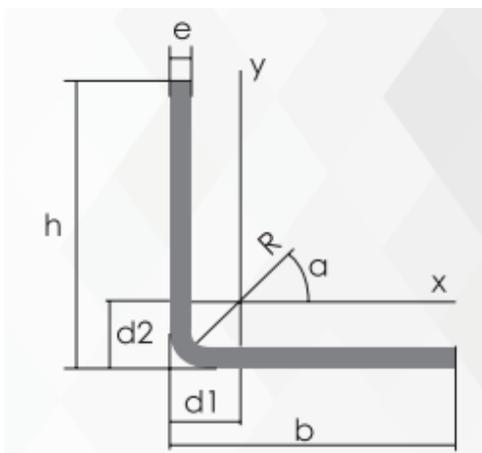
Valores de los ángulos (Dipac)

Ángulos de alas iguales																				
Descripción	b	h	e	Masa	Área	d1	d2	Ángulo a	Eje X - X			Eje Y - Y			Eje U - U			Eje V - V		
									lx	Wx	rx	ly	Wy	ry	lu	Wu	ru	lv	Wv	rv
									cm4	cm3	cm									
	mm	mm	mm	Kg/m	cm2	cm	cm	(°)												
L 20x 2	20	20	2	0,57	0,73	0,60	0,60	45,00	0,28	0,20	0,62	0,28	0,20	0,62	0,46	0,32	0,79	0,10	0,14	0,37
L 20 x 3	20	20	3	0,81	1,03	0,65	0,65	45,00	0,38	0,28	0,60	0,38	0,28	0,60	0,63	0,45	0,78	0,12	0,17	0,34
L 25x 2	25	25	2	0,73	0,93	0,72	0,72	45,00	0,56	0,32	0,78	0,56	0,32	0,78	0,92	0,52	1,00	0,20	0,23	0,47
L 25x 3	25	25	3	1,05	1,33	0,78	0,78	45,00	0,78	0,45	0,77	0,78	0,45	0,77	1,30	0,74	0,99	0,26	0,30	0,45
L 30 x 2	30	30	2	0,88	1,13	0,85	0,85	45,00	1,00	0,46	0,94	1,00	0,46	0,94	1,63	0,77	1,20	0,37	0,35	0,57
L 30x 3	30	30	3	1,28	1,63	0,90	0,90	45,00	1,40	0,67	0,93	1,40	0,67	0,93	2,32	1,09	1,19	0,49	0,46	0,55
L 30x 4	30	30	4	1,65	2,10	0,95	0,95	45,00	1,76	0,86	0,91	1,76	0,86	0,91	2,93	1,38	1,18	0,58	0,55	0,52
L 40x 2	40	40	2	1,20	1,33	1,10	1,10	45,00	2,44	0,84	1,26	2,44	0,84	1,26	3,96	1,40	1,61	0,92	0,65	0,78
L 40x 3	40	40	3	1,75	2,23	1,15	1,15	45,00	3,49	1,22	1,25	3,49	1,22	1,25	5,71	2,02	1,60	1,27	0,90	0,75
L 40x 4	40	40	4	2,28	2,90	1,20	1,20	45,00	4,44	1,59	1,24	4,44	1,59	1,24	7,23	2,59	1,59	1,55	1,10	0,73
L 40x 5	40	40	5	2,77	3,54	1,25	1,25	45,00	5,29	1,92	1,22	5,29	1,92	1,22	8,80	3,11	1,58	1,77	1,25	0,71
L 50x 2	50	50	2	1,51	1,93	1,35	1,35	45,00	4,85	1,33	1,59	4,85	1,33	1,59	7,85	2,22	2,02	1,85	1,05	0,98
L 50x 3	50	50	3	2,22	2,83	1,40	1,40	45,00	7,01	1,95	1,57	7,01	1,95	1,57	11,42	3,23	2,01	2,61	1,47	0,96
L 50x 4	50	50	4	2,90	3,70	1,45	1,45	45,00	9,01	2,54	1,56	9,01	2,54	1,56	14,76	4,18	2,00	3,25	1,84	0,94
L 50x 5	50	50	5	3,56	4,54	1,50	1,50	45,00	10,84	3,10	1,55	10,84	3,10	1,55	17,89	5,06	1,99	3,79	2,14	0,91

Nota. En la figura se detalla las características del ángulo tipo L 40x4. Tomado de *Catálogo de perfiles estructurales ángulos "L" Doblado*, por (Dipac, 2021).

Figura 21

Esquema del perfil estructural tipo L



Nota. La figura hace referencia al esquema del perfil estructural tipo L. Tomado de *Specification for Structural Steel Buildings*, por (AISC 360-16, 2016).

Procedimiento de diseño estructural

Nota. los datos de las propiedades del perfil L 40x40x4 [mm] se encuentran detallados en anexos.

1. Cálculo del módulo plástico

$$Z_x = \frac{b * d^2}{4} \quad (6)$$

$$Z_x = \frac{40 [mm] * (40 [mm])^2}{4} = 16.000 [mm^3]$$

De acuerdo con el procedimiento de diseño estructural, se calcula los factores de carga y resistencia para la estructura.

2. LRFD

$$w_u = 1.4 * D \quad (7)$$

$$w_u = 1.4 * \left(68,284 \left[\frac{kgf}{mm} \right] \right)$$

$$w_u = 95,60 \left[\frac{kgf}{mm} \right]$$

3. Momento

$$M_u = \frac{W_u * L^2}{8} \quad (8)$$

$$M_u = \frac{95,60 \left[\frac{kgf}{mm} \right] * (120 [mm])^2}{8} = 172080 [kgf * mm]$$

4. Deflexión

$$\Delta_{m\acute{a}x} = \frac{L}{360} \quad (9)$$

$$\Delta_{m\acute{a}x} = \frac{120 [mm]}{360} = 0,33 [mm]$$

5. Inercia

$$I = \frac{5 * W * L^4}{384 * E * \Delta_{m\acute{a}x}} \quad (10)$$

$$I = \frac{5 * 68,284 \left[\frac{\text{kgf}}{\text{mm}} \right] * (120 [\text{mm}])^4 * 9,81 \left[\frac{\text{N}}{\text{kgf}} \right]}{384 * 200000 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] * 0,33 [\text{mm}]}$$

$$I = 27403,6 [\text{mm}^4]$$

6. LRFD

$$M_u \leq \phi b * M_n$$

$$\leq \phi b * F_y * Z_x$$

$$Z_{req} = \frac{M_u}{\phi b * F_y} \quad (11)$$

$$Z_{req} = \frac{172080 [\text{kgf} * \text{mm}] * 9,81 \left[\frac{\text{N}}{\text{kgf}} \right]}{0,90 * 248 \left(\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right)}$$

$$Z_{req} = 7563,193 [\text{mm}^3]$$

Comparando los valores calculados del módulo plástico Z_x

$$\therefore Z_x > Z_{req}$$

$$16000 > 7563,193 \text{ Cumple}$$

Se selecciona el perfil **L40x40x4 [mm]** como el más adecuado para la construcción de la estructura metálica que será acoplada en la máquina de ensayos de fatiga R.R. Moore.

Cálculo de pernos de montaje

Pernos de alta resistencia en conexiones de deslizamiento crítico

La siguiente ecuación fue tomada de AISC 360-16; Ec: J3-4, pág. 134.

$$R_u = \mu D_u h_f T_b n_s \quad (12)$$

Constante de diseño:

$$D_u = 1,13$$

D_u : un multiplicador que refleja la relación de la pretensión media del perno instalado

Planos de deslizamiento:

$$n_s = 1$$

n_s : número de planos de deslizamiento requeridos para permitir el deslizamiento de la conexión

Factor de relleno:

Figura 22

Factor de relleno

(1) For one filler between connected parts

$$h_f = 1.0$$

(2) For two or more fillers between connected parts

$$h_f = 0.85$$

Nota. Tomado de *Specification for Structural Steel Buildings*, por (AISC 360-16, 2016).

$$h_f = 1$$

h_f : factor para cargas

Coeficiente de deslizamiento:

Figura 23

Coeficiente de deslizamiento

(1) For Class A surfaces (unpainted clean mill scale steel surfaces or surfaces with Class A coatings on blast-cleaned steel or hot-dipped galvanized and roughened surfaces)

$$\mu = 0.30$$

(2) For Class B surfaces (unpainted blast-cleaned steel surfaces or surfaces with Class B coatings on blast-cleaned steel)

$$\mu = 0.50$$

Nota. Tomado de *Specification for Structural Steel Buildings*, por (AISC 360-16, 2016).

$$\mu = 0,5$$

μ : coeficiente de deslizamiento promedio para superficies de Clase A o B, según corresponda.

Pretensión mínima del perno:

Figura 24

Pretensión mínima del perno

Bolt Size, in.	Group A^[a] (e.g., A325 Bolts)	Group B^[a] (e.g., A490 Bolts)	Group C, Grade 2^[b] (e.g., F3043 Gr. 2 bolts)
1/2	12	15	—
5/8	19	24	—
3/4	28	35	—
7/8	39	49	—
1	51	64	90
1 1/8	64	80	113
1 1/4	81	102	143
1 3/8	97	121	—
1 1/2	118	148	—

^[a] Equal to 0.70 times the minimum tensile strength of bolts as specified in ASTM F3125/F3125M for Grade A325 and Grade A490 bolts with UNC threads, rounded off to nearest kip.

^[b] Equal to 0.70 times the minimum tensile strength of bolts, rounded off to nearest kip, for ASTM F3043 Grade 2 and ASTM F3111 Grade 2.

Nota. Tomado de *Specification for Structural Steel Buildings*, por (AISC 360-16, 2016).

Se selecciona inicialmente un perno 1/2 in:

$$D_p = \frac{1}{2} \text{ in}$$

$$T_b = 12 \text{ kips} = 5443,11 \text{ kgf}$$

Reemplazando en la ecuación #12:

$$R_n = (0,5)(1,13)(1)(5443,11 \text{ kgf})(1)$$

$$R_n = 3075,357 \text{ kgf/perno}$$

Resistencia nominal al corte del perno (sujetadores y piezas roscadas)

Figura 25

Resistencia nominal al corte del perno

TABLE J3.2 Nominal Strength of Fasteners and Threaded Parts, ksi (MPa)		
Description of Fasteners	Nominal Tensile Strength, F_{nt} , ksi (MPa) ^[a]	Nominal Shear Strength in Bearing-Type Connections, F_{nv} , ksi (MPa) ^[b]
A307 bolts	45 (310) ^[c]	27 (186) ^[c] ^[d]
Group A (e.g., A325) bolts, when threads are not excluded from shear planes	90 (620)	54 (372)

Nota. Tomado de *Specification for Structural Steel Buildings*, por (AISC 360-16, 2016).

$$F_{nv} = 372 \text{ MPa}$$

F_{nv} : Resistencia al corte nominal en conexiones de tipo APLASTAMIENTO, ksi (MPa)

Figura 26

Resistencia al rodamiento y al desgarró en los orificios de los pernos

Bearing and Tearout Strength at Bolt Holes

The available strength, ϕR_n and R_n/Ω , at bolt holes shall be determined for the limit states of bearing and tearout, as follows:

$$\phi = 0.75 \text{ (LRFD)} \quad \Omega = 2.00 \text{ (ASD)}$$

Nota. Tomado de *Specification for Structural Steel Buildings*, por (AISC 360-16, 2016).

Área nominal del perno:

$$A_b = \frac{\pi D_p^2}{4} \quad (13)$$

$$A_b = \frac{\pi(12,7\text{mm})^2}{4} = 126,67 \text{ mm}^2$$

La fuerza de corte de diseño es:

$$\Phi r_n = \Phi F_{nv} A_b \quad (14)$$

$$\Phi r_n = (0,75) \left(372 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right) (126,67 \text{ mm}^2) = 35340,93 \text{ kgf/perno}$$

Se toma la resistencia Rn porque:

$$R_n < \Phi r_n$$

$$3075,357 \text{ kgf/perno} < 35340,93 \text{ kgf/perno}$$

Se requiere de aproximadamente 4 pernos para garantizar suficiente capacidad, y estabilidad de la estructura.

$$n_b = 4 \text{ pernos}$$

Combinación de cargas

$$D = 70 \text{ kgf}$$

$$L = 8,36 \text{ kgf}$$

$$Pu = 1,2 * D + 1,6 * L = 1,2(70) + 1,6(8,36) = 97,37 \text{ [kgf]}$$

Cortante en pernos

$$R_p = \frac{R_u}{4} \quad (15)$$

$$R_p = \frac{97,37 \text{ kgf}}{4} = 24,34 \text{ kgf}$$

La resistencia al corte de un perno viene dada por la ecuación J3-1 de la AISC 360-16.

Figura 27

Resistencia a la cortadura

Tensile and Shear Strength of Bolts and Threaded Parts

The design tensile or shear strength, ϕR_n , and the allowable tensile or shear strength, R_n/Ω , of a snug-tightened or pretensioned high-strength bolt or threaded part shall be determined according to the limit states of tension rupture and shear rupture as:

$$R_n = F_n A_b \quad (J3-1)$$

$$\phi = 0.75 \text{ (LRFD)} \quad \Omega = 2.00 \text{ (ASD)}$$

where

A_b = nominal unthreaded body area of bolt or threaded part, in.² (mm²)

F_n = nominal tensile stress, F_{nt} , or shear stress, F_{nv} , from Table J3.2, ksi (MPa)

Nota. Tomado de Specification for Structural Steel Buildings, por (AISC 360-16, 2016).

$$R_{nv} = \phi F_{nv} A_b \quad (16)$$

Donde A_b fue calculado anteriormente:

$$A_b = 126,67 \text{ mm}^2$$

$$R_{nv} = 0,75 (372\text{MPa})(126,67\text{mm}^2)$$

$$R_{nv} = 35340,93\text{N} = 3603,77 \text{ kgf}$$

Como:

$$24,34 \text{ kgf} < 3603,77 \text{ kgf} \quad \text{Ok}$$

Perno seleccionado: Perno cabeza hexagonal interna ½ in; 4 unidades

Construcción de estructura para la adecuación de la máquina R.R. Moore

Al posicionar la probeta en los mandriles de la máquina, se evidenció una deflexión en la probeta muy considerable, siendo esto un limitante al momento de aplicar carga en el área de sección transversal (área de trabajo); para solucionar esta limitación se ejecuta el diseño y construcción de la estructura metálica. Dicha estructura garantizará la colinealidad de la

probeta con los ejes y chumaceras, aplicando conocimientos adquiridos sobre soldadura y estructuras metálicas llevándose a cabo la realización del proceso de fabricación.

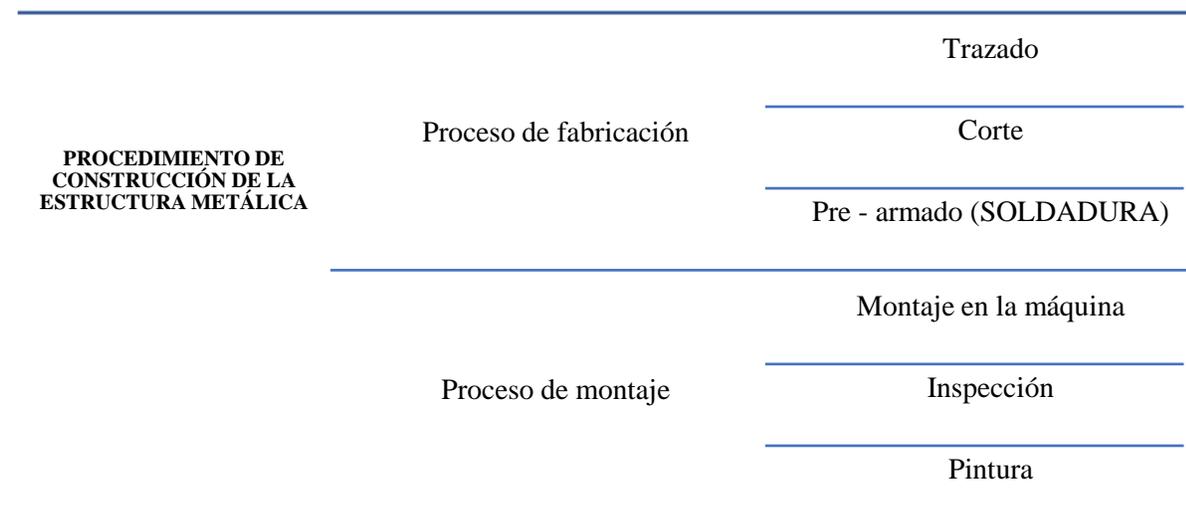
En la págs. # 63-64 se encuentra detallado todos los cálculos realizados para la selección del material de la estructura. Basado en el análisis estructural bajo la normativa (AISC 360-16, 2016).

Pasos de fabricación de la estructura metálica

El proceso de fabricación de la estructura se realiza en áreas especializadas en el desarrollo de cada procedimiento, contando con sus respectivas máquinas herramientas y seguridad, mediante un programa de control de calidad de cada proceso se garantiza que cada componente de la estructura metálica cumpla lo requerido.

Figura 28

Procedimiento de construcción de una estructura metálica



Fabricación

1) Pedido de material

Para realizar el pedido de material, se toma en cuenta las dimensiones, tolerancias, y tipo de acero de las piezas a ser unidas, evitando desperdicios, desde el punto de vista estructural y económico.

Es necesario adquirir los siguientes materiales para la construcción de la estructura metálica:

- *Perfil 40x40x4 [mm]*
- *Rodachines 1 ½"*
- *Cable de acero ϕ 1/8"*
- *Eje Porta pesas ϕ ½"*

2) Transporte y recepción del material

La gestión en cuanto al transporte debe ir en función a la distancia donde se va a realizar el trabajo, es necesario utilizar un protector plástico para evitar corrosión en el perfil, en el taller donde se realiza la recepción del material debe constar con un rack señalizado destinado para la materia prima y así evitar confusiones con otros materiales.

3) Trazado

Figura 29

Trazado de medidas



Se realiza el trazado de medidas en el perfil de 6 metros, para obtener las bases (2 componentes), nervios (4 componentes) y placas superiores (3 componentes).

Medidas:

- Para las bases un trazado de 887 [mm]
- Para los nervios un trazado de 200 [mm]
- Para las placas superiores un trazado de 120 [mm]
- El trazado se realiza con escuadras metálicas, flexómetro, puntas de trazar y granetes.

4) Corte

El corte de los elementos estructurales debe realizarse con amoladora de disco de corte, y teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Si el corte es recto debe ser contralado con topes rígidos.
- Si el corte es de biselado a 45°, usar una escuadra metálica.

Figura 30

Corte del material con amoladora

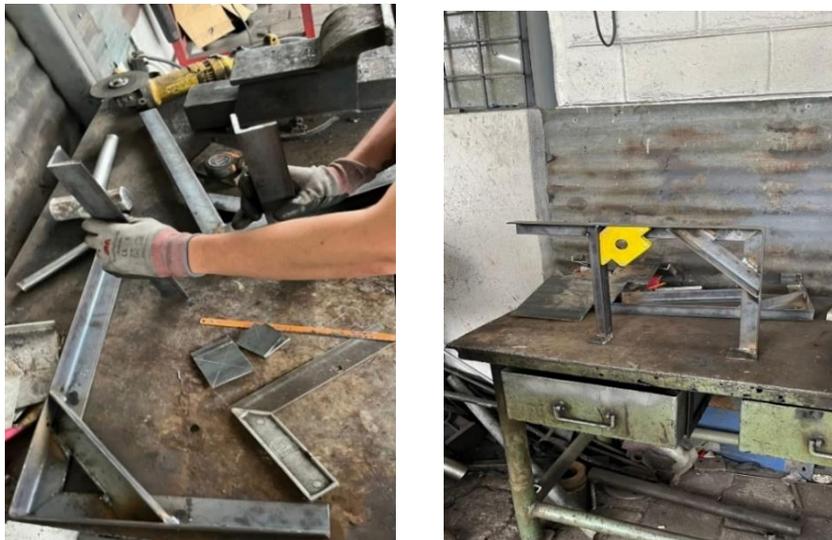


El corte se realiza en los puntos marcados, poniendo énfasis en el corte biselado de las bases para posteriormente ser doblados con apoyo de la entenalla.

5) Pre-armado (Soldadura)

Figura 31

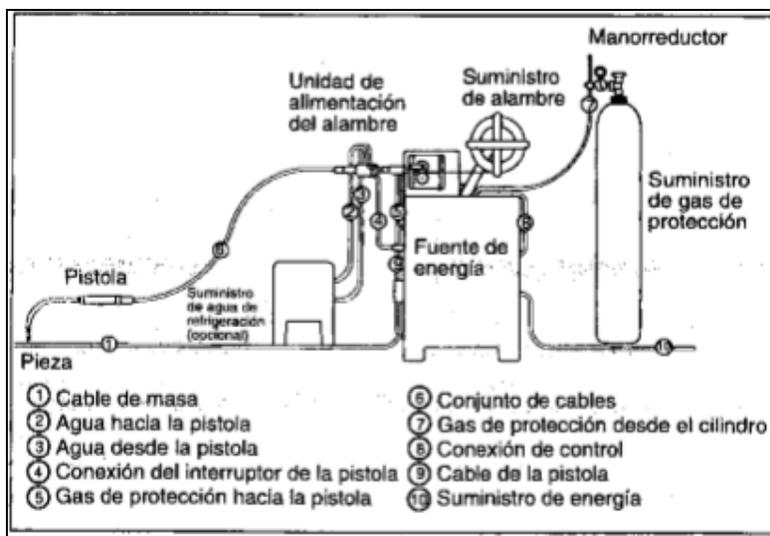
Soldadura de componentes



El pre armado se inicia por las bases, nervios y por último las placas superiores; la máquina a ser utilizada es la soldadura GMAW.

Figura 32

Partes de una Soldadura GMAW



Nota. Se detalla las partes que componen la soldadura GMAW. Tomado de *Soldadura GMAW* (p.19), por (López, 2019).

Figura 33*Soldadura de rodachines***Pasos para seguir:**

1. Realiza el doblado en las bases en forma de L, se suelda la unión a 45°.
2. Soldar las aristas previamente dobladas y los nervios entre columna y viga a una distancia de 200 [mm].
3. Soldar las bases a las placas superiores a una distancia de separación entre bases de 60 mm
4. Soldar los rodachines en la parte central de las placas superiores.
5. Esmerilar el exceso de material en la soldadura.

6) Inspección

Finalizado el proceso de soldado, unión o conexiones de las piezas, deberá realizarse una inspección del proceso, revisando cada junta, tomando en consideración el tamaño de la soldadura o unión, es decir longitud y aspecto exterior de la misma, de existir alguna falla en el proceso se realizará un retrabajo.

7) Transporte de la estructura

Se traslada la estructura al laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE", donde va a ser implementada en la máquina de fatiga RR. Moore para ensayos de fatiga a flexión rotativa de diferentes materiales.

8) Montaje en la máquina

Para el proceso de ensamblaje de la estructura fabricada para la máquina de ensayos a fatiga R.R. Moore, es necesario seleccionar los pernos adecuados con sus respectivas arandelas de presión.

Para este proceso de montaje se utiliza herramientas manuales de sujeción, como:

- Llaves Allen
- Llave #17

Adicionalmente, es necesario realizar perforaciones en la mesa de la máquina para asegurar su montaje.

Figura 34

Máquina de ensayos de fatiga R.R. Moore para materiales compuestos



9) Inspección

Se debe verificar el correcto ajustaje de los pernos a la mesa de la máquina RR Moore, la colocación de los pernos debe contar con arandelas de presión que den un mejor torque de ajuste.

10) Pintura

Finalmente se debe pintar la estructura para dar un buen acabado al trabajo realizado, la pintura debe mantenerse en buenas condiciones de homogeneidad.

Calibración de la máquina de ensayos de fatiga R.R. Moore

Para el proceso de calibración de la máquina de ensayos de fatiga a flexión rotativa también denominada máquina de ensayos por el método de R.R. Moore, es necesario considerar las limitaciones presentadas al momento de ejecutar los ensayos de fatiga en materiales compuestos, tales como:

- Reducción en el porcentaje de carga aplicada a causa del cable tensor a través de los rodachines.
- Deflexión en la probeta al momento de aplicar la carga corregida.

Para esto, es necesario seguir el procedimiento de calibración, el cual permite determinar la carga exacta que interactúa al momento de realizar los ensayos de fatiga en el material compuesto.

A continuación, se presenta el procedimiento que permite determinar el porcentaje de carga real que se aplica en el portapesas para los ensayos de fatiga.

Comparativa de carga aplicada a través de los rodachines

Para determinar la carga real aplicada a través de los rodachines metálicos en la máquina de fatiga R.R. Moore, es necesario utilizar los siguientes equipos y materiales.

Equipos

- Dinamómetro.
- Balanza digital.

Materiales

- Pesas patrón.
- Placa para agarre del dinamómetro.
- Cable tensor con y sin recubrimiento plástico
- Rodachines
- Portapesas

Procedimiento:

- 1) Implementar el sistema de sujeción para realizar las medidas mediante el uso de un dinamómetro.
- 2) Colocar el dinamómetro en el sistema montado.
- 3) Colocar la pesa patrón.
- 4) Encerar la medida del dinamómetro.
- 5) Tomar la medida marcada por el dinamómetro.
- 6) Repetir el procedimiento hasta completar con el peso total disponible de pesas patrón.
- 7) Determinar el error % entre la medida del dinamómetro (Real) vs la medida de las pesas patrón (Teórico).

Figura 35

Medición de la carga aplicada en la máquina de ensayos de fatiga



Nota. Implementación del sistema de medición de carga que se aplica en la máquina de ensayos de fatiga del Laboratorio de Mecánica de Materiales para su respectiva calibración.

Cable tensor con recubrimiento plástico

Tabla 9

Cargas disponibles de la máquina R.R. Moore

Cargas [kg]	
Porta pesas	3,5
Pesa 1	12,373
Pesa 2	6,186
Pesa 3	6,186
Pesa 4	3,093
Pesa 5	1,546

Tabla 10

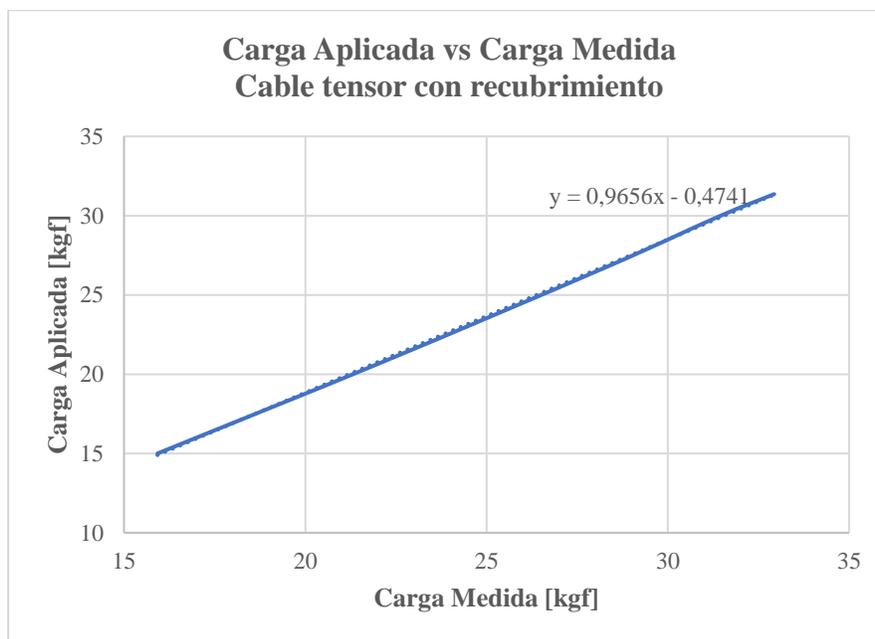
Medidas teóricas y reales de cargas en [kg] para el cable con recubrimiento

Teórico	Real	Teórico	Real	Teórico	Real	Teórico	Real	Teórico	Real
	14,95		20,55		26,45		30,15		31,4
15,923	15,05	22,109	20,70	28,295	26,80	31,388	29,80	32,934	31,4
	15,00		21,00		27,00		29,85		31,3
Prom.	15,00	Prom.	20,75	Prom.	26,75	Prom.	29,93	Prom.	31,4
Error %	6,15	Error %	6,55	Error %	5,78	Error %	4,86	Error %	5,0

Nota. La tabla hace referencia a la carga aplicada en el portapesas y la carga ejercida sobre la placa de la máquina de ensayos a fatiga R.R. Moore a través del cable tensor con recubrimiento plástico.

Figura 36

Carga Aplicada con cable tensor con recubrimiento plástico



Nota. La figura #32 es una comparativa de la carga aplicada versus la carga medida por el dinamómetro en la máquina de ensayos R.R. Moore.

Cable tensor sin recubrimiento plástico

Tabla 11

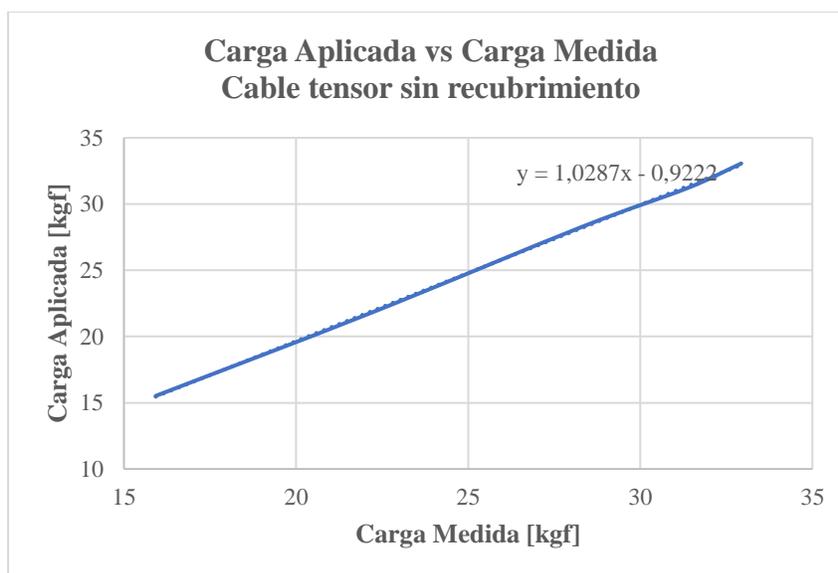
Medidas teóricas y reales de cargas en [kg] para el cable sin recubrimiento

Teórico	Real								
	15,30		21,50		28,30		31,35		33,20
15,92	15,55	22,11	21,85	28,30	28,25	31,39	31,10	32,93	32,90
	15,70		21,80		28,25		31,85		33,10
Prom.	15,52	Prom.	21,72	Prom.	28,27	Prom.	31,23	Prom.	33,07
Error %	2,62	Error %	1,81	Error %	0,10	Error %	0,52	Error %	0,40

Nota. La tabla hace referencia a la carga aplicada en la portapesas y la carga ejercida sobre la placa de la máquina de ensayos a fatiga R.R. Moore a través del cable tensor sin recubrimiento plástico.

Figura 37

Carga Aplicada con cable tensor sin recubrimiento

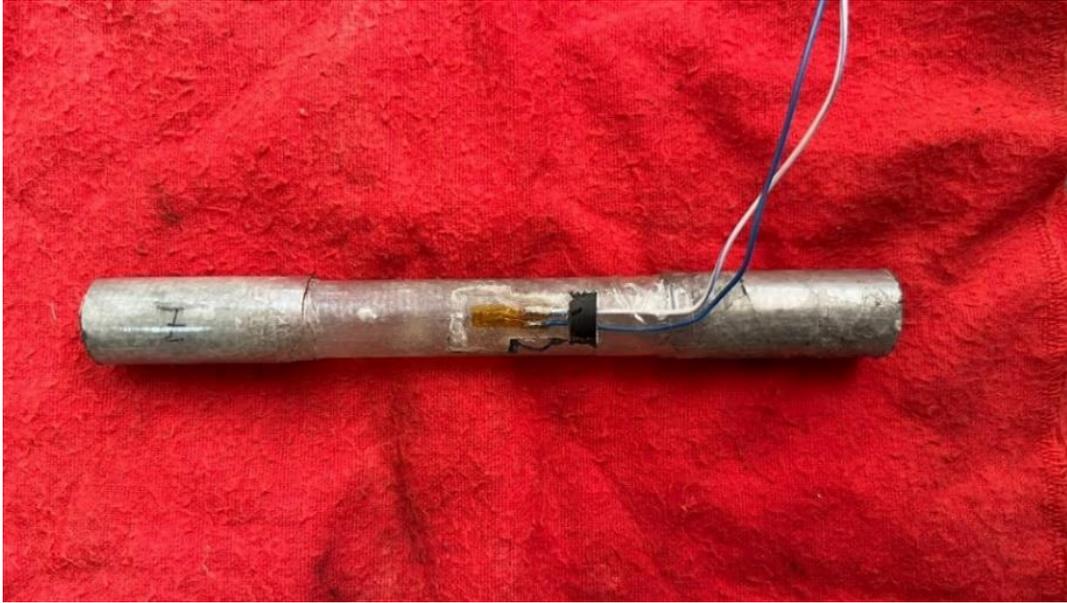


Nota. La figura #33 es una comparativa de la carga aplicada versus la carga medida por el dinamómetro en la máquina de ensayos R.R. Moore.

Determinación del módulo de elasticidad del material compuesto

Figura 38

Probeta de material compuesto 30% fibra de vidrio con Strain Gages



Nota. Se realizó el análisis en una probeta de composición igual al 30% en fibra de vidrio.

Procedimiento:

- Medir las dimensiones geométricas de la probeta.
 - Diámetro externo
 - Diámetro interno
- Implementar el equipo para un sistema de viga simplemente apoyada.
- Colocar los apoyos a una distancia de 12 cm.
- Colocar el portapesas en la mitad de la sección de la probeta.
- Medir las deformaciones unitarias mediante el uso de los strain gages.
- Tabular las mediciones de deformaciones unitarias para tres tipos de cargas.
 - 4,856 kg
 - 5,856 kg
 - 6,856 kg

- Calcular el promedio de las deformaciones unitarias.
- Aplicar la Ley de Hooke para el cálculo del módulo de elasticidad.

Tabla 12

Datos geométricos probeta 30% de fibra de vidrio

DATOS GEOMÉTRICOS PROMEDIO	
Diámetro Externo	14,24 [mm]
Diámetro Interno	13,00 [mm]

Nota. Los datos geométricos de diámetro externo e interno de la probeta de material compuesto representan al promedio de tres medidas previamente tomadas.

Tabla 13

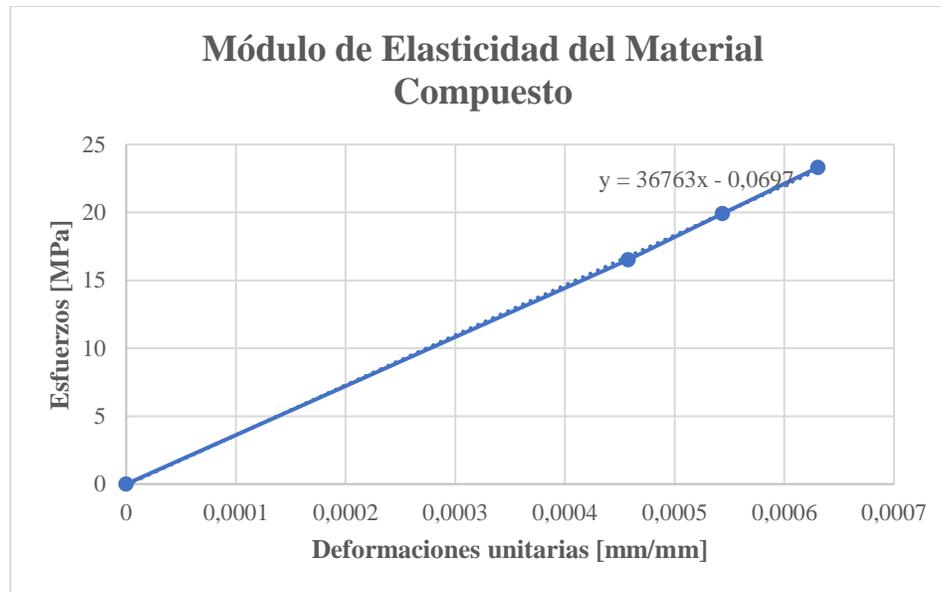
Ensayo para determinación del Módulo de Elasticidad del material compuesto.

Carga [kg]	Deformación Unitaria [10⁻⁶]	Carga [kg]	Deformación Unitaria [10⁻⁶]	Carga [kg]	Deformación Unitaria [10⁻⁶]
	457,00		544,00		631,00
4,856	459,00	5,856	543,00	6,856	632,00
	457,00		544,00		629,00
Promedios	457,67		543,67		630,67

Nota. La tabla hace referencia a las cargas aplicadas en el ensayo versus deformaciones unitarias medidas por los Strain Gages para determinar el módulo de elasticidad real del MC. Obteniendo la gráfica del módulo de Elasticidad del material compuesto.

Figura 39

Gráfica módulo de elasticidad del material compuesto a base de fibra de vidrio



Nota. La figura #39 representa la gráfica esfuerzo vs deformación unitaria del material compuesto para la determinación del módulo de Elasticidad experimental.

Donde:

La pendiente de la función es el módulo de elasticidad del material:

$$E_{MC} = 36763 \left[\frac{N}{mm^2} \right] \rightarrow 374750,25 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

Calculando el módulo de elasticidad con las propiedades mecánicas de los materiales.

$$E = V_f * E_f + V_m * E_m \quad (17)$$

Donde:

- V_m → Fracción volumétrica de la matriz (resina de poliéster)
- V_f → Fracción volumétrica de la fibra (fibra de vidrio tipo E)
- E_m → Módulo de elasticidad de la matriz (resina de poliéster)
- E_f → Módulo de elasticidad de la fibra (fibra de vidrio tipo E)
- E → Módulo de elasticidad del compuesto

Reemplazando los valores de módulo de elasticidad:

$$V_f = 30 \% = 0,3$$

$$V_m = 1 - 0,3 = 0,7$$

$$E = 0,3 * 76x10^3 [MPa] + 0,7 * 4x10^3 [MPa]$$

$$E = 25600 [MPa] \text{ Módulo de elasticidad Teórico}$$

Calculando la resistencia del material compuesto.

$$X_t = V_f \times X_{tf} \quad (18)$$

Donde:

- $X_{tf} \rightarrow$ Resistencia a la tracción de la fibra
- $X_t \rightarrow$ Resistencia a la tracción del compuesto

Reemplazando los valores en la ecuación 18:

$$X_t = 0,3x1400 [MPa]$$

$$X_t = 420 [MPa]$$

$$n = 2 \rightarrow \text{factor de seguridad}$$

Calculando el esfuerzo admisible.

$$\sigma_{adm} = \frac{X_t}{n} \quad (19)$$

$$\sigma_{adm} = \frac{420 [MPa]}{2}$$

$$\sigma_{adm} = 210 [MPa]$$

Calculando el esfuerzo aplicado.

$$\sigma = \frac{M * y}{I} \quad (20)$$

Calculando la inercia de la probeta.

$$I = \frac{\pi}{64} (de^4 - di^4) \quad (21)$$

$$I = \frac{\pi}{64} ((14,24 [mm])^4 - (13 [mm])^4)$$

$$I = 616,43 [mm^4]$$

Fibra más lejana de la línea neutra para el análisis.

$$y = \frac{de}{2} \quad (22)$$

$$y = \frac{14,24 [mm]}{2}$$

$$y = 7,12 [mm]$$

Reemplazando en la ecuación del esfuerzo y calculando el momento.

$$210 [MPa] = \frac{M * 7,12 [mm]}{616,43 [mm^4]}$$

$$M = \frac{210 \left[\frac{N}{mm^2} \right] * 616,43 [mm^4]}{7,12 [mm]}$$

$$M = 18181,20 [N * mm]$$

Partiendo de la ecuación del momento.

$$M = \frac{F}{2} * \frac{L}{2} \quad (23)$$

$$M = \frac{F * L}{4}$$

Donde:

$$L = 120 [mm]$$

Despejando la Fuerza y reemplazando los valores.

$$4 * M = F * L$$

$$F = \frac{18181,20 \left[\frac{N}{mm} \right] * 4}{120 [mm]}$$

$$F = 606,04 [N] \quad \rightarrow \quad F = 61,77 [Kg]$$

Aplicando la Ley de Hooke montada la probeta en la máquina R.R. Moore.

$$\sigma = E * \epsilon \quad (24)$$

$$\sigma = 374750,3 \left[\frac{kg}{cm^2} \right] * 1158,3x10^{-6}$$

$$\sigma = 434,08 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

Se trabaja con la pesa de 12,373 [kgf]

$$F = 12,373 \text{ [kgf]}$$

$$d = 20 \text{ [cm]}$$

Calculando el momento.

$$M = \frac{F}{2} * d \quad (25)$$

$$M = \frac{12,373 \text{ [kgf]}}{2} * 20 \text{ [cm]}$$

$$M = 123,6 \text{ [kgf * cm]}$$

Calculando el esfuerzo aplicado.

$$\sigma = \frac{123,6 \text{ [kgf * cm]} * 0,712 \text{ [cm]}}{0,0616 \text{ [cm}^4\text{]}}$$

$$\sigma = 1428,62 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

Cálculo del % de corrección para la carga aplicada

Factor de corrección

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_c} = \frac{434,08 \text{ [kg/cm}^2\text{]}}{1428,62 \text{ [kg/cm}^2\text{]}} = 0,3062 \quad \rightarrow \quad 30,62\%$$

Figura 40

Máquina de Ensayos Universales



Capítulo IV

Experimentación y Análisis

Estudio de porcentaje en volumen de la cantidad de fibra a considerar en los ensayos

Fracción Volumétrica

La fracción volumétrica se puede determinar en función del componente de la fibra, como de la resina que en adelante se denominará (Matriz) mediante la aplicación de las expresiones matemáticas sustentadas a través de la Ley de Mezclas de los materiales compuestos. Para el cálculo del porcentaje en volumen de cantidad de fibra de vidrio como de resina de poliéster, es necesario empezar desde el concepto del proceso de fabricación y su respectivo procedimiento de elaboración; para ello, se inicia con el pesaje tanto de fibra de vidrio como de resina de poliéster tomando en cuenta el % peso/peso de cada componente.

Terminología:

- $\rho_m \rightarrow$ Densidad de la matriz
- $\rho_f \rightarrow$ Densidad de la fibra
- $V_m \rightarrow$ Fracción volumétrica de la matriz (resina de poliéster)
- $V_f \rightarrow$ Fracción volumétrica de la fibra (fibra de vidrio tipo E)
- $m_f \rightarrow$ Masa de la fibra
- $m_m \rightarrow$ Masa de la matriz

A continuación, se ejemplifica el cálculo realizado para la obtención del % de fibra de vidrio y de matriz de resina de poliéster para la fabricación de las probetas de material compuesto.

Caso 1 $V_f=0,30$

Datos:

- $m_f = 10 [g]$
- $m_m = 10 [g]$

- $\rho_f = 2,58 \left[\frac{g}{cm^3} \right]$
- $\rho_m = 1,2 \left[\frac{g}{cm^3} \right]$

Partiendo de la Ley de Mezclas de los materiales compuestos:

$$M = m_f + m_m \quad (26)$$

Reemplazando los valores de masa:

$$M = 10 [g] + 10 [g]$$

$$M = 20 [g]$$

Utilizando la expresión que relaciona la masa con el volumen y la densidad de un material, se obtiene:

$$m_f = \rho_f * v_f \quad (27)$$

Despejando la variable de volumen:

$$v_f = \frac{m_f}{\rho_f}$$

Reemplazando los valores de masa y densidad para la fibra de vidrio:

$$v_f = \frac{10 [g]}{2,58 \left[\frac{g}{cm^3} \right]}$$

$$v_f = 3,876 [cm^3]$$

Calculando la misma expresión para la matriz de resina de poliéster:

$$v_m = \frac{10 [g]}{1,20 \left[\frac{g}{cm^3} \right]}$$

$$v_m = 8,333 [cm^3]$$

Resolviendo la ecuación de la Ley de Mezclas para la variable de Volumen:

$$V = v_f + v_m \quad (28)$$

$$V = 3,876 [cm^3] + 8,333 [cm^3]$$

$$V = 12,209 [cm^3]$$

Calculando el % de volumen para la fibra de vidrio y matriz de resina de poliéster, se tiene:

$$\%V_f = \frac{v_f}{V} \quad (29)$$

$$\%V_m = \frac{v_m}{V} \quad (30)$$

Reemplazando los valores de los volúmenes:

$$\%V_m = \frac{8,333 [cm^3]}{12,209 [cm^3]}$$

$$\%V_m = 0,68 \approx 0,70$$

$$\%V_f = \frac{3,876 [cm^3]}{12,209 [cm^3]}$$

$$\%V_f = 0,32 \approx 0,30$$

De esta manera se concluye que el valor de porcentaje de volumen de fibra de vidrio es del 30% y de resina de poliéster al 70%.

Caso 2 $V_f=0,40$

Datos:

- $m_f = 10 [g]$
- $m_m = 6,6 [g]$
- $\rho_f = 2,58 \left[\frac{g}{cm^3} \right]$
- $\rho_m = 1,2 \left[\frac{g}{cm^3} \right]$

Partiendo de la Ley de Mezclas de los materiales compuestos:

$$M = m_f + m_m \quad (31)$$

Reemplazando los valores de masa:

$$M = 10 [g] + 6,6 [g]$$

$$M = 16,6 [g]$$

Utilizando la expresión que relaciona la masa con el volumen y la densidad de un material, se obtiene:

$$m_f = \rho_f * v_f \quad (32)$$

Despejando la variable de volumen:

$$v_f = \frac{m_f}{\rho_f}$$

Reemplazando los valores de masa y densidad para la fibra de vidrio:

$$v_f = \frac{10 [g]}{2,58 \left[\frac{g}{cm^3} \right]}$$

$$v_f = 3,876 [cm^3]$$

Calculando la misma expresión para la matriz de resina de poliéster:

$$v_m = \frac{6,6 [g]}{1,20 \left[\frac{g}{cm^3} \right]}$$

$$v_m = 5,50 [cm^3]$$

Resolviendo la ecuación de la Ley de Mezclas para la variable de Volumen:

$$V = v_f + v_m \quad (33)$$

$$V = 3,876 [cm^3] + 5,50 [cm^3]$$

$$V = 9,376 [cm^3]$$

Calculando el % de volumen para la fibra de vidrio y matriz de resina de poliéster, se tiene:

$$\%V_f = \frac{v_f}{V} \quad (34)$$

$$\%V_m = \frac{v_m}{V} \quad (35)$$

Reemplazando los valores de los volúmenes:

$$\%V_m = \frac{5,50 [cm^3]}{9,376 [cm^3]}$$

$$\%V_m = 0,59 \approx 0,60$$

$$\%V_f = \frac{3,876 [cm^3]}{9,376 [cm^3]}$$

$$\%V_f = 0,41 \approx 0,40$$

De esta manera se concluye que el valor de porcentaje de volumen de fibra de vidrio es del 40% y de resina de poliéster al 60%.

Caso 3 $V_f=0,50$

Datos:

- $m_f = 10 [g]$
- $m_m = 4,2 [g]$
- $\rho_f = 2,58 \left[\frac{g}{cm^3} \right]$
- $\rho_m = 1,2 \left[\frac{g}{cm^3} \right]$

Partiendo de la Ley de Mezclas de los materiales compuestos:

$$M = m_f + m_m \quad (36)$$

Reemplazando los valores de masa:

$$M = 10 [g] + 4,2 [g]$$

$$M = 14,2 [g]$$

Utilizando la expresión que relaciona la masa con el volumen y la densidad de un material, se obtiene:

$$m_f = \rho_f * v_f \quad (37)$$

Despejando la variable de volumen:

$$v_f = \frac{m_f}{\rho_f}$$

Reemplazando los valores de masa y densidad para la fibra de vidrio:

$$v_f = \frac{10 [g]}{2,58 \left[\frac{g}{cm^3} \right]}$$

$$v_f = 3,876 [cm^3]$$

Calculando la misma expresión para la matriz de resina de poliéster:

$$v_m = \frac{4,2 [g]}{1,20 \left[\frac{g}{cm^3} \right]}$$

$$v_m = 3,50 [cm^3]$$

Resolviendo la ecuación de la Ley de Mezclas para la variable de Volumen:

$$V = v_f + v_m \quad (38)$$

$$V = 3,876 [cm^3] + 3,50 [cm^3]$$

$$V = 7,376 [cm^3]$$

Calculando el % de volumen para la fibra de vidrio y matriz de resina de poliéster, se tiene:

$$\%V_f = \frac{v_f}{V} \quad (39)$$

$$\%V_m = \frac{v_m}{V} \quad (40)$$

Reemplazando los valores de los volúmenes:

$$\%V_m = \frac{3,50 [cm^3]}{7,376 [cm^3]}$$

$$\%V_m = 0,47 \approx 0,50$$

$$\%V_f = \frac{3,876 [cm^3]}{7,376 [cm^3]}$$

$$\%V_f = 0,53 \approx 0,50$$

De esta manera se concluye que el valor de porcentaje de volumen de fibra de vidrio es del 50% y de resina de poliéster al 50%.

Como resultado del análisis realizado previamente, se detalla la tabla de porcentajes de fibra y matriz que serán tomados en cuenta en la fabricación de las probetas para ensayo de fatiga a flexión rotativa de material compuesto a base de fibra de vidrio y resina de poliéster:

Tabla 14

Resultados de los cálculos para el desarrollo de las probetas según el % de volumen de la matriz y la fibra.

DESCRIPCIÓN	PORCENTAJE 1	PORCENTAJE 2	PORCENTAJE 3
Matriz	50%	60%	70%
Fibra	50%	40%	30%

Descripción: La tabla hace relación al resultado de los cálculos realizados mediante el uso de los criterios de la Ley de Mezcla de los compuestos y de recomendaciones de fabricación por parte del departamento CICTE.

Análisis estadístico del tamaño de muestra

Población

Para conocer la cantidad de población necesaria para el estudio del ensayo de fatiga a flexión rotativa de material compuesto, se desarrollará un análisis estadístico que permita determinar la cantidad de población de muestreo necesario.

Muestra

Para determinar la muestra se tomó como referencia la normativa ASTM E 739-10 "Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue Data". (ASTM, 2015)

Tabla 15

Número de muestras de acuerdo con el tipo de prueba

Tipo de Prueba	Número mínimo de muestras
Preliminar y exploratorio (investigación exploratoria y pruebas de desarrollo)	6 a 12
Pruebas de investigación y desarrollo de componentes y muestras	6 a 12

Tipo de Prueba	Número mínimo de muestras
Datos permitidos para diseño	12 a 24
Datos de confiabilidad	12 a 24

Nota. La tabla hace referencia al número mínimo de muestras para el ensayo de fatiga.

Tomado de, “Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue Data”, por (ASTM, 2015).

El presente proyecto de titulación se realiza bajo el concepto de datos permitidos para el diseño, por lo que se realizó el ensayo de fatiga en 12 probetas de material compuesto para cada porcentaje de composición.

Aplicando conceptos de la estadística, el tamaño de la muestra de probetas de fibra de vidrio tomando como valor de error estándar del 5,5%, calculándose el tamaño de muestra:

$$n = \frac{Z\alpha^2 * p * q}{d^2} \quad (41)$$

Donde:

- $Z\alpha$ → El nivel de confianza [95% al 99%]
- d → Error máximo
- p → Proporción esperada (recomendable 0,95)
- $q = (1 - p)$ → Probabilidad que no ocurra

Tabla 16

Valores estadísticos para el cálculo de muestra

α	0,1	0,05	0,01	0,001
$Z\alpha$	1,645	1,96	2,576	3,291

Nota. Tomado de *Estudio del comportamiento a fatiga mecánica por flexión de materiales compuestos con fibra de cabuya (30%) y matriz poliéster (70%) para determinar el diagrama S-N* (p.144), por (Carrillo Ramírez, 2014).

Seleccionando los valores idóneos para el cálculo:

- $Z\alpha = 1,645$
- $p = 0,95$
- $q = 0,05$
- $d = 0,055$

Reemplazando los valores y calculando:

$$n = \frac{1,645^2 * 0,95 * 0,05}{0,055^2}$$

$$n = 42,49 \approx \mathbf{42 \text{ probetas}}$$

Se tomarán 42 probetas que serán divididas de la siguiente manera:

- 6 probetas para el ensayo de tracción.
- 3 probetas por cada punto del ensayo a fatiga.
- Puntos totales para el análisis de la curva igual a 4.
- Total, de probetas necesarias para cada porcentaje diferente de ensayo 14.
- Total, de probetas a fabricar 42.

Fabricación de las probetas

En el apartado de fabricación de las probetas, se describen los materiales, equipos y metodología utilizada en las diferentes etapas experimentales del proyecto de grado, con el fin de cumplir con los objetivos establecidos en el mismo tales como; fabricar y caracterizar probetas de material compuesto con matriz de resina de poliéster y refuerzo de fibras de vidrio en 3 diferentes porcentajes de composición. Luego de una revisión constante de bibliografía se determinó las características individuales de cada fase del compuesto, para desarrollar las etapas del proyecto, como: el diseño, adquisición del molde, fabricación de las probetas y ejecución de los ensayos de tracción y fatiga para su caracterización.

La fabricación de las probetas se llevó a cabo en el Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas del Ejército (CICTE), ya que cuenta con el laboratorio de materiales

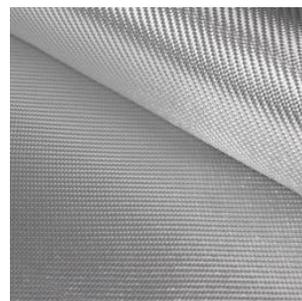
compuestos de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” bajo la dirección del Ingeniero Xavier Sánchez.

En la fabricación se contó con la ayuda del personal de la Fuerza Aérea Ecuatoriana (FAE), quienes gestionaron el proceso de fabricación de las probetas de material compuesto a base de fibra de vidrio y resina de poliéster. Así como también la facilidad de adquisición de materia prima para el procesamiento de las probetas, como es el caso del refuerzo del material compuesto, para estudio del caso se selecciona la fibra de vidrio tipo E, en presentación tejida, la cual se recortaba para obtener fibras largas de aproximadamente 33 cm de longitud siendo esta el área de trabajo y fibras cortas de 5 cm de longitud para los refuerzos, en los distintos tipos de lotes especificados previamente; mientras que, la matriz del material compuesto consiste en una de tipo de termoestable, exactamente resina de poliéster, cuya característica principal es la compatibilidad existente con las fibras de vidrio de tipo E, de manera que, facilite su adherencia entre sí. A continuación, se presenta la tabla en la cual se especifica los materiales necesarios para el proceso de fabricación.

Tabla 17

Materiales para el proceso de fabricación de probetas de material compuesto

DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	OBSERVACIONES
Fibra de vidrio tipo E	Espesor de fibra = 0.20 -0.25 [mm] $\rho = 2,58 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ Módulo de elasticidad = 76 [GPa] Resistencia a la tracción = 1.4 [GPa] Alargamiento de rotura= 1.4 – 3.5 [%]	Style 7725 Bi-Directional E-Glass Ver ficha técnica en anexos



DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	OBSERVACIONES
Resina de poliéster	$\rho = 1.20 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ Módulo de elasticidad = 4 [GPa] Resistencia a la tracción = 75 [MPa] Alargamiento de rotura = 2 [%]	Resina de poliéster Ver ficha técnica en anexos 
Plástico transparente	Medidas = 450 x 300 [mm]	
Acetato	Medidas formato A3 = 297 x 420 [mm] Espesor = 100 [μm]	
Set de mezclas y espátulas	Vasos de plásticos de 250 [ml] Espátulas de 110 x 60 x 260 [mm]	
Paños de limpieza	Óptima absorción, alto desempeño en el pulido o lustre. Paños de 330 x 330 [mm]	

DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	OBSERVACIONES
Alcohol industrial	Cada 100 [ml] contiene 96 [%] de alcohol etílico industrial.	
Papel lija #120	Dimensiones del papel: 9.1 x 11 [in]	
Green masking tape	Diámetro = 3 [in] Temperatura resistente = 120 [°C] Alargamiento de rotura = 14 [%]	
Horno de secado	Temperatura máxima = 300 [°C]. Transferencia de calor por convección	

Nota: Detalle de los materiales que se ocuparon para la fabricación de las probetas con sus respectivas características técnicas.

Tabla 18

Proceso de fabricación de probetas de material compuesto

ORD	DESCRIPCIÓN DE LA TAREA	HERRAMIENTAS	IMAGEN
1	Con el estilete retirar las impurezas impregnadas en el eje de acero inoxidable 304, luego con los paños, humedecer de alcohol industrial y pasar por el eje 2 veces.	Estiletes, paños secos, alcohol industrial.	
2	Con paños secos humedecer en la cera, pasar sobre el eje para preparar su superficie, esperar 5 minutos.	Desmoldante PVA Release film, cera Partall paste	
3	Usando la regla Olfa ruler y escuadras, marcar las zonas de corte en la fibra de vidrio, según el plano de fabricación.	Regla Olfa ruler, Marcador.	

ORD	DESCRIPCIÓN DE LA TAREA	HERRAMIENTAS	IMAGEN
4	Usando las tijeras realizar los cortes en las marcas establecidas sobre los tejidos.	Tijeras metálicas	
5	<p>Usando la balanza, pesar las fibras y la resina en la proporción requerida por el lote (Fibra – Resina).</p> <ul style="list-style-type: none"> • 50%-50% • 40%-60% • 30%-70% <p><i>Por c/10 gr. de resina se debe aplicar 2 gotas de peróxido de meck.</i></p>	Set de mezclas, balanza de peso, resina de poliéster.	 
6	Sobre el plástico transparente extender una capa fina de resina y colocar sobre la misma el tejido de fibra de vidrio ya establecido.	Set de mezclas, espátula, resina de poliéster, cinta masking.	

ORD	DESCRIPCIÓN DE LA TAREA	HERRAMIENTAS	IMAGEN
7	Enrollar la fibra de vidrio impregnada con resina sobre el eje de acero inoxidable 304 de ½ in.	Plástico transparente, cinta masking.	
8	Colocar una capa de acetato transparente sobre el perfil laminado para permitir un acabado homogéneo del perfil.	Acetato, cinta masking.	
9	Enrollar con cinta masking sobre el acetato aplicando presión en los extremos para evitar burbujas de aire en la unión.	Cinta masking.	
10	Introducir el perfil laminado en el horno de curado y programar una temperatura de 60°C durante 60 min.	Horno de curado	

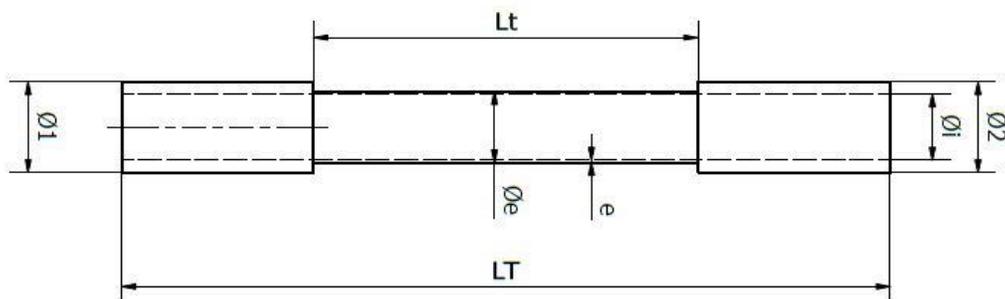
ORD	DESCRIPCIÓN DE LA TAREA	HERRAMIENTAS	IMAGEN
11	Terminado el proceso de curado, permitir un enfriamiento dentro del horno sin extraer el laminado hasta alcanzar la temperatura ambiente.	Horno de curado	
12	Luego del enfriamiento progresivo, proceder al desmoldado.	Banco de ajuste, martillo de goma.	
13	Con referencia a las dimensiones establecidas en el plano, adicionar segmentos de fibra humedecida con resina en las zonas de agarre.	Espátula, plástico transparente.	

ORD	DESCRIPCIÓN DE LA TAREA	HERRAMIENTAS	IMAGEN
14	Una vez obtenido el perfil tubular laminado proceder a medir la longitud con la ayuda de una regla graduada y cortar las probetas su longitud especificada.	Regla Olfa ruler, cortadora neumática.	
15	Obtenidas las probetas con las dimensiones requeridas proceder a los ensayos de tracción y fatiga para su respectiva recolección de datos.	Máquina de Tracción y fatiga.	

Nota. Es importante considerar el uso del EPP adecuado para evitar daños progresivos en la piel y vías respiratorias.

Figura 41

Dimensionamiento de la probeta



Simbología de las secciones de la probeta

- $L_T =$ Longitud total
- $L_t =$ Longitud de sección de trabajo
- $\emptyset_1 =$ Diámetro externo de refuerzo
- $\emptyset_2 =$ Diámetro externo de refuerzo
- $\emptyset_i =$ Diámetro interno de la sección de trabajo
- $\emptyset_e =$ Diámetro externo de la sección de trabajo
- $e =$ Espesor de la sección de trabajo

A continuación, se detalla las medidas geométricas obtenidas de las probetas al 50%, 40% y 30 % en fibra de vidrio tipo E con resina de poliéster.

Tabla 19

Medidas geométricas en probetas al 50% de fibra de vidrio

Probeta	L_T	L_t	\emptyset_1	\emptyset_2	\emptyset_e	\emptyset_i
1	138,40	69,15	15,43	15,55	13,98	12,98
2	138,60	66,60	15,69	15,40	14,06	12,90
3	139,50	70,30	16,20	15,69	14,18	12,94
4	140,65	67,36	15,28	15,45	13,86	12,66
5	141,33	71,62	15,63	15,92	13,93	12,60
6	140,48	68,10	16,05	16,25	13,92	12,69
7	143,20	63,28	15,60	15,80	14,16	12,99
8	141,24	66,50	15,45	16,13	13,96	12,98
9	142,70	71,28	15,38	15,55	13,76	12,64
10	139,85	70,85	16,20	15,70	14,09	13,03

Probeta	L_T	L_t	\emptyset_1	\emptyset_2	\emptyset_e	\emptyset_i
11	139,90	70,70	16,45	15,55	14,15	13,05
12	140,50	69,55	15,90	15,65	14,05	13,05

Nota: Lote de medidas tomadas de las probetas en [mm] al 50% en fibra.

Tabla 20

Medidas geométricas en probetas al 40% de fibra de vidrio

Probeta	L_T	L_t	\emptyset_1	\emptyset_2	\emptyset_e	\emptyset_i
1	139,45	68,62	16,90	16,98	14,30	12,96
2	139,20	66,82	16,40	16,62	14,75	13,60
3	142,20	70,40	15,87	15,68	14,10	12,98
4	142,80	71,20	16,27	16,22	14,50	13,52
5	139,53	66,85	16,38	16,60	14,60	13,45
6	139,45	58,50	15,71	15,57	14,20	12,80
7	140,45	58,60	15,46	15,95	14,32	12,98
8	141,30	58,22	15,40	15,69	13,85	12,63
9	141,15	62,70	16,14	16,05	14,08	12,98
10	140,65	69,75	16,50	16,40	14,12	13,15
11	139,65	70,25	16,35	16,55	14,04	13,05
12	139,45	70,85	16,75	16,45	14,14	13,09

Nota: Lote de medidas tomadas de las probetas en [mm] al 40% en fibra.

Tabla 21

Medidas geométricas en probetas al 30% de fibra de vidrio

Probeta	L_T	L_t	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_e	ϕ_i
1	140,96	69,06	15,72	15,94	14,00	12,98
2	142,10	66,66	15,43	15,95	14,19	13,03
3	139,89	66,29	16,02	15,80	14,22	13,05
4	140,13	66,03	16,10	15,66	14,02	13,00
5	140,22	68,45	15,93	15,53	14,15	12,94
6	140,90	70,28	15,54	16,05	14,16	12,85
7	143,05	64,46	16,10	16,05	14,15	12,90
8	142,50	66,30	16,40	16,26	14,24	13,00
9	142,70	67,60	16,30	15,95	14,15	12,70
10	142,83	66,50	15,65	15,63	13,90	12,98
11	140,32	71,03	15,80	16,02	13,94	12,98
12	143,00	75,20	16,10	16,25	14,08	13,10

Nota: Lote de medidas tomadas de las probetas en [mm] al 30% en fibra.

Ensayos de tracción

La resistencia a la tracción se define como una medida de la capacidad que tiene un material a soportar esfuerzos tensionales. El ensayo de tracción es uno de los ensayos más importante en el análisis de resistencia de un material, para lo cual, se tomará como punto de partida el ensayo de tracción en las probetas de material compuesto, con el objetivo de tener su resistencia última a la tracción para proceder a calcular los puntos de análisis para las curvas de esfuerzo vs vida definido previamente al 80%, 60%, 40%, 20% de la resistencia última a la tracción. La normativa que rige en los ensayos a tracción es la **ASTM D 3039** "Standard Test Method for Tensile Properties of Composite Materials" en la cual especifica el tipo de máquina

necesaria, procedimiento y componentes. El análisis se lo realiza aplicando un esfuerzo sobre las probetas, la cual se sujeta mediante el uso de mordazas una móvil y otra fija que permiten ir desplazando mediante un incremento de su esfuerzo de forma controlada.

A continuación, se definen los parámetros y el procedimiento necesario para la ejecución del ensayo a tracción en materiales compuestos.

Equipos

- Máquina de ensayos universales AMSLER

Instrumentos

- Calibrador pie de rey
- Flexómetro

Materiales

- Probetas de material compuesto.
- Eje de Acero 1018 para la fabricación de topes

Figura 42

Máquina de ensayos universal AMSLER.



Tabla 22*Especificaciones Máquina de Ensayos Universales*

Especificaciones Máquina de Ensayos	
Universales	
Marca	AMSLER
Modelo	FM-1033
Voltaje	220 [V]
Fases	3
Ciclos	60 [Hz]
Peso	500 [kg]
Tipo de motor	P-8
Velocidad Máx	1700 [rpm]
Capacidad	Tracción: 10 [Ton]
Máxima	Compresión: 200 [Ton]
Potencia	2 [HP]
Refrigerante	N/A

Nota. La tabla representa las especificaciones técnicas de la máquina de ensayos universal “AMSLER” del Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Procedimiento

- Medir las dimensiones de la sección transversal
- Diámetro externo e interno de la probeta
- Medir la longitud total de la probeta.
- Medir la longitud de trabajo.
- Aplicar carga progresiva con la máquina de ensayos universales.

- Observar el diagrama fuerza-desplazamiento generado por el software.
- Tabular los datos
- Obtener las gráficas fuerza-desplazamiento / Fuerza máxima

Es necesario realizar la comparativa de los valores teóricos con los prácticos, para lo cual, se aplicará conocimientos de mecánica de materiales para la determinación del esfuerzo de tracción teórico el cual va a ser comparado con el valor experimental obtenido por el ensayo de tracción en las probetas de material compuesto.

Análisis resistencia a la tracción del material compuesto (teórico)

Partiendo de la ecuación de la resistencia a tracción del material compuesto.

$$X_t = V_f * X_{tf} \quad (42)$$

Donde:

- $X_t \rightarrow$ Resistencia a la tracción del material compuesto
- $V_f \rightarrow$ Fracción Volumétrica
- $X_{tf} \rightarrow$ Resistencia a la tracción de la fibra de vidrio

Calculando la resistencia a la tracción para $V_f=0,30$ con la ecuación 42.

$$X_t = V_f * X_{tf}$$

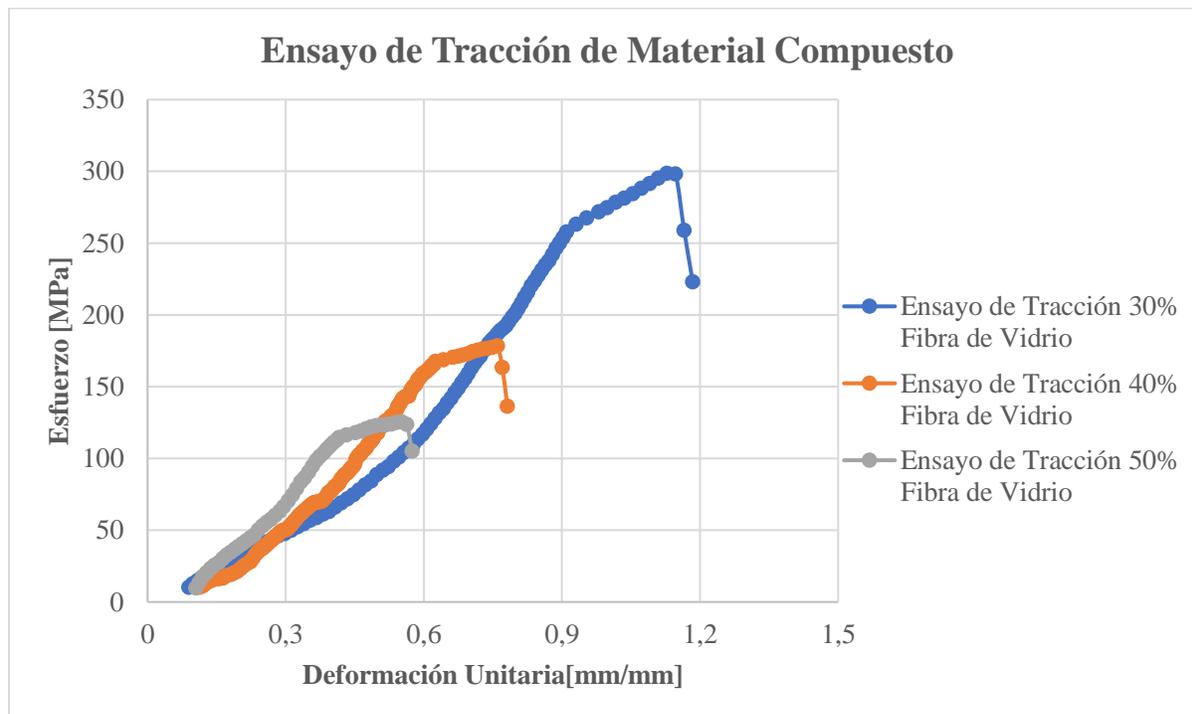
$$X_t = 0,3 * 1400 [MPa]$$

$$\mathbf{X_t = 420 [MPa]}$$

Gráficas de ensayo a tracción en material compuesto

Figura 43

Ensayo de tracción de material compuesto en diferentes composiciones



Análisis: De acuerdo con la gráfica resultante de esfuerzo vs deformación unitaria en el ensayo de tracción, se obtuvo un esfuerzo máximo para el 30% de fibra de vidrio igual a 298,79 [MPa], para el caso del 40% de fibra un esfuerzo máximo de 178,63 [MPa] y para la composición del 50% de fibra un valor máximo de esfuerzo de 125,73 [MPa]; siendo la composición del 30% de fibra de vidrio en volumen la de mayor resistencia a la tracción.

Comparación de resistencia a la tracción del material compuesto real vs teórico

Tabla 23

Resistencia a la tracción del material compuesto

Fracción Volumétrica de Fibra [Vf]	Teórico [MPa]	Real [MPa]
0,30	420	350,93
0,40	560	316,09

Fracción Volumétrica de Fibra [Vf]	Teórico [MPa]	Real [MPa]
0,50	700	213,91

Nota. La tabla #23 representa la comparación entre la resistencia a la tracción del material compuesto teórico con el experimental para las diferentes fracciones volumétricas.

Análisis de carga a utilizar en el ensayo de fatiga

Para determinar la carga necesaria para cada ensayo de fatiga a flexión rotativa, se fundamentó en el resultado del esfuerzo último de tracción del material compuesto sometido al ensayo de tracción en el Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE" por consiguiente, se calculó la carga al 80%-60%-40%-20% del valor de esfuerzo último a la tracción, de esta manera se obtendrán los puntos que conformarán la gráfica de esfuerzo vs ciclos del material.

A continuación, se ejemplifica el cálculo realizado para un Vf= 0.50 de fibra de vidrio.

Datos:

- $\phi_e = 14,1 [mm]$
- $\phi_i = 13,1 [mm]$
- $A = 21,36 [mm^2]$

Calculando la Inercia:

$$I = \frac{\pi}{64} * (\phi_e^4 - \phi_i^4) \quad (43)$$

$$I = \frac{\pi}{64} * [(14,1 mm)^4 - (13,1 mm)^4]$$

$$I = 494,58 [mm^4]$$

Partiendo del ensayo de tracción:

$$\sigma_{ut} = 213,91 [MPa]$$

Partiendo de la expresión de esfuerzo:

$$\sigma = \frac{M * y}{I} \quad (44)$$

Donde:

$$\sigma = \sigma_{ut} = \frac{M * y}{I}$$

Despejando el momento:

$$M = \frac{\sigma_{ut} * I}{y}$$

Reemplazando los valores tanto geométricos como de esfuerzo, donde “y” es el punto más lejano desde la línea neutra:

$$y = \frac{\phi_e}{2} = \frac{14,1 [mm]}{2} = 7,05 [mm]$$

$$M = \frac{213,91 [MPa] * 494,58 [mm^4]}{7,05 [mm]} = 15006,10 [N * mm]$$

Utilizando la expresión del cálculo de momento flector:

$$M = F * 200 [mm]$$

Despejando la variable de fuerza:

$$F = \frac{M}{200 [mm]}$$

Reemplazando el valor de momento:

$$F = \frac{15006,10 [N * mm]}{200 [mm]}$$

$$F = 75,03 [N]$$

Considerando que la fuerza se aplica en dos puntos de apoyo y expresándolo en la unidad kgf:

$$F_1 = F_2 = \frac{75,03 [N]}{9,81 \left[\frac{N}{kgf} \right]} * 2$$

$$F_1 = F_2 = 15,296 [kgf]$$

Aplicando el factor de corrección previamente calculado de 0,3062, se tiene una fuerza de:

$$F_1 = F_2 = 0,3062 * 15,296 [kgf] = 4,683 [kgf]$$

Calculando la carga adecuada para 80%-60%-40%-20% aplicando el factor de corrección de 0,3062 y tomando en cuenta la disponibilidad de pesas:

Tabla 24

Carga para ensayo de fatiga - 50% Fibra de vidrio

Denominación	Carga Aplicada	Carga Corregida	Unidad
0,80 σ_{sut}	41,605	12,739	kgf
0,60 σ_{sut}	32,325	9,898	kgf
0,40 σ_{sut}	21,500	6,583	kgf
0,20 σ_{sut}	13,919	4,262	kgf

Nota. La tabla describe los valores de carga necesaria para cada punto de análisis en la obtención de las curvas esfuerzo vs vida del material compuesto al 50% de fibra de vidrio y 50% de resina de poliéster.

A continuación, se detalla las tablas de datos referente a las diferentes cargas.

Tabla 25

Carga para ensayo de fatiga - 40% Fibra de vidrio

Denominación	Carga Aplicada	Carga Corregida	Unidad
0,80 σ_{sut}	60,884	18,643	kgf
0,60 σ_{sut}	45,419	13,907	kgf
0,40 σ_{sut}	30,779	9,425	kgf
0,20 σ_{sut}	20,105	6,156	kgf

Nota. La tabla describe los valores de carga necesaria para cada punto de análisis en la obtención de las curvas esfuerzo vs vida del material compuesto al 40% de fibra de vidrio y 60% de resina de poliéster.

Tabla 26

Carga para ensayo de fatiga - 30% Fibra de vidrio

Denominación	Carga Aplicada	Carga Corregida	Unidad
0,80 σ_{sut}	68,284	20,909	kgf
0,60 σ_{sut}	51,652	15,057	kgf
0,40 σ_{sut}	33,873	10,372	kgf
0,20 σ_{sut}	21,605	6,615	kgf

Nota. La tabla describe los valores de carga necesaria para cada punto de análisis en la obtención de las curvas esfuerzo vs vida del material compuesto al 30% de fibra de vidrio y 70% de resina de poliéster.

Es necesario considerar la disponibilidad de pesas normadas que cuenta el laboratorio de mecánica de materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

Tabla 27

Pesas disponibles para ensayo a fatiga en la máquina R.R. Moore

Cantidad	Pesas disponibles [kgf]
1	1,546
1	3,093
2	6,186
1	7,400
3	10,000
1	12,373

Nota. La tabla describe la cantidad de pesas disponibles para ensayos de fatiga a flexión rotativa en la máquina R.R. Moore.

Ejecución de los ensayos a fatiga utilizando la máquina de R.R. Moore

El ensayo a fatiga tiene como finalidad determinar la vida de un material sometido a cargas cíclicas, la zona crítica y la ubicación donde se produce la falla de una sección de área determinada.

En la obtención de datos que nos arroja el material sometido al ensayo a fatiga, se debe realizar varias muestras para obtener una apreciación del comportamiento del material ante cargas dinámicas. Estas muestras serán sometidas a varios niveles de esfuerzo siendo estos del: 20%, 40%, 60% y 80% del esfuerzo último a tracción; lo fundamental del ensayo es que la amplitud de esfuerzos se mantenga constantes en un tiempo determinado.

En función al porcentaje de esfuerzo aplicado en los ensayos se obtiene las siguientes categorías de pruebas:

- i. **Prueba práctica:** el esfuerzo ejercido en la probeta predice el fallo del material compuesto después de un número alto de ciclos entre los 10^4 a 10^7 .
- ii. **Prueba corta:** los niveles de esfuerzos se ubican fuera de la zona elástica.
- iii. **Prueba larga:** En esta prueba los niveles de esfuerzos están ubicados por debajo del límite de fatiga del material compuesto.

El estudio sobre los defectos lineales que se producen en los materiales compuestos tales como las dislocaciones no son tan conocido como lo es en los metales, en los materiales compuestos la estructura molecular viene dada por una estructura continua que es la matriz y otra dispersa denominada refuerzo de fibra, este tipo de estructura es un factor importante para que el inicio de la grieta en la fase de iniciación de la falla dependa de múltiples factores.

Estos factores tienden a ser: la manufactura de la probeta, si la probeta es obtenida por moldeo, etc. Así también, existen parámetros a tomar en cuenta en los ensayos, estos son la velocidad de deformación, el nivel de carga, tipo de carga, la forma de la onda cíclica y el aumento de temperatura en caso de existir.

Otro factor importante que influye en la ejecución de los ensayos es conocer el tipo de máquina que se utilizará, esto es fundamental ya que de ahí depende la manera en el cual se aplicará la carga en las probetas, si será oscilante o pulsatoria en el tiempo. En el capítulo 3 se menciona el rediseño de la máquina R. R. Moore cuyo principio es fatiga por flexión rotativa, donde las cargas son oscilantes en el tiempo, siendo la más usada en el estudio del comportamiento de los materiales a fatiga.

También es importante, tomar en cuenta que, aunque en los últimos años se ha venido trabajando con materiales compuestos en la industria, todavía no existe por parte de las normas del código ASME (American Society of Mechanical Engineers) un proceso que garantice el ensayo a fatiga en materiales compuestos mediante el uso de la máquina R. R. Moore.

Determinación de las curvas esfuerzo-vida para fibra de vidrio

Para poder determinar la ecuación ajustada de las curvas de esfuerzo vida del material compuesto, es necesario basarse en la normativa ASTM E739-10 “Standars Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain – Life (ϵ -N) Fatigue Data”, (ASTM, 2015)

La ecuación que define y se ajusta para los ensayos de fatiga de material compuesto es de la forma:

$$N = aS^b \quad (45)$$

Aplicando las propiedades de los logaritmos:

$$\log N = \log a + b * \log S \quad (46)$$

Estimando los valores de las constantes a y b para la ecuación:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X}) * (Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2} \quad (47)$$

$$a = \bar{Y} - b * \bar{X} \quad (48)$$

Donde:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^k \frac{X_i}{k} \quad (49)$$

$$\bar{Y} = \sum_{i=1}^k \frac{Y_i}{k} \quad (50)$$

$$X_i = \log S_i \quad (51)$$

$$Y_i = \log N_i \quad (52)$$

Tabla 28

Esfuerzos aplicados y el número de ciclos con Vf=0,5

Esfuerzo Aplicado [MPa]	Ciclos	Log S	Log N
90,69	250	1,958	2,398
78,59	400	1,895	2,602
72,83	316	1,862	2,500
61,12	1250	1,786	3,097
55,34	2050	1,743	3,312
59,28	2550	1,773	3,407
39,71	3500	1,599	3,544
47,86	3633	1,680	3,560
43,85	4255	1,642	3,629
28,34	22301	1,452	4,348
27,18	26852	1,434	4,429
30,02	40480	1,477	4,607

Nota. La tabla especifica los esfuerzos aplicados y el número de ciclos del ensayo de fatiga de material compuesto con Vf=0,50 y la transformación de valores a escala logarítmica.

Reemplazando los valores para el cálculo de las constantes a y b:

$$b = -4,094$$

$$a = 10,379$$

Reemplazando en la ecuación logarítmica:

$$\log N = 10,379 - 4,094 * \log S$$

$$\log S = 2,5351 - 0,2442 * \log N$$

Aplicando propiedades de logaritmos de base 10:

$$S = 342,85N^{-0,2442}$$

Aplicando la ecuación previamente calculada y que mejor se ajusta, se procede a tabular los datos del ensayo de fatiga de material compuesto a base de fibra de vidrio.

Tabla 29

Datos del ensayo de fatiga a flexión rotativa de material compuesto Vf=0,50

Descripción	Nro	Esfuerzo Aplicado [MPa]	Ciclos
Ensayo	1	90,69	250
0,80*σ_sut	2	78,59	400
	3	72,83	316
Ensayo	4	61,12	1250
0,60*σ_sut	5	55,34	2050
	6	59,28	2550
Ensayo	7	39,71	3500
0,40*σ_sut	8	47,86	3633
	9	43,85	4255
Ensayo	10	28,34	22301
0,20σ_sut	11	27,18	26852
	12	30,02	40480

Nota. La tabla hace referencia a los valores obtenidos de los ensayos de fatiga para Vf=0,50.

Tabla 30

Datos del ensayo de fatiga a flexión rotativa de material compuesto Vf=0,40

Descripción	Nro	Esfuerzo Aplicado [MPa]	Ciclos
Ensayo	1	97,90	200
0,80*σ_{sut}	2	104,69	250
	3	117,89	280
Ensayo	4	93,35	450
0,60*σ_{sut}	5	79,81	410
	6	71,42	480
Ensayo	7	49,34	4600
0,40*σ_{sut}	8	57,46	6830
	9	60,73	8050
Ensayo	10	44,10	41539
0,26*σ_{sut}	11	43,82	45055
	12	40,97	50933

Nota. La tabla hace referencia a los valores obtenidos de los ensayos de fatiga para Vf=0,40.

Tabla 31

Datos del ensayo de fatiga a flexión rotativa de material compuesto Vf=0,30

Descripción	Nro	Esfuerzo Aplicado [MPa]	Ciclos
Ensayo	1	145,81	133
0,80*σ_{sut}	2	126,49	250
	3	124,98	466
Ensayo	4	109,96	633
0,60*σ_{sut}	5	92,78	700
	6	86,49	813

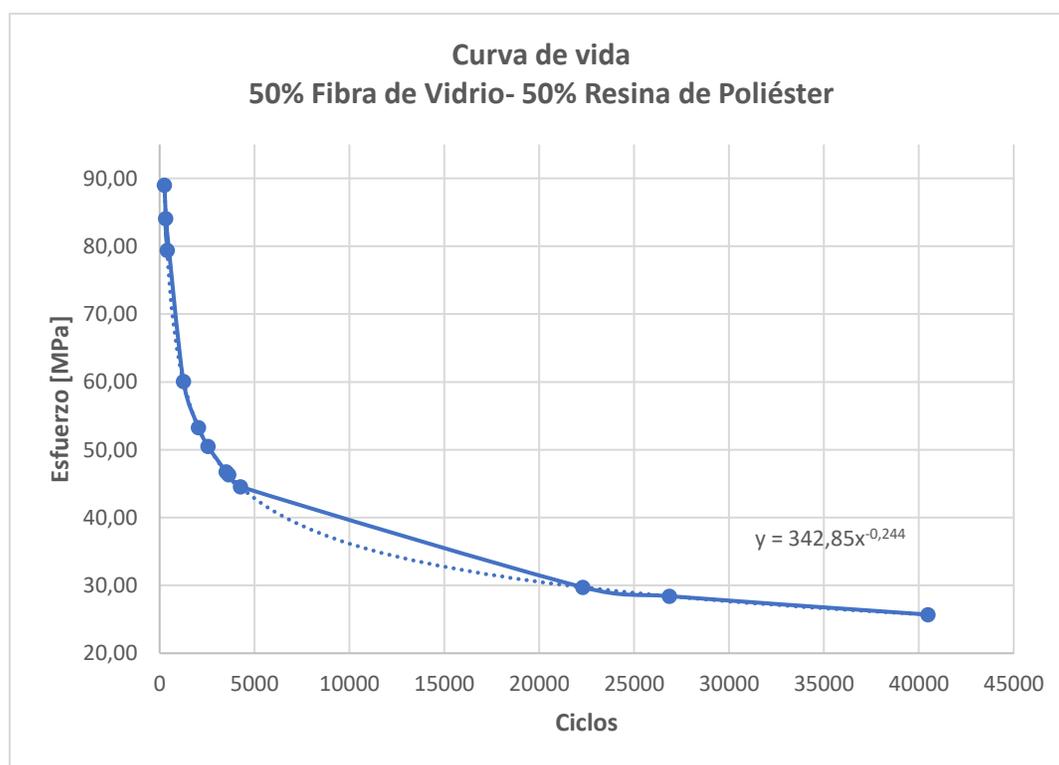
Descripción	Nro	Esfuerzo Aplicado [MPa]	Ciclos
Ensayo	7	59,15	5666
0,40* σ_{sut}	8	58,76	7750
	9	52,10	11500
Ensayo	10	51,36	52766
0,20 σ_{sut}	11	49,14	58029
	12	47,24	60345

Nota. La tabla hace referencia a los valores obtenidos de los ensayos de fatiga para $V_f=0,30$.

Análisis de resultados

Figura 44

Curva S-N del Material Compuesto $V_f=0,50$ $V_m=0,50$



Análisis: En la figura #44 se presenta la gráfica de la curva de vida del material compuesto en composición igual a $V_f=50\%$ y $V_m=50\%$ donde tiene un esfuerzo máximo de 90,69 [MPa] y un mínimo de 27,18 [MPa] con ciclos iguales a 250 y 40480 respectivamente.

Figura 45

Probeta #1 al 50 % en fibra de vidrio y 50% de resina de poliéster



Análisis: En la figura #45, la probeta trabajó al 80% del esfuerzo último a tracción, la rotura se produjo a los 250 ciclos con una carga aplicada de 12,739 [kgf], la falla se genera a un extremo del área de trabajo prediciendo que falla por fibra en dirección longitudinal.

Figura 46

Probeta #4 al 50 % en fibra de vidrio y 50% de resina de poliéster



Análisis: En la figura #46, la probeta trabajó al 60% del esfuerzo último a tracción, la rotura se produjo a los 1250 ciclos con una carga aplicada de 9,898 [kgf]; existen dos tipos de falla una completa y otra incompleta en la longitud de trabajo de la probeta de material compuesto.

Figura 47

Probeta #7 al 50 % en fibra de vidrio y 50% de resina de poliéster



Análisis: En la figura #47, la probeta trabajó al 40% del esfuerzo último a tracción, la rotura se produjo a los 3500 ciclos con una carga aplicada de 6,538 [kgf]; la rotura se produce por falla de la matriz (resina) en dirección longitudinal ubicada a un extremo de la probeta.

Figura 48

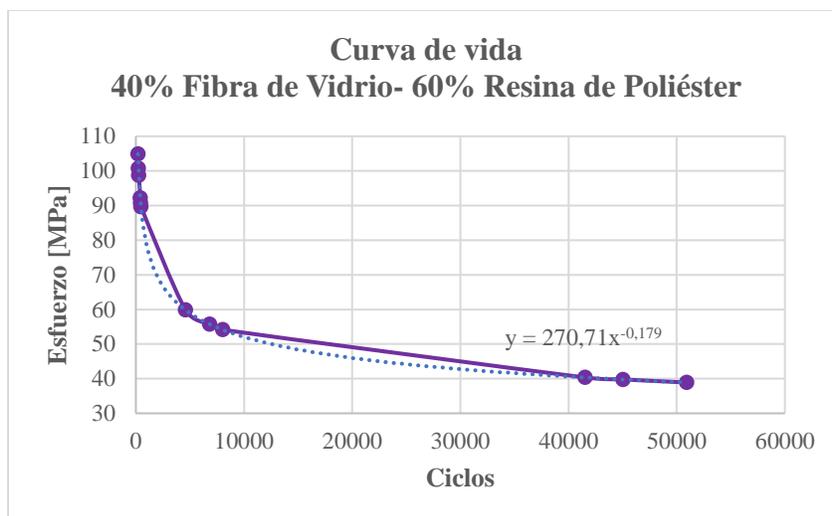
Probeta #10 al 50 % en fibra de vidrio y 50% de resina de poliéster



Análisis: En la figura #48, la probeta trabajó al 20% del esfuerzo último a tracción, la falla se produjo a los 22301 ciclos con una carga aplicada de 4,262 [kgf], la rotura se generó por su total desprendimiento de la fibra en dirección longitudinal.

Figura 49

Curva S-N del Material Compuesto Vf=0,40 Vm=0,60



Análisis: En la figura #49 representa la gráfica de la curva de vida del material compuesto en composición igual a Vf=40% y Vm=60%, en la cual tiene un esfuerzo máximo de 117,89 [MPa] y un mínimo de 40,97 [MPa] con ciclos iguales a 200 y 50933 respectivamente, con un comportamiento exponencial decreciente.

Figura 50

Probeta #2 al 40 % en fibra de vidrio y 60% de resina de poliéster



Análisis: En la figura #50, la probeta trabajó al 80% del esfuerzo último a tracción, la rotura se produjo a los 250 ciclos con una carga aplicada de 18,643 [kgf], se observa dos tipos de desprendimiento de material, uno total y otro parcial, se predice que la falla se dio tanto por fibra como por resina en la dirección longitudinal.

Figura 51

Probeta #5 al 40 % en fibra de vidrio y 60% de resina de poliéster



Análisis: En la figura #51, la probeta trabajó al 60% del esfuerzo último a tracción, la falla por rotura se produjo a los 410 ciclos con una carga aplicada de 13,907 [kgf], la ubicación de la rotura se da al final del cambio de sección de la longitud de trabajo con el diámetro de refuerzo, motivo por el cual en ese punto existió un concentrador de esfuerzos.

Figura 52

Probeta #8 al 40 % en fibra de vidrio y 60% de resina de poliéster



Análisis: En la figura #52, la probeta trabajó al 40% del esfuerzo último a tracción, la falla por rotura se produjo a los 5830 ciclos con una carga aplicada de 9,425 [kgf], se observa la generación de una zona de coloración blanquecina en la parte del corte por lo que la falla tiene de comportamiento polimérico por lo que se predice que empezó la falla por matriz(resina).

Figura 53

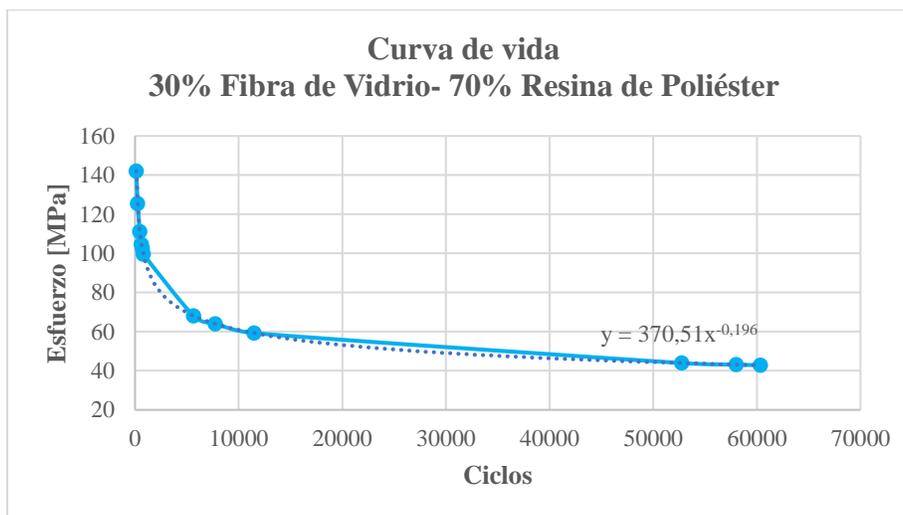
Probeta #11 al 40 % en fibra de vidrio y 60% de resina de poliéster



Análisis: En la figura #53, la probeta trabajó al 20% del esfuerzo último a tracción, la falla por rotura se produjo a los 18055 ciclos con una carga aplicada de 6,156 [kgf], la rotura se genera en los dos cambios de sección de los diámetros, esto predice que los concentradores de esfuerzos influyeron en el desprendimiento de material.

Figura 54

Curva S-N del Material Compuesto Vf=0,30 Vm=0,70



Análisis: En la figura #54 representa la gráfica de la curva de vida del material compuesto en composición igual a Vf=30% y Vm=70%, en la cual tiene un esfuerzo máximo de 145,81 [MPa] y un mínimo de 47,24 [MPa] con ciclos iguales a 133 y 60345 respectivamente, con un comportamiento de forma exponencial decreciente.

Figura 55

Probeta #3 al 30 % en fibra de vidrio y 70% de resina de poliéster



Análisis: En la figura #55, la probeta trabajó al 80% del esfuerzo último a tracción, la falla por rotura se produjo a los 466 ciclos con una carga aplicada de 20,909 [kgf], se observa que la rotura fue ocasionada por falla en fibra, justo en el cambio de sección de la probeta.

Figura 56

Probeta #6 al 30 % en fibra de vidrio y 70% de resina de poliéster



Análisis: En la figura #56, la probeta trabajó al 60% del esfuerzo último a tracción, la falla por rotura se produjo a los 813 ciclos con una carga aplicada de 15,816 [kgf], la rotura se generó en el inicio del área de trabajo provocando una separación total con del diámetro de refuerzo, la fibra cedió ante la carga aplicada.

Figura 57

Probeta #9 al 30 % en fibra de vidrio y 70% de resina de poliéster



Análisis: En la figura #57, la probeta trabajó al 40% del esfuerzo último a tracción, la falla por rotura se produjo a los 11500 ciclos con una carga aplicada de 10,372 [kgf], se generó dos tipos de falla por fibra y matriz(resina) siendo la de fibra la de mayor afección.

Figura 58

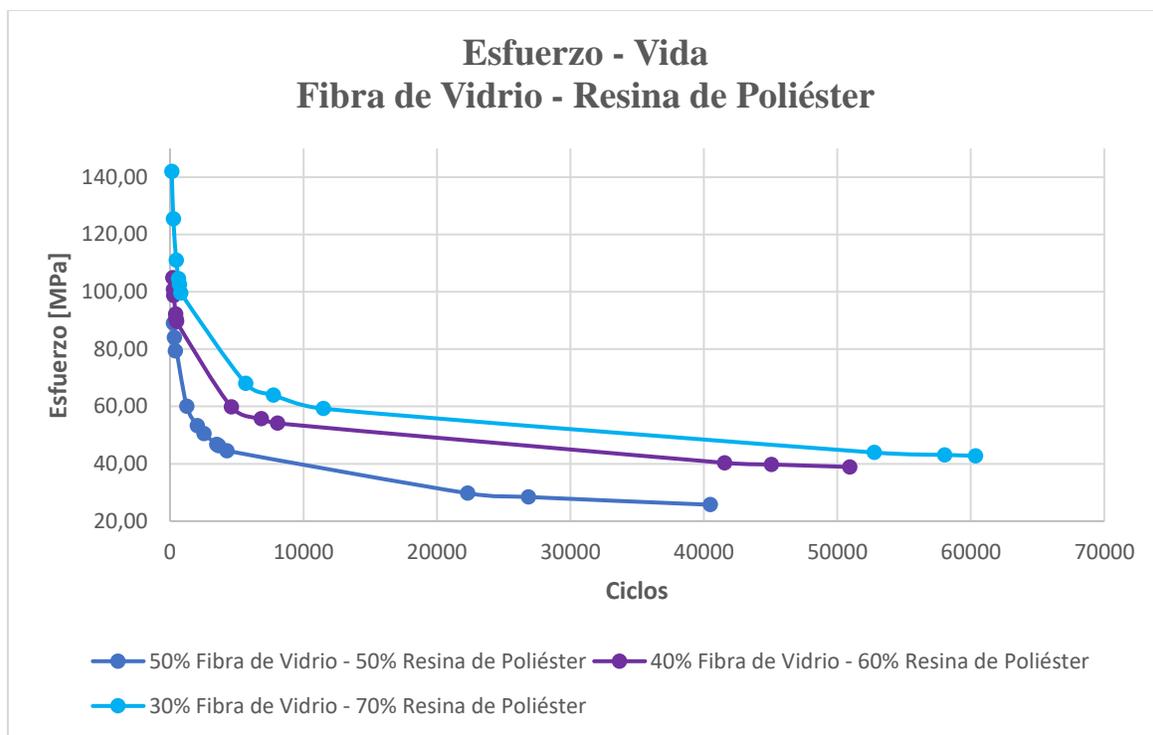
Probeta #12 al 30 % en fibra de vidrio y 70% de resina de poliéster



Análisis: En la figura #58, la probeta trabajó al 20% del esfuerzo último a tracción, la falla por rotura se produjo a los 60345 ciclos con una carga aplicada de 6,615 [kgf], la rotura se generó en el concentrador de esfuerzo que se ubica al extremo de la probeta.

Figura 59

Curva S-N del Material Compuesto al 30%, 40%, 50% de Fibra de Vidrio



Análisis: En la figura #59 representa las gráficas de las curvas de vida del material compuesto en sus diferentes composiciones de fibra de vidrio y resina de poliéster; se evidencia que, a menor porcentaje en volumen de fibra de vidrio, tiene una mejor resistencia a la fatiga por flexión rotativa, así también la tendencia de las gráficas se mantiene y son exponencialmente decrecientes.

Capítulo V

Análisis de costos

El análisis de costos permite identificar el monto autofinanciado necesario para sustentar los gastos de los ensayos de fatiga en material compuesto a base de fibra de vidrio y resina de poliéster, así como también, el reacondicionamiento de la máquina R.R. Moore con el objetivo de desarrollar los ensayos de fatiga a flexión rotativa sin inconvenientes en el Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE".

Análisis de costos

Los gastos que se van a presentar representan el costo de materia prima, mano de obra y otros valores que intervienen en el desarrollo del plan de tesis.

Tabla 32

Gastos de materia prima

N°	Descripción	Costo Unitario	Cant	Dimensión	Costo Total
1	Resina de Poliéster	\$6,75	8	kilos	\$54,00
2	Eje Acero 1018	\$2,75	1	12,7 mm x 500 mm	\$2,75
3	Eje Acero 1018	\$4,45	1	19,5 mm x 500 mm	\$4,45
4	Eje Acero Inoxidable 304	\$8,90	2	12,7 mm x 1000 mm	\$17,80
5	Plástico Transparente	\$2,65	11	1,50 m x 2,0 m	\$29,15
6	Cinta Verde (Maskin)	\$3,20	5	1x40 yds-24mm	\$16,00
7	Calibrador Digital	\$28,76	1	N/A	\$28,76
8	Pistola de Calor	\$30,06	1	N/A	\$30,06
9	Láminas de Acetato	\$0,25	50	A3	\$12,50
10	Ángulo L	\$18,18	1	40 mm x 4 mm	\$18,18

N°	Descripción	Costo Unitario	Cant	Dimensión	Costo Total
11	Rodamientos	\$5,29	4	1 1/2"	\$21,16
12	Perno Hexagonal	\$0,50	1	5/8"	\$0,50
13	Cable Acero	\$1,10	2	1/8" - 2 metros	\$2,20
14	Grillete para cable	\$0,75	2	1/8"	\$1,50
15	Taco de madera I	\$3,00	1	54x150x400 mm	\$3,00
16	Taco de madera II	\$3,00	1	70x150x400 mm	\$3,00
17	Filtros Aspiradora	\$12,50	2	N/A	\$25,00
18	Empaque Acople Lovejoy	\$47,40	1	N/A	\$47,40
19	Rotary Encoder	\$40,00	1	N/A	\$40,00
20	Sensor de proximidad	\$35,00	1	N/A	\$35,00
21	Pintura Base EB 7651	\$6,50	1	litro	\$6,50
22	Pintura Negra Aerosol	\$2,35	1	N/A	\$2,35
23	Graseros	\$0,40	3	1/4"	\$1,20
TOTAL					\$402,46

Es necesario mencionar que adicional a los gastos de materia prima, se realizaron otros tipos de gastos referentes a:

- Transporte
- Mano de obra
- Otros

Tabla 33*Otros gastos*

Ord	Descripción	Costo Unitario	Cantidad	Costo Total
1	Gasolina Extra	\$2,40	80	\$192,00
2	Pasajes	\$1,00	100	\$100,00
3	Impresiones	\$2,00	5	\$10,00
4	Mano de Obra	\$20,00	1	\$20,00
5	Manufactura de moldes	\$13,00	1	\$13,00
6	Manufactura de topes	\$3,00	1	\$3,00
			TOTAL	\$338,00

El costo total del proyecto está representado por la suma de los costos de materia prima como de otros valores, dando como resultado un costo total de:

Tabla 34*Costo total del proyecto*

Costo Total	
Materia Prima	\$402,46
Otros	\$338,00
Total	740,46

Capítulo VI

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- El método de fabricación utilizado en las probetas de material compuesto a base de fibra de vidrio y resina de poliéster es el conocido como Layup.
- El módulo plástico de la estructura metálica dio un valor de 16.000 [mm³], siendo un parámetro que nos permita colocar hasta una carga máxima de 144,3 [kgf/mm] en el portapesas, sin que sufra deformaciones la estructura.
- El factor de corrección para ensayos de fatiga a flexión rotativa en la máquina R.R. Moore de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE es de 0,3062, factor que determinará la carga interactuante en la probeta, esto debido al efecto resorte que provoca el acople mecánico entre el motor y el eje de la máquina.
- En base al ensayo de tracción realizado en las probetas de material compuesto, se evidencia que las probetas con menor porcentaje de fibra de vidrio (30%) soportaron una carga mayor respecto a las probetas con mayor porcentaje de fibra de vidrio (50%), es decir, el promedio de la carga en el ensayo a tracción es de 350,93 [MPa] y 213,91 [MPa] respectivamente.
- Por la ecuación de ley de mezclas para materiales compuestos, tomando de referencia el porcentaje de fibra de vidrio (30%) y resina de poliéster (70%), el módulo de elasticidad teórico dio un valor de 25600 [MPa], mientras que por medio de la pendiente de la función obtenida del ensayo a través del strain gages, el módulo de elasticidad práctico es igual a 36763 [MPa].
- El método utilizado para la determinación de curvas de vida del material compuesto es de tipo flexión rotativa sobre dos apoyos cargados (donde la carga es aplicada en los

dos apoyos de la probeta) con un acople mecánico adicional, el cuál actúa como resorte en el eje, al aplicar las cargas en el portapesas.

- A menor porcentaje de fibra de vidrio en el material compuesto, tiende a una mayor resistencia a la fatiga por flexión rotativa, es decir, un porcentaje de 30% de fibra de vidrio resiste mayores esfuerzos respecto a la composición del 40% y 50% de fibra de vidrio, sin embargo, la tendencia de las gráficas se mantiene y son exponencialmente decrecientes; se asume que el comportamiento predominante en este material y expuesto al ensayo es la buena resistencia de la resina a esfuerzos de compresión otorgándole buenas propiedades mecánicas al material compuesto.

Recomendaciones

- Realizar repetitivas mediciones de los diámetros externos e internos de la probeta para proporcionar una medida de la tendencia general, así obtendremos un valor exacto del esfuerzo a flexión.
- De acuerdo con la calibración realizada a la máquina de ensayos R.R. Moore, para próximos rediseños se deben instalar acoples tipo cardan entre el eje motriz del motor y el de la máquina, así se garantizará que la carga aplicada sea la que interactúa de forma pura sobre la probeta y a su vez su momento sea constante en la longitud de trabajo, eliminando pérdidas de carga aplicadas a la probeta.
- Lijar las imperfecciones que se incrustan en el cambio de geometría de la probeta (refuerzo – área de trabajo), para así evitar concentradores de esfuerzos que generarían iniciación de grietas en el estado estático, esto se produce al ajustar los refuerzos a los mandriles de la máquina.
- El tiempo de secado de la probeta en el horno al vacío no debe sobrepasar los 60 minutos ya que por hojas de trabajo del CICTE ese es el tiempo establecido para probetas que conlleven resina de poliéster.

- Al realizar el ajuste de los diámetros de refuerzo de la probeta al mandril de la máquina, verificar que el tope de acero este posicionado en la longitud correcta del diámetro interno de la probeta, así evitar estresar al material antes de la iniciación de los ciclos de la máquina.
- Realizar estudios experimentales sobre las aplicaciones emergentes para los materiales compuestos, tales como la fabricación aditiva (impresión 3D), estos estudios experimentales son fundamentales para avanzar en la comprensión de la combinación de las fibras de refuerzo con las resinas termoestables, así como para mejorar el diseño y la aplicación de estos materiales compuestos en la industria.

Bibliografía

- AISC 360-16. (2016). *Specification for Structural Steel Buildings*.
- ASTM. (2015). *Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue Data: Vol. 03.01*.
- Bazli, M., Ashrafi, H., Jafari, A., Zhao, X.-L., Singh Raman, R. K., & Bai, Y. (2019). *Effect of Fibers Configuration and Thickness on Tensile Behavior of GFRP Laminates Exposed to Harsh Environment*. 11, 4.
- Boeing. (2023, June 3). *BOEING 777*.
- Borja, C., & Tapia, A. (2017). *Automatización de la máquina de ensayos de fatiga para el laboratorio de mecánica de materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE*.
- Carrillo Ramírez, D. A. (2014). *ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO A FATIGA MECÁNICA POR FLEXIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS CON FIBRA DE CABUYA (30%) Y MATRIZ POLIÉSTER (70%) PARA DETERMINAR EL DIAGRAMA S-N*.
- Catagneto, L. (2020). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA PARA ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA FATIGA MECÁNICA POR FLEXIÓN EN PROBETAS DE POLÍMEROS IMPRESOS EN 3D*. ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO.
- Corbella, B., & Maguyo, J. (2004). *Modelo de regresión general de las curvas S-N para la estimación de la vida a fatiga de un composite*. Asociación española de materiales compuestos .
- Córdova, J., & Loayza, H. (2010). *Diseño y construcción de un banco para realizar ensayos de fatiga por flexión para los diferentes aceros*. Universidad del Azuay.
- Daniel, I. M., & Ishai, Ori. (2006). *Engineering mechanics of composite materials*. Oxford University Press.
- Dipac. (2021). *PERFILES ESTRUCTURALES ÁNGULOS "L" DOBLADO Especificaciones Generales*.

- Gibson, R. (2010). A review of recent research on mechanics of multifunctional composite materials and structures. *ELSEVIER*, 92(12), 2793–2810.
- Girón Martínez, G. A. (2014, March 17). *Composite o Materiales Compuestos*.
- Héctor, M., & Salazar, G. V. (2011). *OBTENCIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS HÍBRIDOS DE MATRIZ POLIÉSTER REFORZADOS CON FIBRA DE VIDRIO Y ABACÁ MEDIANTE ESTRATIFICACIÓN*.
- Hull, D. (1987). *An introduction to composite materials* (R. A. Gerra & A. A. Calama, Eds.).
- Jácome, B., Martínez, M., Mora, L., Salazar, G., & Simbaña, M. (2022). *Simulación y pruebas estáticas - cíclicas de parches de material compuesto funcionando en una componente de una aeronave*.
- Kong, L. B., Li, Z. W., Liu, L., Huang, R., Abshinova, M., Yang, Z. H., Tang, C. B., Tan, P. K., Deng, C. R., & Matitsine, S. (2013). Recent progress in some composite materials and structures for specific electromagnetic applications. *International Materials Reviews*, 58(4), 203–259.
- López, A. (2019). *EXPOSICION SOLDADURA IV-2019*.
- Mariano. (2011, November 1). *Moldeo manual de materiales compuestos (hand lay-up)*.
<https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/11/moldeo-manual-de-materiales-compuestos.html>
- Martínez, R., Estrada, I., & Garay, C. G. (2021). *Módulos El Mundo de los Materiales MWM*.
<http://mwm.cimav.edu.mx/wp-content/uploads/2021/01/PresentacionCompositos.pdf>
- Mayugo M. (2003). *Estudio constitutivo de materiales compuestos laminados sometidos a cargas cíclicas*. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Miravete, A., Larrodé, E., Castejón, L., Clemente, R., Jiménez, M. Á., Lizaranzu, M., Cuartero, J., Revuelta, D., Millán, C., Gómez, V., Calvo, J., Tolosana, N., & Peralta, J. L. (2007). *MATERIALES COMPUESTOS I* (Vol. 1). Reverte.

- Olivares J. (2014). *Estudio experimental de impacto y su influencia sobre el daño en materiales compuestos*. Universidad de Concepción .
- Pertuz, A., & González, O. (2017, July 12). Estudio de la fatiga en láminas de tubería compuesta de matriz epóxica con fibra de vidrio para cargas de tracción. - Archive ouverte HAL. *Hal Science Ouverte*, 1–28.
- Pertuz Comas, A. D., Monroy Gómez, D. A., Monsalve Díaz, S., León Becerra, J. S., & González Estrada, O. A. (2018). *Study of fatigue in sheets of composite pipe of epoxy matrix with glass fiber for tensile loads*. Universidad Industrial de Santander.
- Rodríguez, C. (2013). *PATRONES Y MECANISMOS DE FRACTURA EN LOS MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORZADOS CON FIBRAS*. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN.
- Sangoquiza, J. et al. (n.d.). *Repositorio de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE: Simulación y pruebas estáticas - cíclicas de parches de material compuesto funcionando en una componente de una aeronave*. Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE.”
- Tobar, M., & Carrillo, J. (2010). “*REDISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA PARA ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA FATIGA POR FLEXIÓN CON VIGA ROTATORIA VERSIÓN II.*” Escuela Politécnica Nacional .
- Velásquez Salazar, F. J. (2018). *CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL DURALÓN*.
- Yuridia. (n.d.). *PLAREMESA. TIPOS DE FIBRA DE VIDRIO*. Retrieved June 6, 2023, from <https://www.plaremesa.net/tipos-de-fibra-de-vidrio/>

Apéndices