

Estudio a la fatiga de material compuesto de matriz polimérica reforzado con fibras de kevlar bajo ensayos por flexión alternativa

Oscar Javier Meneses Duran, Nixon Yesid Niño Alvarez

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Mecánico

Director

Alberto David Pertuz Comas

Ingeniero Mecánico, PhD

Codirector

Jorge Guillermo Díaz Rodríguez

Ingeniero Mecánico, PhD

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería Mecánica
Bucaramanga

2020

Dedicatoria

A Dios por todas las Bendiciones recibidas y por ser siempre mi guía y compañero.
A mis padres Martha Duran y Javier Meneses quienes siempre me brindaron su apoyo incondicional para
hacer de este sueño que al principio parecía imposible una realidad.

A mis hermanos Brahian y Erick Sebastián quienes siempre me inculcaron que las metas que nos
proponemos siempre pueden ser alcanzadas.

A mis hijos Dylan Felipe y Natascha Catalina por ser las personitas que me motivan a esforzarme día a día
por alcanzar mis propósitos sin importar las dificultades que se me presenten.

A mi compañero de proyecto Nixon Niño por su amistad y apoyo

Oscar Javier Meneses Duran

A Dios por darme salud y coraje para superar los desafíos personales y profesionales.
A mis padres y hermano por su apoyo constante e incondicional

Nixon Yesid Niño Alvarez

Agradecimientos

A nuestro director Alberto Pertuz por su apoyo y orientación durante el desarrollo de este proyecto.

A nuestro codirector Jorge Guillermo Diaz por sus conocimientos, ayuda y colaboración que fueron esenciales para la culminación de este proyecto.

Al profesor Juan Sebastián León por sus conocimientos brindados que sirvieron de base para la elaboración de este trabajo.

Al Tecnoparque Nodo Bucaramanga por facilitarnos los materiales y equipos necesarios para la obtención de las probetas.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander por el préstamo de la máquina MTS Bionix[®] Servohydraulic 370.02.

Al compañero Caleb Ariza por su ayuda suministrada durante el desarrollo de los ensayos.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Objetivos	15
1.1 Objetivo General	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Metodología	16
2.1 Materiales.....	16
2.2 Ensayos mecánicos	22
2.2.1 Ensayo de flexión a 4 puntos	23
2.2.2 Ensayo de fatiga a flexión alternativa.....	24
2.3 Modelo numérico en Ansys	25
2.3.1 Geometría.....	26
2.3.2 Propiedades mecánicas de los materiales	27
2.3.3 Condiciones de contorno.....	29
3. Resultados	32
3.1 Resultados ensayo de flexión a 4 puntos	32
3.2 Resultados ensayo de fatiga a flexión alternativa.....	35
3.3 Resultados modelo numérico en Ansys	38
3.3.1 Simulación ensayo de flexión a 4 puntos.....	38
3.3.2 Simulación ensayo de fatiga	41
4. Conclusiones	44

Referencias Bibliográficas 46

Apéndices..... 48

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Parámetros de impresión del material de la matriz.....	18
Tabla 2. Parámetros de impresión del material de refuerzo.....	19
Tabla 3. Propiedades de los materiales empleadas para la simulación estática.....	28
Tabla 4. Propiedades mecánicas empleadas para la simulación dinámica	28
Tabla 5. Resultados ensayo de flexión a 4 puntos probeta de Onyx + Kevlar	35
Tabla 6. Resultados ensayos de fatiga a flexión alternativa	36
Tabla 7. Resultados numéricos simulación ensayo de flexión a 4 puntos	40
Tabla 8. Comparación de los resultados experimentales y numéricos	43

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Impresora 3D Mark Two de MarkForged®	16
Figura 2. Filamentos de onyx® y kevlar utilizados en el material compuesto	17
Figura 3. Dimensiones de la probeta según la ASTM D6272-17	17
Figura 4. Patrón triangular configurado para el relleno	18
Figura 5. Configuración utilizada para la fibra	19
Figura 6. Probeta de onyx® reforzada con kevlar.....	20
Figura 7. Modelo CAD de la probeta compuesta (a) Disposición de las capas (b) Dimensiones externas de la probeta (c) Sección transversal de la probeta.	21
Figura 8. Máquina y accesorio empleado para el ensayo fatiga	22
Figura 9. Montaje ensayo de flexión a 4 puntos según la ASTM D6272-17.....	23
Figura 10. Probetas empleadas para el ensayo de flexión a 4 puntos	24
Figura 11. Montaje ensayo de fatiga a flexión alternativa según la ASTM D7774-17	25
Figura 12. Modelo detallado de la probeta generado en ACP	26
Figura 13. Modelo simplificado de la probeta empleado para la simulación dinámica	27
Figura 14. Condiciones de contorno para la simulación estática.....	29
Figura 15. Malla empleada para la simulación estática	30
Figura 16. Condiciones de contorno para la simulación dinámica	31
Figura 17. Malla empleada para la simulación dinámica	31
Figura 18. Gráfica de Esfuerzo vs Deformación unitaria probeta de Onyx + Kevlar	33
Figura 19. Gráfica de Esfuerzo vs Deformación unitaria en la región elástica lineal	34

Figura 20. Imagen de las probetas ensayadas flexión alternativa.....	35
Figura 21. Resultados ensayo de fatiga a +/- 12 mm (a) Fuerza vs número de ciclos (b) Fuerza vs desplazamiento.....	36
Figura 22. Gráfica S-N del material compuesto	38
Figura 23. Resultados de deflexión para un valor de carga de 20 Newtons	39
Figura 24. Convergencia de la solución para los valores de deflexión en Y	39
Figura 25. Comparación del modelo experimental y el modelo numérico.....	40
Figura 26. Vida a fatiga y esfuerzo obtenidos para los diferentes porcentajes de carga (a) 92.3 % (b) 88.5 % (c) 86.2%	41
Figura 27. Comparación del ensayo experimental y el modelo numérico.....	43

Lista de Apéndices

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS

Apéndice A. Planos de construcción del accesorio empleado en los ensayos

Apéndice B. Modelado CAD de la probeta usando ACP (Ansys Composite Prepost)

Apéndice C. Estimación propiedades materiales para el modelo numérico

Apéndice D. Estimación constantes elásticas efectivas probeta de onyx + kevlar

Apéndice E. Dedución ecuación para el cálculo de la deflexión máxima

Apéndice F. Gráficas ensayos de fatiga

Apéndice G. Ficha técnica materiales Markforged

Resumen

Título: Estudio a la fatiga de material compuesto de matriz polimérica reforzado con fibras de kevlar bajo ensayos por flexión alternativa *

Autor: Oscar Javier Meneses Duran, Nixon Yesid Niño Alvarez **

Palabras Clave: fatiga, ensayo de flexión, materiales compuestos, manufactura aditiva, modelado por deposición fundida

Descripción:

En este trabajo se estudió el comportamiento mecánico a fatiga de un material compuesto bajo ensayos por flexión alternativa. El material fue obtenido por manufactura aditiva (AM) mediante modelado por deposición fundida (FDM) el cual consiste de una matriz polimérica de onyx[®] con refuerzo de fibra continua de kevlar. El onyx[®] a su vez es una matriz de nylon reforzada con fibra corta de carbono. Para este material compuesto se evaluaron las propiedades mecánicas como módulo de elasticidad a flexión y resistencia a la flexión y se obtuvo la curva de esfuerzo contra número de ciclos (S-N). También se realizó un modelo numérico del material compuesto en el software de elementos finitos Ansys y se compararon los resultados numéricos y experimentales.

Para la caracterización de las propiedades mecánicas y el estudio de fatiga se realizaron ensayos de flexión bajo carga estática y dinámica. Las normas empleadas fueron la ASTM D6272-17 (Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four Point Bending) para los ensayos estáticos y la ASTM D7774-17 (Standard Test Method for Flexural Fatigue Properties of Plastics) para los ensayos dinámicos o de fatiga. Los resultados mostraron que el material compuesto presenta un módulo de elasticidad a flexión (E) de 4372.3 MPa, y un esfuerzo último a flexión (σ) de 109.9 MPa. La comparación entre el modelo numérico y el ensayo real evidenció que los resultados obtenidos en el software ANSYS se acercan bastante a los valores experimentales, siendo este una alternativa útil para el estudio de materiales compuestos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Alberto David Pertuz Comas, Doctor en Ingeniería Mecánica. Codirector: Jorge Guillermo Díaz Rodríguez, Doctor en Ingeniería Mecánica.

Abstract

Title: Fatigue study of kevlar fiber reinforced polymer matrix composite material under alternative bending tests *

Authors: Oscar Javier Meneses Duran, Nixon Yesid Niño Alvarez **

Keywords: fatigue, bending test, composite materials, additive manufacturing, fused deposition modeling

Description:

In this work, the mechanical behavior of fatigue of composite material under alternative bending tests was studied. The material was obtained by additive manufacturing (AM) by fused deposition modeling (FDM) which consists of an onyx® polymeric matrix with continuous kevlar fiber reinforcement. The onyx® in turn is a nylon matrix reinforced with short carbon fiber. For this composite material, the mechanical properties were evaluated as modulus of elasticity to flexion and resistance to flexion, and the stress curve against the number of cycles (S-N) was obtained. It was also carried out a numerical model of the composite material in the Ansys finite element software and the numerical and experimental results were compared.

For the characterization of the mechanical properties and the study of fatigue, bending tests under static and dynamic load was carried out. The standards used were ASTM D6272-17 (Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four-Point Bending) for static tests and ASTM D7774-17 (Standard Test Method for Flexural Fatigue Properties of Plastics) for dynamic or fatigue tests. The results showed that the composite material has a flexural modulus of elasticity (E) of 4372.3 MPa, and ultimate flexural strength (σ_u) of 109.9 MPa. The comparison between the numerical model and the real test showed that the results obtained in the ANSYS software are quite close to the experimental values, being this a useful alternative for the study of composite materials.

* Degree Work

** Faculty of Physical-mechanical Engineering. Mechanical Engineering School. Director: Alberto David Pertuz Comas, PhD in mechanical engineering. Codirector: Jorge Guillermo Díaz Rodríguez, PhD in mechanical engineering.

Introducción

En la actualidad los materiales compuestos tienen un papel importante en el ámbito de la Ingeniería debido a su gran aplicabilidad en sectores como la construcción, aeroespacial, automotriz entre otras. Se forman a partir de la unión de dos o más materiales diferentes para conseguir una combinación de propiedades que difícilmente pueden ser encontradas con un solo material. El interés tecnológico de estos materiales radica en su elevada resistencia específica y/o módulo específico (Besednjak, 2005). La mayoría de los materiales compuestos que se emplean en Ingeniería se constituyen a partir de dos fases, una fase continua y mayoritaria conocida como matriz y una fase discontinua o dispersa conocida como refuerzo. El material de refuerzo y el de la matriz pueden ser metales, cerámicos, o polímeros. Lo característico es que el material de refuerzo es resistente y frágil, y el de la matriz es dúctil y tenaz. Las matrices más comunes utilizadas en materiales compuestos son las matrices poliméricas. Estas matrices presentan excelentes propiedades a temperatura ambiente, son fáciles de conformar y tienen costos relativamente bajos (Barbero, 2017). Para estas matrices el material de refuerzo es algún tipo de fibra. Las fibras más comunes son las de carbono, vidrio y kevlar. Las aplicaciones más frecuentes de estos compuestos se encuentran en materiales estructurales en los que son importantes propiedades como la rigidez, la resistencia y la baja densidad.

Para la manufactura de materiales compuestos podemos encontrar diferentes técnicas. En los últimos años se ha desarrollado una tendencia a sustituir los métodos de manufactura convencionales por otras tecnologías como la manufactura aditiva. En el 2014 la compañía Markforged desarrolló una tecnología de modelado por deposición fundida que permite la fabricación de materiales compuestos mediante el uso de fibras continuas. Mediante esta

tecnología es posible obtener compuestos de alto rendimiento usando nylon y onyx[®] como material base y fibras de vidrio, carbono y kevlar como material de refuerzo. El onyx[®] tiene la particularidad de ser un material rígido y fuerte que puede ser reforzado con cualquier fibra. El onyx[®] consiste de una mezcla de nylon embebido con fibra corta de carbono. Este material fue desarrollado por la compañía MarkForged[®] como una alternativa a los filamentos tradicionales. Posee una densidad de 1200 kg/m³, un módulo de elasticidad de 1400 MPa y una resistencia a la flexión de 81 MPa. Por su parte el kevlar posee una excelente durabilidad. Posee una densidad de 1200 kg/m³, un módulo de elasticidad de 27 GPa y una resistencia a la tensión de 610 MPa. También presenta una resistencia a la flexión de 190 MPa (Markforged Inc, 2018).

Además de los modelos experimentales una alternativa para analizar los materiales compuestos son los modelos numéricos. Con estos modelos es posible predecir el comportamiento mecánico y la respuesta del material frente a determinadas cargas sin necesidad de realizar ensayos o pruebas de laboratorio. El análisis de elementos finitos FEA se ha convertido en una poderosa herramienta para diversos campos de estudio en la Ingeniería como por ejemplo para el análisis y desempeño estructural de piezas o componentes (Chen & Liu, 2014). Durante los últimos años algunos autores han evaluado la respuesta mecánica de materiales compuestos mediante modelos numéricos (Barros et al., 2019) (Chaudhary et al., 2018). Recientemente los estudios también se han centrado en piezas compuestas obtenidas por fabricación aditiva. Para compuestos de matriz de onyx[®] por ejemplo se han llevado a cabo modelos numéricos a flexión y a tensión (Ghebretinsae et al., 2019) (Žmindák et al., 2020).

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar el comportamiento mecánico a fatiga de un material compuesto bajo ensayos por flexión alternativa ($R=-1$). Para el material se buscan evaluar las propiedades mecánicas como módulo de elasticidad y resistencia a la flexión y se busca

determinar la curva de esfuerzo contra números de ciclos (S-N). El material compuesto es obtenido por manufactura aditiva mediante modelado por deposición fundida FDM a partir de una matriz polimérica de onyx[®] y un refuerzo de fibra continua de kevlar. A partir de este trabajo también se busca comprobar la utilidad de las herramientas CAE en el estudio de los materiales compuestos. Para ello es llevada a cabo una simulación en el programa de elementos finitos Ansys a fin de establecer una comparación entre los resultados numéricos y los resultados experimentales.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Analizar el comportamiento mecánico a la fatiga por flexión alternativa de un material compuesto de matriz polimérica de onyx[®] y refuerzo de fibras de kevlar obtenido mediante modelado por deposición fundida.

1.2 Objetivos Específicos

Determinar las propiedades mecánicas (módulo de elasticidad, resistencia a la flexión) para el material compuesto (matriz onyx[®] & refuerzo kevlar) de acuerdo a la norma ASTM D6272-17 (Standard Test Method For Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four Point Bending).

Obtener la curva experimental de esfuerzo contra número de ciclos (S-N) para el material compuesto (matriz onyx[®] & refuerzo kevlar) mediante ensayos por flexión alternativa, de acuerdo a la norma ASTM D7774-17 (Standard Test Method For Flexural Fatigue Properties of Plastics).

Realizar un estudio fractográfico en el material a través de microscopía electrónica de barrido SEM.

Simular el comportamiento mecánico del material compuesto usando el software Ansys[®] y validar sus resultados a partir de los ensayos experimentales.

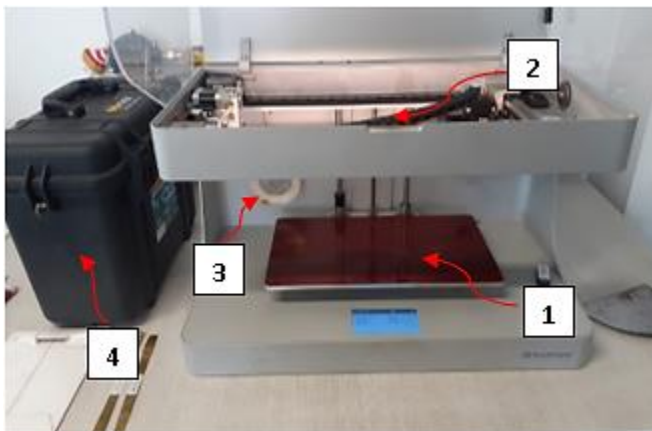
2. Metodología

2.1 Materiales

El material compuesto analizado en este proyecto se obtuvo por manufactura aditiva (AM) mediante modelado por deposición fundida (FDM). El proceso de fabricación se hizo a través de la impresora 3D Mark Two de MarkForged®. Se trata de un tipo especial de impresora que permite reforzar polímeros mediante la adición de fibras continuas. Esta adición se logra por medio de dos extrusores, uno en el cual se añade el polímero base o matriz y otro en el que se adiciona el material de refuerzo. La impresora utilizada se muestra en la Figura 1.

Figura 1

Impresora 3D Mark Two de MarkForged®



1. Cama de impresión
2. Cabezal extrusor doble
3. Carrete material de refuerzo
4. Contenedor carrete matriz

Para la fabricación del material compuesto se emplearon filamentos de kevlar y onyx®. El kevlar se utilizó como material de refuerzo y el onyx® se utilizó como material para la matriz, Los filamentos utilizados en el material compuesto se observan en la Figura 2. El onyx® es un polímero

que consiste en una mezcla de nylon embebido con fibra corta de carbono, este material fue desarrollado por la compañía MarkForged® como una alternativa a los filamentos tradicionales.

Figura 2

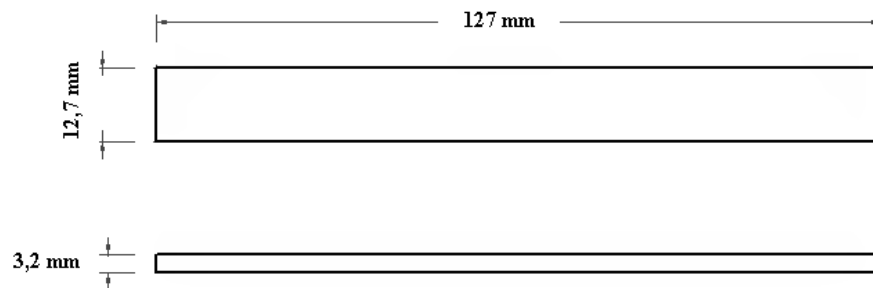
Filamentos de onyx® y kevlar utilizados en el material compuesto



El diseño de las probetas se realizó de acuerdo a la norma ASTM D6272-17 (Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four Point Bending). Se empleó una probeta plana de geometría rectangular con un espesor de 3,2 mm, un ancho de 12,7 mm y una longitud de 127 mm. La probeta con sus dimensiones se muestra en la Figura 3.

Figura 3

Dimensiones de la probeta según la ASTM D6272-17



Para llevar a cabo la impresión se realizó un modelo CAD de la muestra. Este modelo se guardó como tipo de archivo Stereolithography (STL) y se exportó al programa EIGER que maneja la impresora 3D. Una vez exportado en la interfaz del programa y en el menú de opciones se seleccionó el material de la matriz y el material del refuerzo y se configuraron los parámetros de impresión. Los parámetros utilizados se resumen en la Tabla 1 y Tabla 2. Para la matriz los parámetros tenidos en cuenta fueron la altura de capa, el tipo de relleno o infill, la densidad de llenado del infill, el número de capas superiores e inferiores y el número de paredes. Se configuró un patrón de relleno triangular con una densidad del 28%, se seleccionaron 2 paredes y 4 capas superiores e inferiores. El patrón de impresión utilizado para el relleno se muestra en la Figura 4.

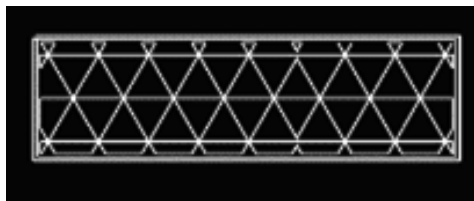
Tabla 1

Parámetros de impresión del material de la matriz

Matriz onyx®	
Altura capa	0,1 mm
Tipo de infill	Triangular
Densidad de llenado del infill	28 %
Número de capas superiores	4
Número de capas inferiores	4
Número de paredes	2

Figura 4

Patrón triangular configurado para el relleno



Para el refuerzo de kevlar los parámetros estaban definidos por la altura de capa, el número de capas de kevlar, la disposición de la fibra y el ángulo de la fibra. Se seleccionaron 6 capas de kevlar, se seleccionó una configuración isotrópica y un ángulo de las fibras de 0° (Figura 5).

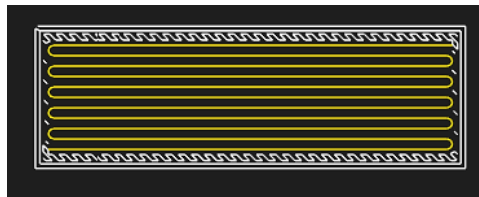
Tabla 2

Parámetros de impresión del material de refuerzo

Refuerzo fibra de kevlar	
Altura capa	0,1 mm
Número de capas de kevlar	6
Disposición fibra de kevlar	Isotrópica
Ángulo fibra de kevlar	0°

Figura 5

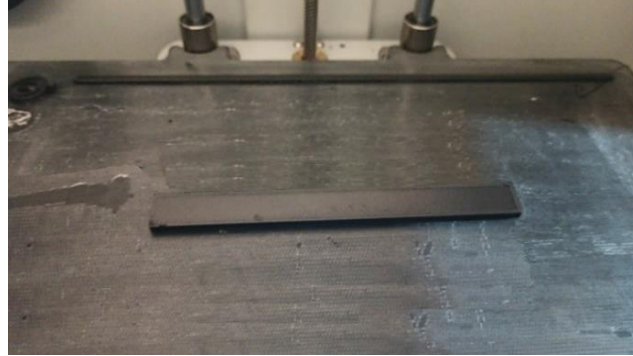
Configuración utilizada para la fibra



Para el proceso de obtención de la probeta compuesta la impresora cuenta con un cabezal extrusor doble que se alterna durante la construcción de la pieza. Uno deposita el material de la matriz y otro agrega el material de refuerzo. La etapa de fabricación se basa en un proceso de manufactura aditiva. Durante el proceso el filamento es extruido y calentado por encima del punto de fusión, el material fundido sale por una boquilla donde se da la deposición por capas hasta conformar la pieza impresa. La probeta obtenida mediante este proceso se muestra en la Figura 6.

Figura 6

Probeta de onyx[®] reforzada con kevlar

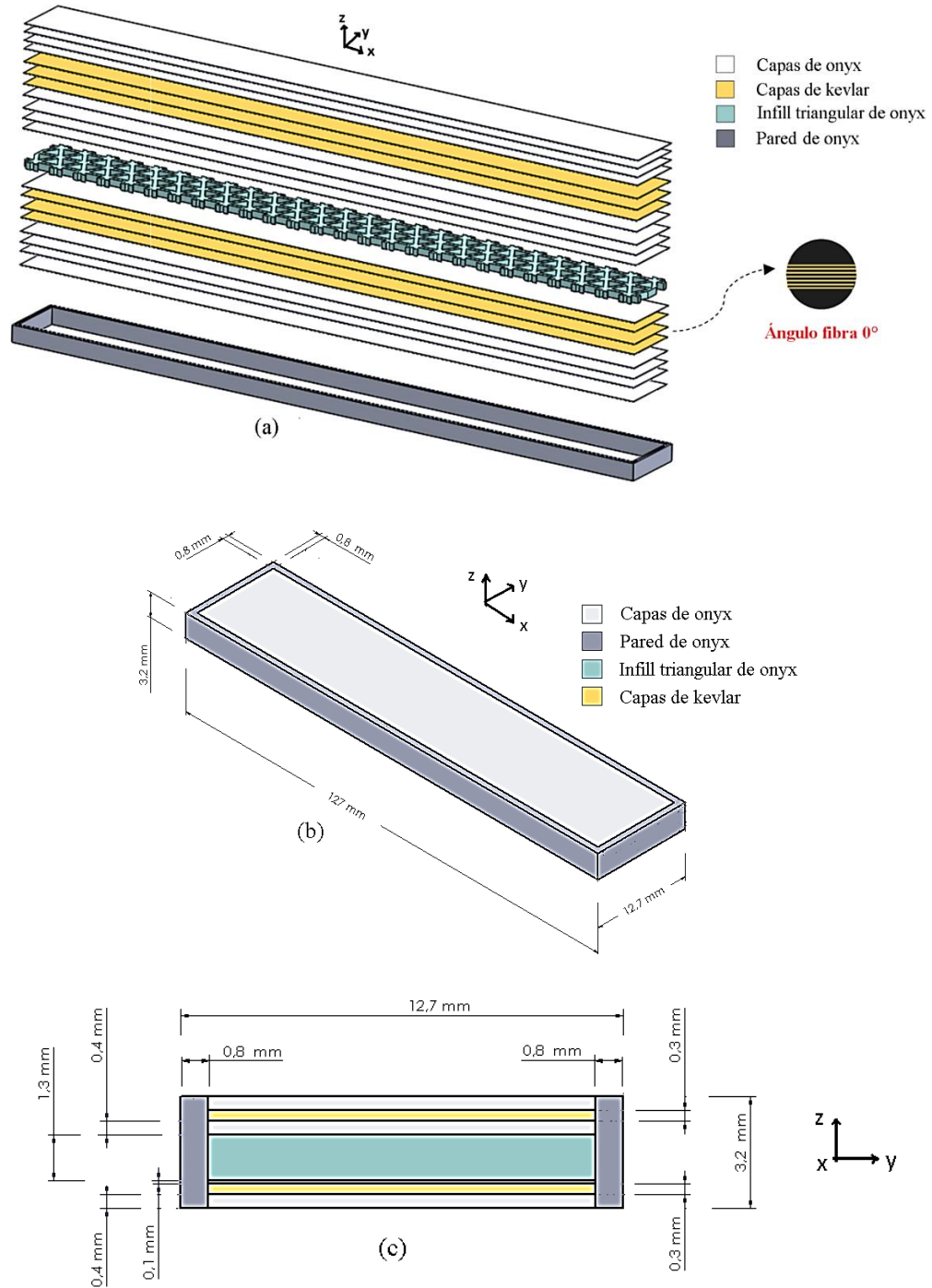


La probeta se constituía por 4 regiones de material (capas de onyx[®], capas de kevlar, pared de onyx[®], honeycomb triangular de onyx[®]). La probeta internamente estaba compuesta por 32 capas totales de las cuales 6 eran de kevlar (N_{kevlar}), 13 eran de onyx[®] (N_{onyx}) y 13 de un honeycomb triangular de onyx[®] (N_{infill}). La deposición de la fibra de kevlar en las capas se hizo a un ángulo de 0° respecto al eje longitudinal (eje x) (Figura 7a). Las dimensiones externas de la probeta eran las siguientes: 127 mm de longitud, 12,7 mm de ancho y 3,2 mm de espesor (Figura 7b). La altura de cada capa era de 0,1 mm (t_{capa}). La probeta también estaba constituida de 2 paredes de onyx[®] cada una de 0,4 mm de ancho (e_{pared}). El ancho total de la pared era de 0,8 mm. En la Figura 7c se observa un corte transversal de la probeta

$N_{\text{kevlar}} = 6$	(Número de capas de kevlar)
$N_{\text{onyx}} = 13$	(Número de capas de onyx)
$N_{\text{infill}} = 13$	(Número de capas de infill)
$t_{\text{capa}} = 0,1 \text{ mm}$	(altura capa)
$e_{\text{pared}} = 0,4 \text{ mm}$	(ancho pared)
$N_{\text{paredes}} = 2$	(Número de paredes)

Figura 7

Modelo CAD de la probeta compuesta (a) Disposición de las capas (b) Dimensiones externas de la probeta (c) Sección transversal de la probeta.



2.2 Ensayos mecánicos

Para estudiar el comportamiento mecánico a fatiga del material compuesto bajo flexión alternativa se realizaron ensayos estáticos y dinámicos. Los ensayos se hicieron siguiendo la norma ASTM D6272-17 para ensayo estático y la ASTM D7774-17 para ensayo de fatiga. Para la realización de las pruebas se empleó la máquina MTS Bionix[®] Servohydraulic 370.02 ubicada en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UIS. Debido a que el laboratorio no contaba con el equipo necesario para realizar ensayos de fatiga a flexión alternativa con $R=-1$, fue necesario la construcción de un accesorio adaptable a esta máquina. En la Figura 8 se muestra la máquina MTS junto con el accesorio construido. Los planos de construcción pueden ser consultados en el Apéndice A.

Figura 8

Máquina y accesorio empleado para los ensayos de fatiga

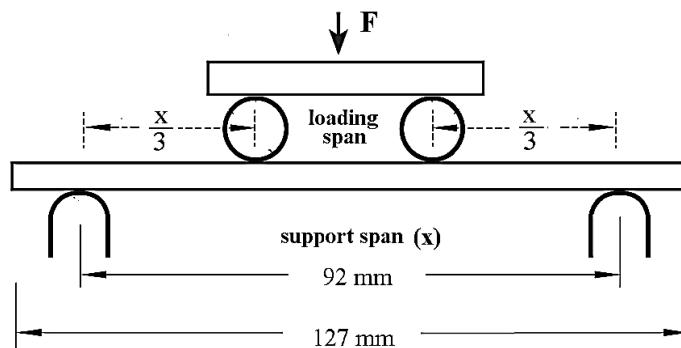


2.2.1 Ensayo de flexión a 4 puntos

El ensayo se hizo de acuerdo a la norma ASTM D6272-17 (ASTM International, 2017) el cual corresponde a un ensayo de flexión a 4 puntos. Para la prueba se tiene una probeta plana de geometría rectangular soportada como una viga simplemente apoyada. La probeta descansa sobre 2 apoyos cilíndricos, y sobre esta se aplica una fuerza mediante 2 puntos de carga. Durante el procedimiento la fuerza aplicada y la deflexión son medidas. Los parámetros tenidos en cuenta para el montaje de la prueba fueron la distancia entre apoyos (support span), y la distancia entre los puntos de aplicación de la carga (loading span). Para los apoyos se configuró una distancia de 92 mm y para los puntos de carga se siguió una relación de 1:3 (loading span: support span). En la Figura 9 se muestra el montaje del ensayo de flexión a 4 puntos y un diagrama esquemático con las distancias utilizadas.

Figura 9

Montaje ensayo de flexión a 4 puntos según la ASTM D6272-17



La prueba se realizó a temperatura ambiente a una velocidad constante de 4,89 mm/min. La velocidad se obtuvo de acuerdo a la Ecuación 2.1 de la norma ASTM D6272-17. En total se ensayaron 3 probetas. En la Figura 10 se muestran las probetas utilizadas para el ensayo.

$$V = \frac{0,185 \cdot Z \cdot x^2}{d} \quad (2.1)$$

Donde:

V = velocidad de desplazamiento de la máquina. [mm/min]

d = espesor de la probeta. [mm]

x = distancia entre apoyos. [mm]

Z = 0,01 [mm/mm/min], tasa de deformación unitaria en la superficie externa.

Figura 10

Probetas empleadas para el ensayo de flexión a 4 puntos

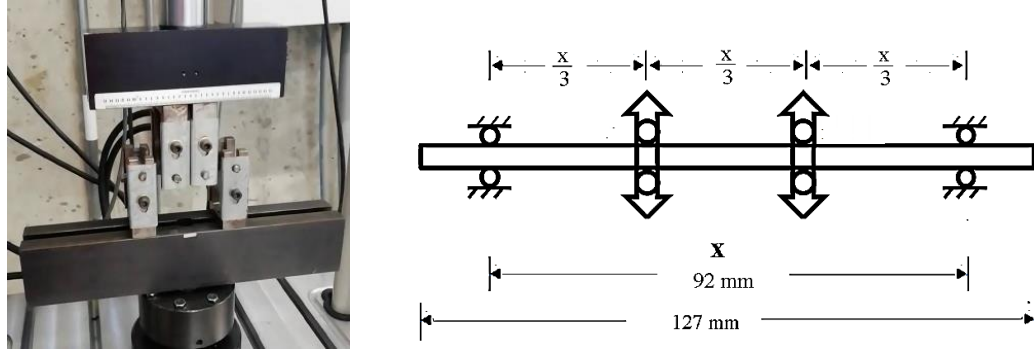


2.2.2 Ensayo de fatiga a flexión alternativa

Los ensayos dinámicos se llevaron a cabo de acuerdo a la norma ASTM D7774-17 (Standard Test Method For Flexural Fatigue Properties of Plastics). Para el ensayo se empleó una probeta plana de geometría rectangular. Durante la prueba la probeta se carga cíclicamente por igual en las direcciones positivas y negativas a un cierto nivel de esfuerzo y frecuencia constante hasta que alcanza la falla (ASTM International, 2017). Para el ensayo de fatiga la distancia entre los apoyos superiores e inferiores fueron establecidas en base a los ensayos estáticos. La distancia entre apoyos inferiores fue de 92 mm. En la Figura 11 se muestra el montaje del ensayo de fatiga a flexión alternativa a 4 puntos y un diagrama esquemático con las distancias utilizadas.

Figura 11

Montaje ensayo de fatiga a flexión alternativa según la ASTM D7774-17



Los ensayos de fatiga se llevaron a cabo a temperatura ambiente bajo condición de carga cíclica alternante ($R = -1$) y a una frecuencia de 5 Hz. Se empleó una carga de tipo senoidal y amplitud constante. Se ensayaron en total 12 probetas, pero solo se obtuvieron resultados para 3 probetas distribuidas en 3 niveles de carga diferentes.

2.3 Modelo numérico en Ansys

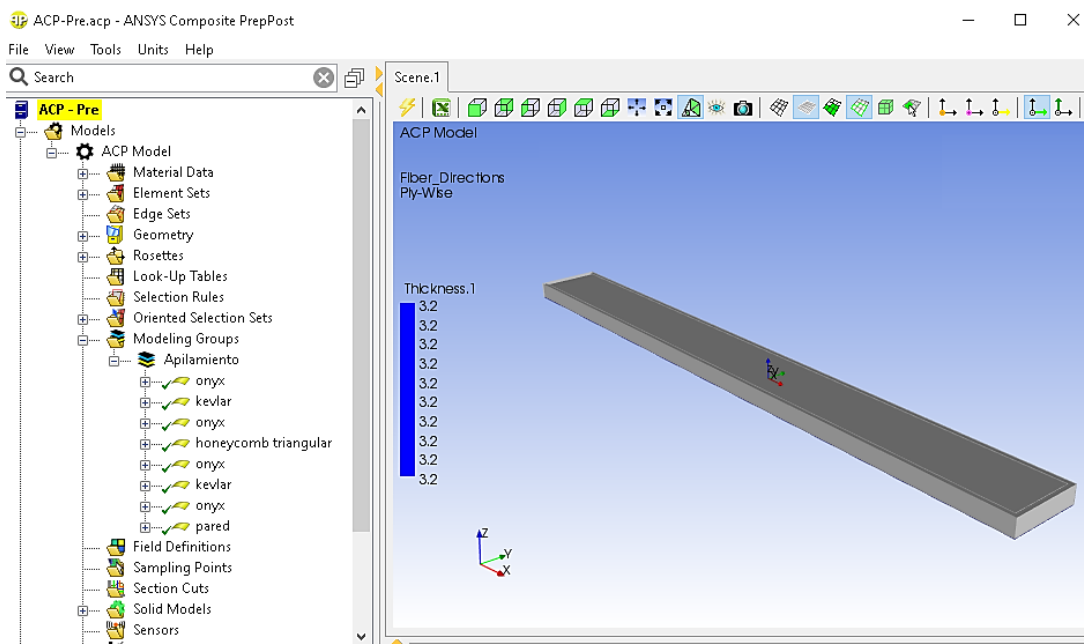
Se llevó a cabo una simulación en el software de elementos finitos Ansys® para comparar los resultados numéricos con los resultados experimentales. Se simuló un ensayo de flexión a 4 puntos y un ensayo de fatiga. El análisis se hizo en base a un problema elástico lineal a través del módulo Static Structural y la herramienta Fatigue Tool del Ansys Workbench. Para el modelo numérico se tuvieron en cuenta varios aspectos como la geometría, las propiedades mecánicas del material, las condiciones de contorno y el mallado.

2.3.1 Geometría

Para el modelo numérico en Ansys se tuvieron en cuenta dos modelos geométricos diferentes, uno para la simulación estática y otro para la simulación dinámica. Para el primero se tomó una geometría detallada de la probeta y se modeló a través del complemento ACP (Ansys Composite Prepost) del ansys workbench (Figura 12). El procedimiento seguido se explica en el Apéndice B.

Figura 12

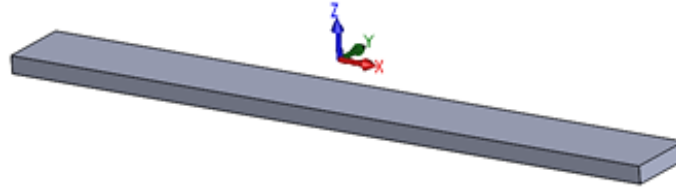
Modelo detallado de la probeta generado en ACP



Para el segundo modelo se hizo una simplificación de la geometría. En este modelo la probeta se consideró como una viga sólida de un único material con propiedades ortotrópicas. Estas propiedades fueron estimadas de forma analítica. Se realizó un modelo CAD en Solidworks (Figura 13) y se exportó al Design Modeler del ansys workbench.

Figura 13

Modelo simplificado de la probeta empleado para la simulación dinámica

**2.3.2 Propiedades mecánicas de los materiales**

Las propiedades mecánicas de los materiales que se emplearon para la simulación estática y dinámica se resumen en la Tabla 3 y Tabla 4. En estas tablas el subíndice 1 indica la dirección longitudinal (eje x), el subíndice 2 la dirección transversal (eje y) y el subíndice 3 hace referencia a la dirección perpendicular al plano 1-2 (eje z). Para la simulación estática las propiedades de los distintos materiales fueron estimadas siguiendo algunos métodos que estaban propuestos en la literatura. En el Apéndice C se explica paso a paso el cálculo de estas propiedades. Para las capas de kevlar la estimación de las propiedades se hizo a través del complemento Ansys Material Designer del Ansys Workbench. Este complemento se basa en un método de homogenización a través de un modelo RVE (Representative Elementary Volume). Estas propiedades luego se verificaron a través de un método analítico. El método analítico se hizo en base a la regla de mezclas y las ecuaciones de Halpin-Tsai (Apéndice C). El honeycomb triangular en la simulación se consideró como un material sólido con propiedades equivalentes. Estas propiedades fueron calculadas en base a las ecuaciones de sólidos celulares de Gibson y Ashby (Gibson & Ashby, 1997). Para las regiones sólidas de onyx[®] (capas & pared) las propiedades mecánicas asignadas al modelo numérico fueron obtenidas tomando como referencia el estudio de Rodríguez (Rodríguez et al., 2000).

Tabla 3*Propiedades de los materiales empleadas para la simulación estática*

Tipo de Material	Módulo de Young			Coeficiente de Poisson			Módulo de Cizalladura		
	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	E ₃ [MPa]	v ₁₂	v ₂₃	v ₁₃	G ₁₂ [MPa]	G ₂₃ [MPa]	G ₁₃ [MPa]
Regiones de Onyx®	1260	957,3	957,3	0,315	0,2393	0,315	201,5	354,5	201,5
Capas de Kevlar	24873	2344,1	2344,1	0,3782	0,5036	0,3782	682,72	559,03	682,72
Honeycomb triangular	132	132	397,5	0,3333	0,1162	0,1162	49,69	147,2	147,2

Para la simulación de fatiga en Ansys la probeta de onyx + kevlar se consideró como una viga sólida con propiedades ortotrópicas. Estas propiedades fueron estimadas de forma analítica a través del método de la rigidez volumétrica promedio (Volume Average Stiffness Method) tomando como referencia el estudio realizado por Melenka (Melenka et al., 2016). En el Apéndice D se explica el cálculo de estas propiedades.

Tabla 4*Propiedades mecánicas empleadas para la simulación dinámica*

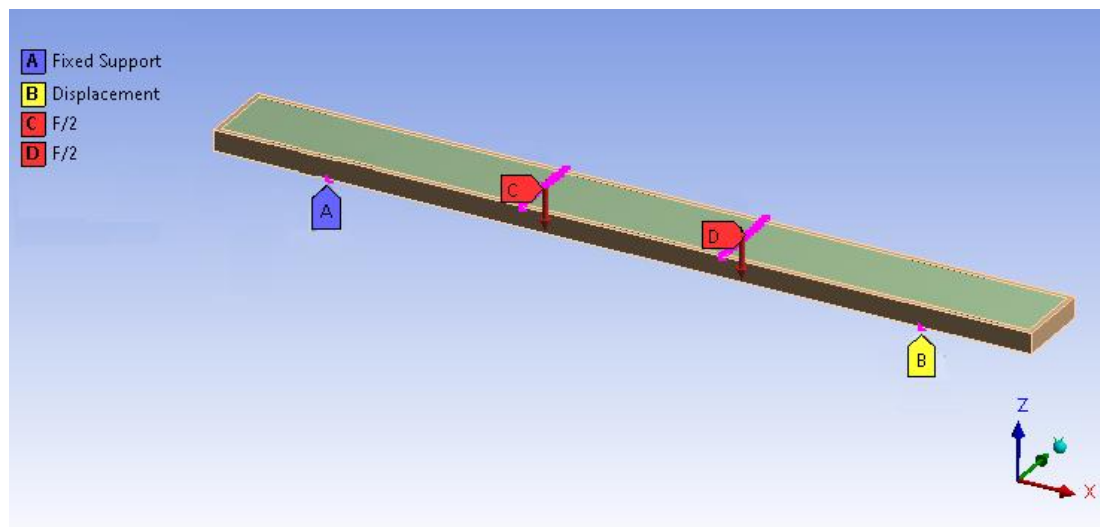
Probeta Onyx + Kevlar	
E ₁ (MPa)	4486,87
E ₂ (MPa)	894,96
E ₃ (MPa)	1011,5
v ₁₂	0.4535
v ₂₃	0.3701
v ₁₃	0.2566
G ₁₂ (MPa)	309,15
G ₂₃ (MPa)	287,15
G ₁₃ (MPa)	288,1

2.3.3 Condiciones de contorno

Para el modelo del ensayo de flexión a 4 puntos se establecieron los apoyos las cargas y el mallado. Se configuró una distancia entre apoyos de 92 mm de acuerdo al montaje del ensayo experimental. El análisis se hizo en base a una viga simplemente apoyada.

Figura 14

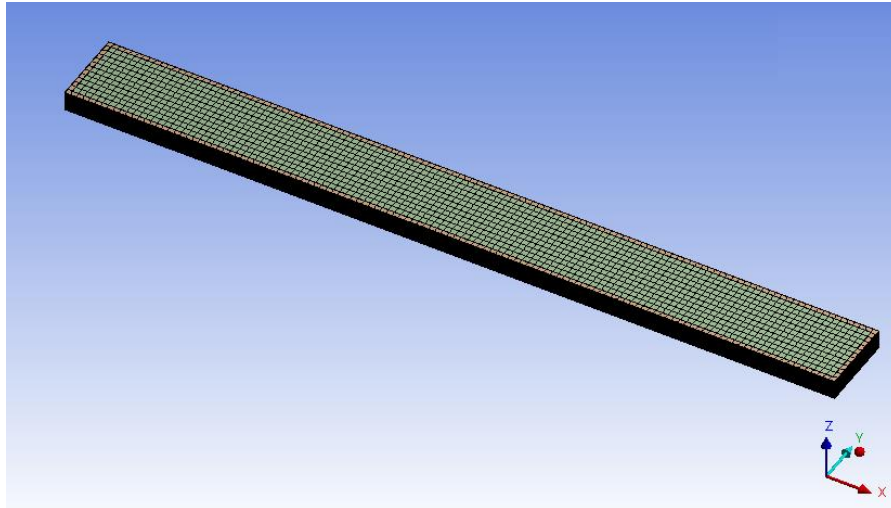
Condiciones de contorno para la simulación estática



En la Figura 14 se muestran las condiciones de contorno utilizadas para el ensayo estático. Se estableció Fixed Support para uno de los apoyos restringiendo el movimiento en las direcciones x , y , z ($x=0$, $y=0$, $z=0$). Para el otro apoyo se estableció uno de tipo Displacement dejando libre el movimiento en la dirección x y restringiendo en las otras 2 direcciones ($x=\text{free}$, $y=0$, $z=0$). Para la malla se emplearon elementos hexaédricos inicialmente de tamaño 1 mm (Figura 15). Se realizaron pruebas de verificación con la malla utilizada con el fin de comprobar la convergencia de la solución.

Figura 15

Malla empleada para la simulación estática

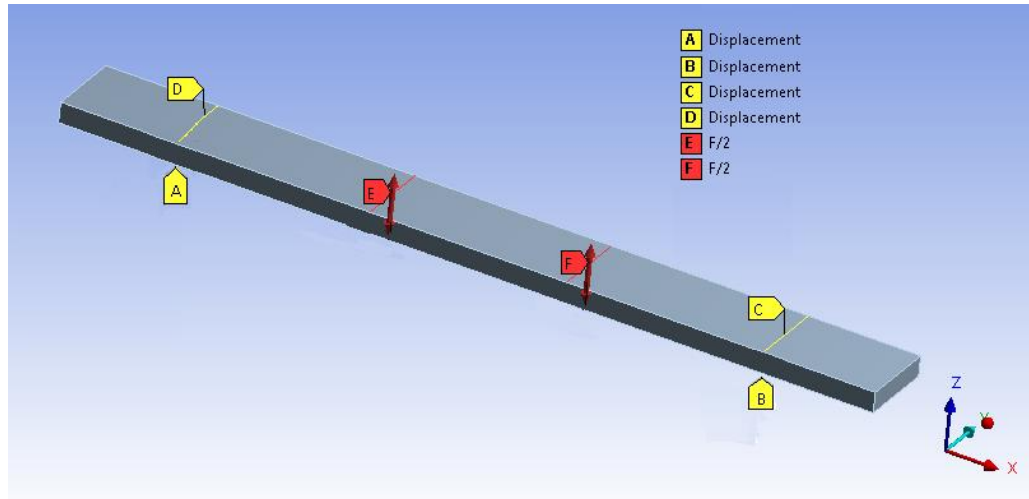


Para la simulación dinámica las condiciones de contorno fueron establecidas de acuerdo a las condiciones de la prueba experimental. Se configuró Displacement para uno de los apoyos restringiendo el movimiento en las direcciones x , y , z ($x=0$, $y=0$, $z=0$). Para los otros apoyos se establecieron unos de tipo Displacement restringiendo el movimiento en las direcciones y , z y dejando libre el movimiento en la dirección x ($x=\text{free}$, $y=0$, $z=0$). En los puntos de aplicación de la carga se aplicó una fuerza remota cíclica con la herramienta Fatigue Tool.

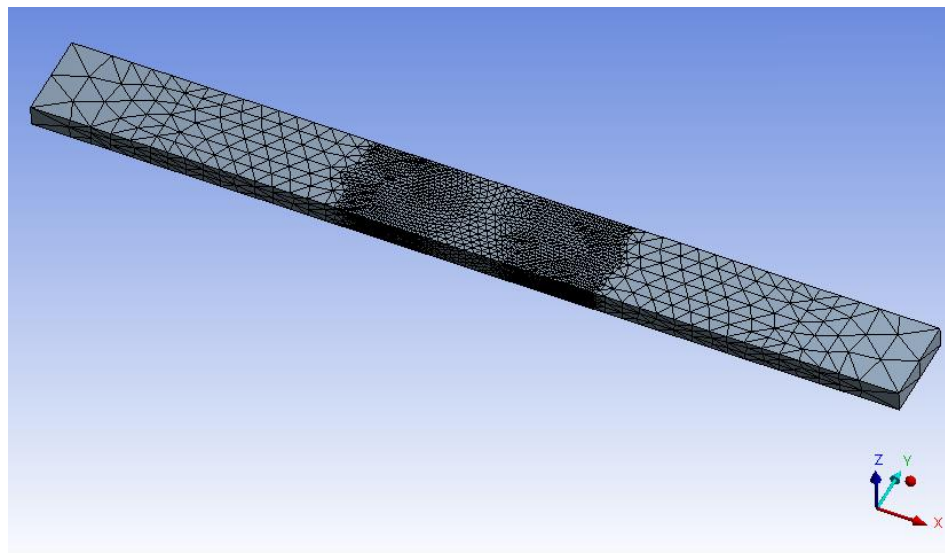
En la Figura 16 se muestran las condiciones de contorno utilizadas. Para la malla se emplearon elementos tetraédricos con un refinamiento en la zona donde se aplicaron las cargas (Figura 17).

Figura 16

Condiciones de contorno para la simulación dinámica

**Figura 17**

Malla empleada para la simulación dinámica



3. Resultados

3.1 Resultados ensayo de flexión a 4 puntos

A partir del ensayo de flexión a 4 puntos se obtuvieron datos de fuerza y desplazamiento. Luego estos datos se llevaron a una hoja de cálculo y se obtuvo la gráfica de esfuerzo vs deformación unitaria (Figura 18). Para el cálculo del esfuerzo se empleó la Ecuación 3.1 encontrada en la norma ASTM D6272-17. La deformación unitaria se obtuvo en base a la Ecuación 3.2

$$\sigma = \frac{P \cdot x}{b \cdot d^2} \quad (3.1)$$

Donde:

σ = Esfuerzo [MPa]

P = Fuerza [N]

x = distancia entre apoyos. [mm]

b = ancho de la probeta. [mm]

d = espesor de la probeta. [mm]

$$\varepsilon = \frac{4.70 * y_{m\acute{a}x} * d}{x^2} \quad (3.2)$$

Donde:

ε = deformación unitaria [mm/mm]

$y_{m\acute{a}x}$ = deflexión máxima en $L/2$ [mm]

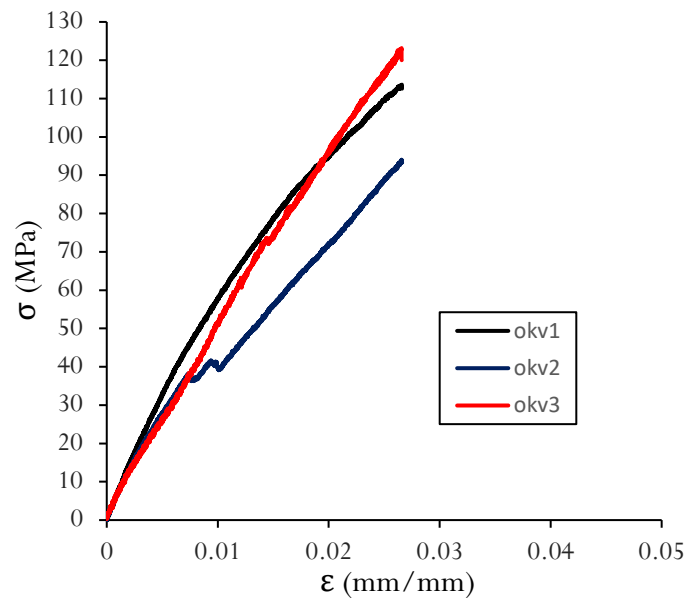
Para el cálculo de la deflexión máxima ($y_{m\acute{a}x}$) se empleó la Ecuación 3.3 donde (y) representa la deflexión en el punto de aplicación de la carga. Esta deflexión fue calculada debido a que durante los ensayos no se contaba con un dispositivo que registrara la deflexión en el punto

medio de la probeta. La expresión fue deducida en base a la teoría de deflexión en vigas. La deducción a esta ecuación puede ser encontrada en el Apéndice E.

$$y_{\text{máx}} = 1,15 \cdot y \quad (3.3)$$

Figura 18

Gráfica de Esfuerzo vs Deformación unitaria probeta de Onyx + Kevlar



Para obtener el módulo de elasticidad se calculó la pendiente de las curvas en el gráfico de esfuerzo vs deformación unitaria en la región elástica lineal, dicha pendiente se obtuvo en Excel al representar la recta de regresión en la zona elástica de la gráfica. La región elástica lineal se tomó para valores de deformación entre el 0,001 y 0,003 siguiendo las recomendaciones de la norma. Para cada curva se obtuvo una ecuación de tendencia. en la Figura 19 se muestra la gráfica de esfuerzo vs deformación unitaria de las rectas en la región elástica lineal y las respectivas

ecuaciones que describen dichas rectas. El cálculo del módulo de elasticidad se hizo en base a la Ecuación 3.4.

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (3.4)$$

Donde:

E = Módulo elasticidad [MPa]

$\varepsilon_1=0,001$ mm/mm

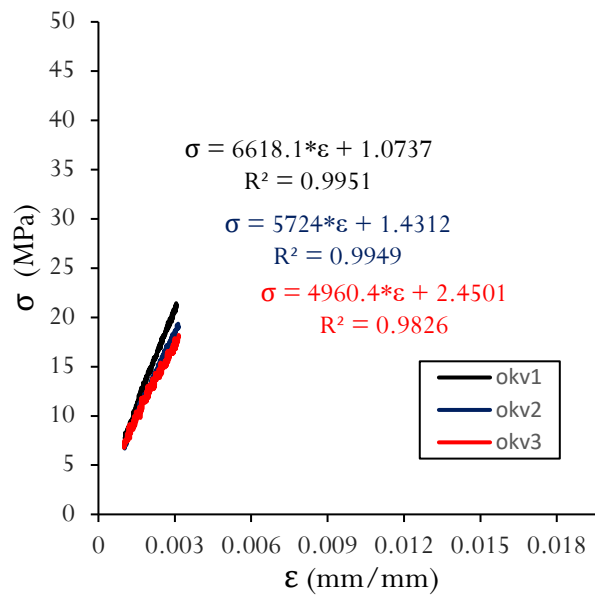
$\varepsilon_2=0,003$ mm/mm

σ_1 =esfuerzo@ ε_1 [MPa]

σ_2 =esfuerzo@ ε_2 [MPa]

Figura 19

Gráfica de Esfuerzo vs Deformación unitaria en la región elástica lineal



Los resultados de módulo de elasticidad y esfuerzo último para cada una de las probetas se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5

Resultados ensayo de flexión a 4 puntos probeta de Onyx + Kevlar

Descripción	F_{máx} (N)	Esfuerzo último (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)
Okv1	173	122.4	4893
Okv2	160	113.2	4592
Okv3	133	94.1	3632
<i>Promedio</i>	155.3	109.9	4372.3
<i>Desviación estándar</i>	20.4	14.4	658.6

De los resultados de la tabla anterior se obtuvo un valor promedio de 4372.3 MPa para el módulo de elasticidad (E_x) y un valor promedio de 109.9 MPa para el esfuerzo último (σ_x).

3.2 Resultados ensayo de fatiga a flexión alternativa

Se ensayaron 3 probetas distribuidas en 3 niveles de carga correspondientes al 92.3 %, 88.5 %, 86.2 % de la carga máxima. Los ensayos se realizaron a desplazamiento constante. Los desplazamientos correspondientes para los distintos niveles de carga fueron los siguientes: +/- 12 mm, +/- 11.5 mm y +/- 11,2 mm. Las probetas ensayadas se muestran en la Figura 20.

Figura 20

Imagen de las probetas ensayadas flexión alternativa



A partir de estos ensayos se obtuvo el número de ciclos de falla y el esfuerzo (calculado con la Ecuación 3.1) para cada una de las probetas (Tabla 6). Las gráficas de fuerza vs número de ciclos obtenidas para cada uno de los ensayos de fatiga realizados se muestran en el Apéndice F. En la Figura 21 se muestra la gráfica de fuerza vs número de ciclos y fuerza vs desplazamiento correspondiente a la probeta ensayada al nivel de carga de 92.3 % equivalente a +/- 12 mm de desplazamiento. A partir de estas gráficas se extrajo el número de ciclos de falla.

Tabla 6

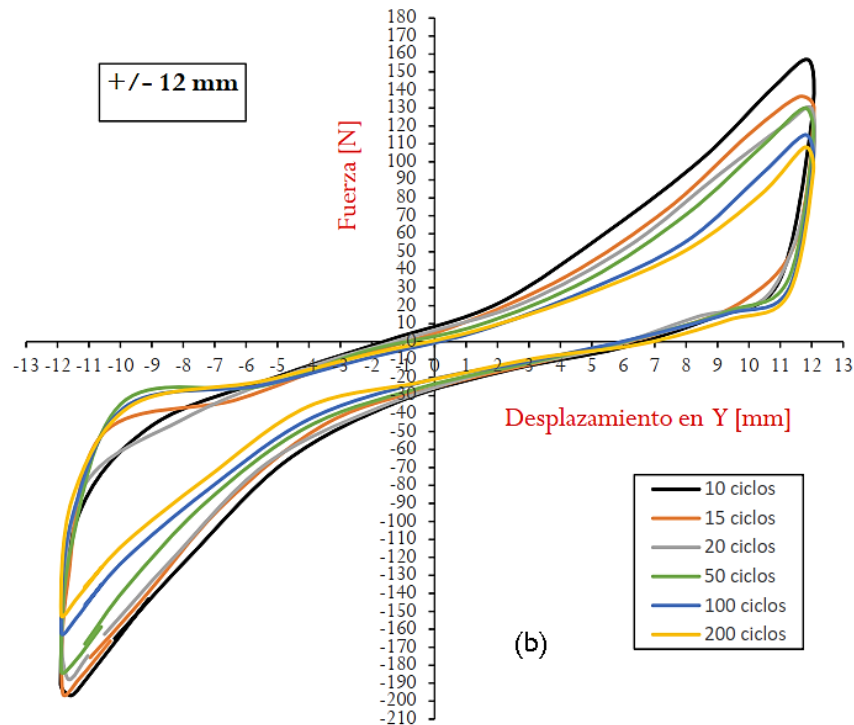
Resultados ensayos de fatiga a flexión alternativa

Probeta	Nivel Carga (%)	Desplazamiento Y (mm)	Esfuerzo (MPa)	Número ciclos
1	92.3	+/- 12	96.21	15
2	88.5	+/- 11.5	79.94	248
3	86.2	+/- 11.2	71.45	460

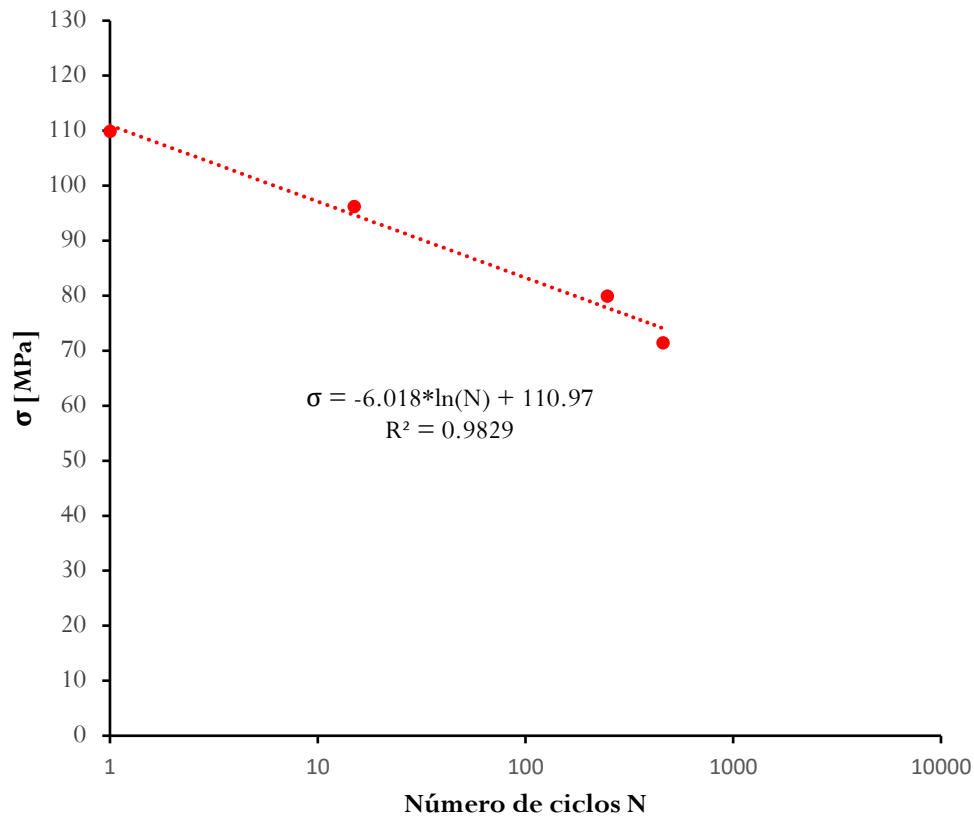
Figura 21

Resultados ensayo de fatiga a +/- 12 mm (a) Fuerza vs número de ciclos (b) Fuerza vs desplazamiento





A partir de los resultados obtenidos de los ensayos de fatiga por flexión alternativa se obtuvo la gráfica S-N del material compuesto (Figura 22). El valor del coeficiente de determinación $R^2 = 0.9829$ indica que la curva de tendencia se ajusta adecuadamente a los valores de cada ensayo representados en cada punto de la gráfica. La ecuación que representa esta curva describe el comportamiento de los ciclos de vida del material en función del esfuerzo máximo que este resiste. De la gráfica S-N podemos identificar que la probeta ensayada a un desplazamiento de 12 mm corresponde un número de ciclos de vida igual a 15 y un valor de esfuerzo de 96.21 MPa, la probeta ensayada a 11,5 mm le corresponde un número de ciclos de falla de 248 y un esfuerzo de 79.94 MPa. la probeta ensayada a 11.2 mm, falló a 460 número de ciclos y le correspondió un valor de esfuerzo de 71.45 MPa.

Figura 22*Gráfica S-N del material compuesto*

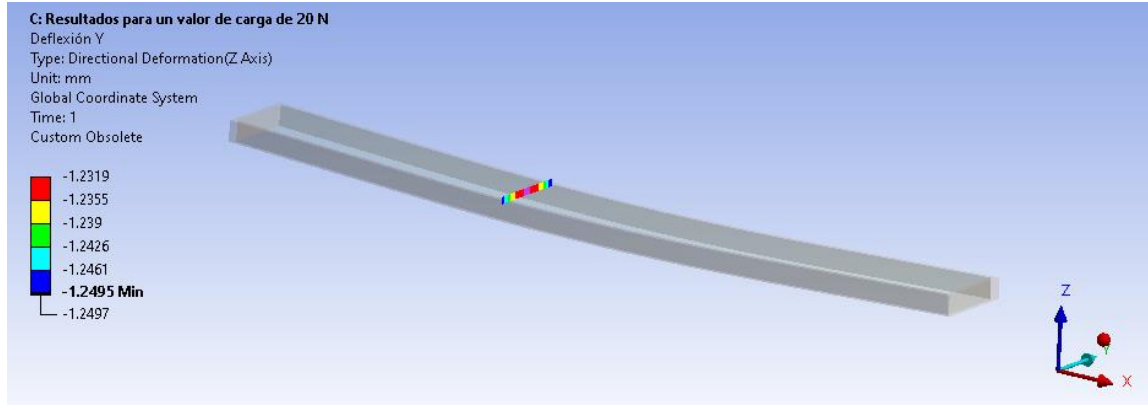
3.3 Resultados modelo numérico en Ansys

3.3.1 Simulación ensayo de flexión a 4 puntos

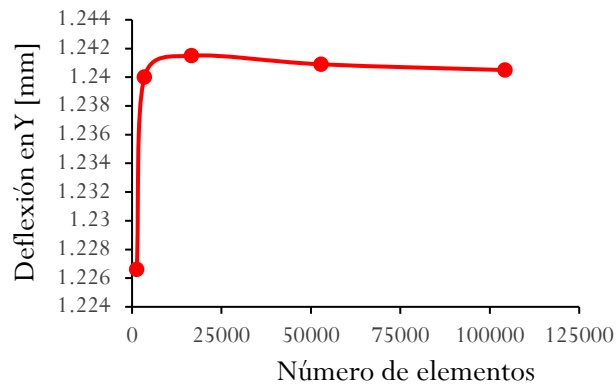
Se comparó la deflexión en el punto de aplicación de la carga entre el modelo numérico y el ensayo experimental. Inicialmente se analizó para un valor de carga de 20 N (Figura 23). Luego se hizo un análisis con diferentes tamaños de malla para garantizar la convergencia de la solución. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 24.

Figura 23

Resultados de deflexión para un valor de carga de 20 Newtons

**Figura 24**

Convergencia de la solución para los valores de deflexión en Y



A partir del análisis de convergencia fue seleccionada una malla de tamaño 1 mm. Para hacer una comparación con el resultado experimental en ANSYS se obtuvo la gráfica de “fuerza vs deflexión Y”. Para esto se analizó la deflexión en los puntos de aplicación de la carga. Se tomaron 8 valores de carga en un intervalo de 0-70 Newtons con incrementos de 10 Newtons (Tabla 7).

Tabla 7

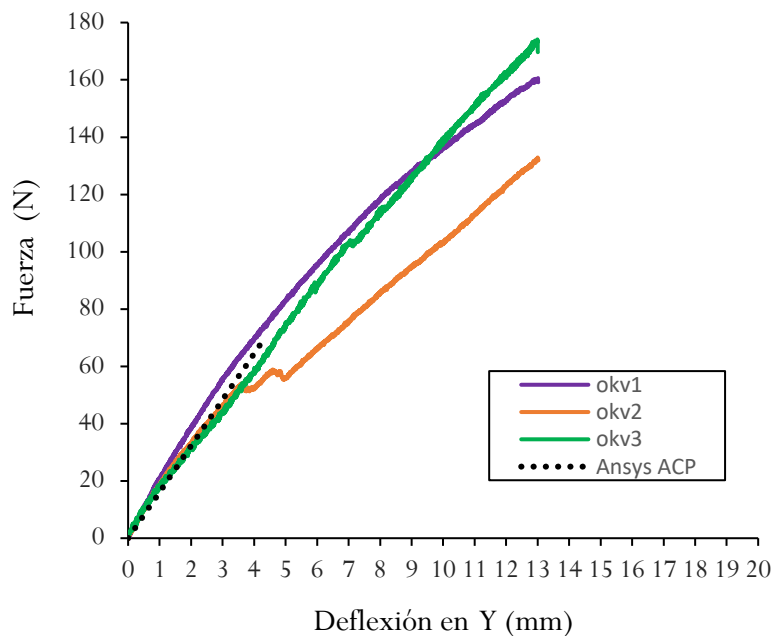
Resultados simulación ensayo de flexión a 4 puntos

Fuerza (N)	Deflexión en Y(mm)
0	0
10	0.62049
20	1.241
30	1.8615
40	2.482
50	3.1025
60	3.723
70	4.3435

La comparación entre el modelo numérico y el ensayo experimental se muestra en la Figura 25. Estos resultados se acercan bastante, lo cual indica que el modelo numérico es bastante acertado.

Figura 25

Comparación del modelo experimental y el modelo numérico

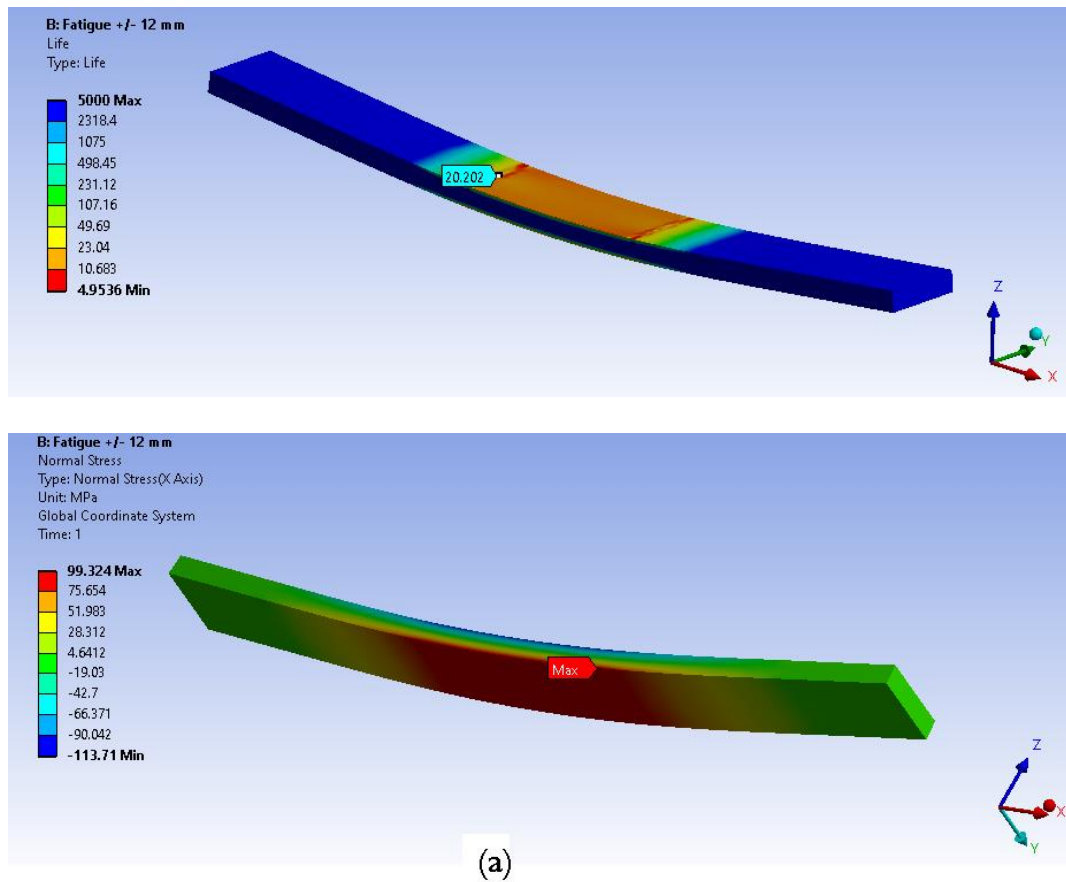


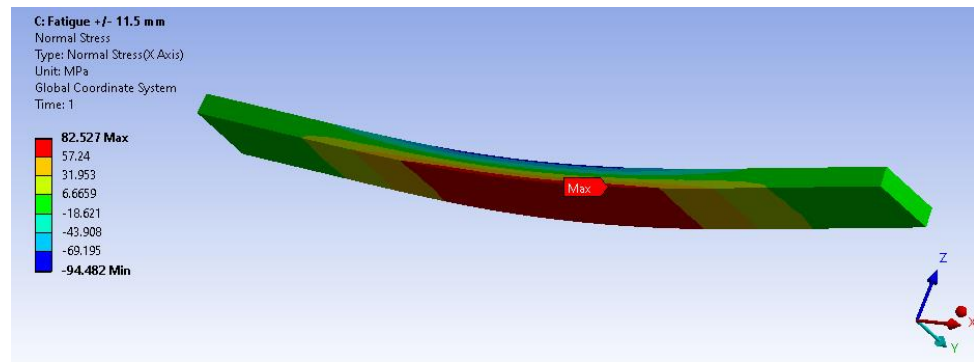
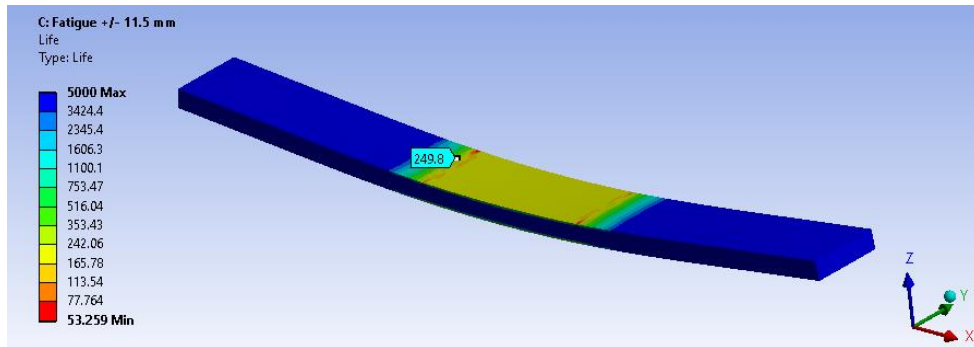
3.3.2 Simulación ensayo de fatiga

Se comparó la vida a fatiga del material representada en la curva S-N entre el ensayo experimental y el modelo numérico para los valores de esfuerzo y número de ciclos respectivos de los 3 ensayos realizados. Se simularon tres niveles de carga diferentes correspondientes al 92.3% (Figura 26a), 88.5% (Figura 26b) y 86.2 % (Figura 26c) de la carga máxima.

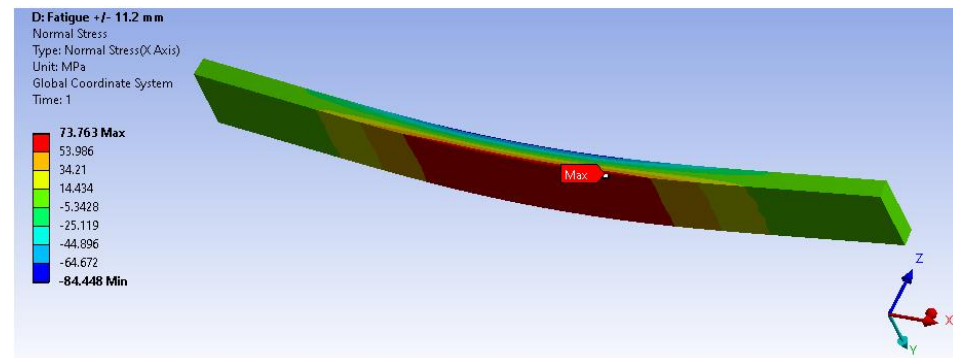
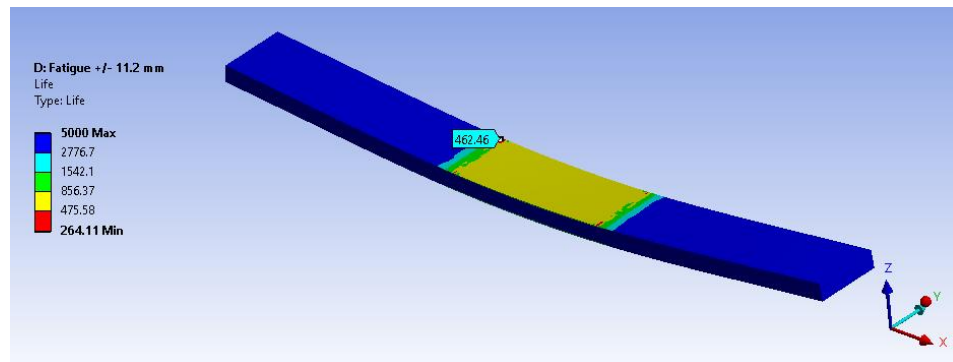
Figura 26

Vida a fatiga y esfuerzo obtenidos para los diferentes porcentajes de carga (a) 92.3 % (b) 88.5 % (c) 86.2%





(b)



(c)

En la Tabla 8 se muestra una comparación entre los resultados obtenidos a partir del ensayo experimental y el modelo numérico. A partir de estos datos se la gráfica mostrada en la Figura 27. Se evidencia que a mayores porcentajes de carga la vida a la fatiga del material disminuye. La cercanía entre el método experimental y el modelo numérico indican que este último es adecuado para un análisis de fatiga.

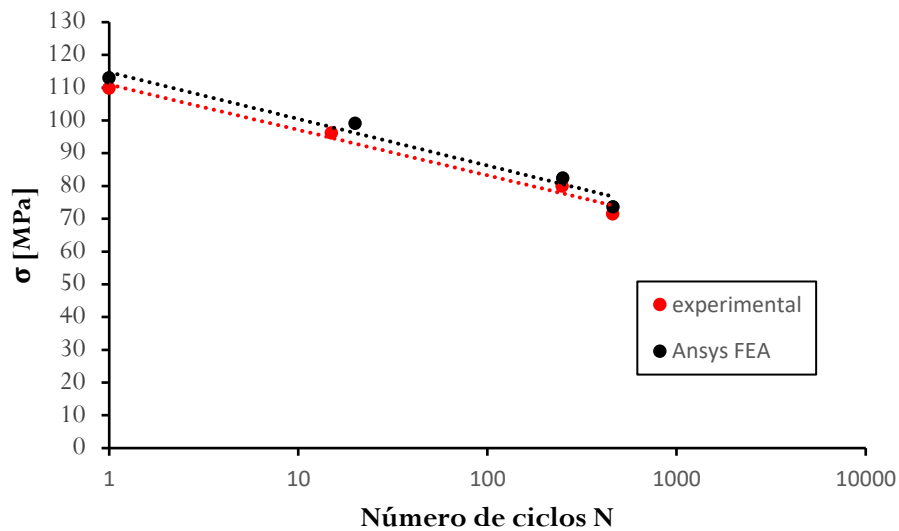
Tabla 8

Comparación de los resultados experimentales y numéricos

Número Ensayo	Nivel Carga (%)	Experimental		Ansys FEA	
		Esfuerzo (MPa)	Número ciclos	Esfuerzo (MPa)	Número ciclos
0	100	109.89	1	113.02	1
1	92.3	96.21	15	99.16	20
2	88.46	79.94	248	82.39	250
3	86.15	71.45	460	73.64	462.5

Figura 27

Comparación del ensayo experimental y el modelo numérico



4. Conclusiones

Se analizó el comportamiento mecánico a la fatiga por flexión alternativa de un material compuesto de matriz polimérica de onyx[®] con refuerzo de fibra continua de kevlar obtenido por manufactura aditiva mediante modelado por deposición fundida.

Para esto se siguió una metodología que consistía inicialmente en establecer la geometría de las probetas según los parámetros establecidos por la norma ASTM D6272-17. Con esto ya definido se procedió a ensayar estáticamente las probetas obteniendo así los resultados de las propiedades mecánicas como el módulo de elasticidad y la resistencia a la flexión. Se obtuvieron valores de 4372.3 MPa para el módulo de elasticidad y 109.8 MPa para la resistencia a la flexión.

Se obtuvo para el material compuesto la curva experimental de esfuerzo contra número de ciclos (S-N). La curva se determinó mediante ensayos por flexión alternativa de acuerdo a la norma ASTM D7774-17. A partir de estos ensayos se hallaron los ciclos de falla de las probetas a diferentes porcentajes de carga. Los valores obtenidos fueron los siguientes: 15, 248 y 460 ciclos correspondientes al 92.3 %, 88.5 % y 86.2% de la carga máxima respectivamente. Mostrando de esta manera la degradación de las propiedades del material a lo largo del tiempo por la aplicación de cargas cíclicas.

Se crearon modelos de las probetas fabricadas y se simuló el comportamiento estático y dinámico del material compuesto usando el software de elementos finitos Ansys. Se comparó el módulo de elasticidad experimental (4372.3 MPa) y el módulo obtenido de forma analítica (4486.87 MPa). Se observó un porcentaje de error del 2.6 %. También se hizo una comparación de la resistencia a la flexión experimental (109.9 MPa) y numérica (113.08 MPa). Se observó un porcentaje de error del 2.9 %.

Igualmente, respecto a la simulación dinámica se obtuvieron ciclos cercanos a los obtenidos experimentalmente. Por ejemplo, para los porcentajes de carga analizados, 92.3%, 88.5%, y 86.2% numéricamente se obtuvieron 20, 250 y 462.5 ciclos de falla respectivamente. Estos resultados obtenidos se validaron con los resultados de los ensayos experimentales observándose que el porcentaje de error entre los resultados experimentales y la aproximación numérica es mínimo.

Referencias Bibliográficas

- ASTM International. (2017). *ASTM D6272-17- Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four-Point Bending*. <https://doi.org/10.1520/D6272-17E01>
- ASTM International. (2017). *ASTM D7774-17-Standard Test Method for Flexural Fatigue Properties of Plastics*. <https://doi.org/10.1520/D7774-17>
- Barbero, E. J. (2017). *Introduction to Composite Materials Design*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315296494>
- Barros, F. A., Gamboa, J. M., Díaz-Ramírez, G. A., González-Estrada, O. A., & Cruz, R. A. (2019). Numerical and experimental study of flexural behaviour in polymer composite materials reinforced with natural fique textiles. *Journal of Physics: Conference Series*, 1247, 1–6. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1247/1/012001>
- Besednjak, A. (2005). Materiales Compuestos. Procesos de fabricación de embarcaciones. In *Edicions UPC*. <http://hdl.handle.net/2099.3/36804>
- Chaudhary, S. K., Singh, K. K., & Venugopal, R. (2018). Experimental and numerical analysis of flexural test of unfilled glass fiber reinforced polymer composite laminate. *Materials Today: Proceedings*, 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.070>
- Chen, X., & Liu, Y. (2014). Finite element modeling and simulation with ANSYS workbench. In *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench*. <https://doi.org/10.1201/b17284>
- Ghebretinsae, F., Mikkelsen, O., & Akessa, A. D. (2019). Strength analysis of 3D printed carbon fibre reinforced thermoplastic using experimental and numerical methods. *IOP Conference*

- Series: Materials Science and Engineering*, 700, 1–13. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/700/1/012024>
- Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (1997). Cellular Solids. In *Cellular Solids: Structure and Properties*, Second Edition. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139878326>
- Markforged Inc. (2018). *Markforged material datasheet*. <https://www.mark3d.com/en/wp-content/uploads/sites/6/2018/03/Markforged-Composites-Datasheet.pdf>
- Melenka, G. W., Cheung, B. K. O., Schofield, J. S., Dawson, M. R., & Carey, J. P. (2016). Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures. *Composite Structures*, 153, 866–875. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.07.018>
- Rodriguez, J. F., Thomas, J. P., & Renaud, J. E. (2000). Characterization of the mesostructure of fused-deposition acrylonitrile-butadiene-styrene materials. *Rapid Prototyping Journal*, 6(3), 175–186. <https://doi.org/10.1108/13552540010337056>
- Žmindák, M., Novák, P., Soukup, J., Milosavljevic, D., & Kaco, M. (2020). Finite element simulation of tensile test of composite materials manufactured by 3D printing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 776, 1–12. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/776/1/012082>

Apéndices

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS