



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



**EFFECTO DEL TRATAMIENTO TÉRMICO EN LA VIDA A LA FATIGA EN
FLEXIÓN PARA UN COMPUESTO DE ONYX REFORZADO CON
FIBRA DE VIDRIO IMPRESO EN 3D**

POR

Andrés Alonso De La Fuente Pizarro

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con Mención en Ingeniería Mecánica

Profesor Guía:
Doctor Carlos Medina Muñoz

marzo de 2023
Concepción (Chile)

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

Agradecimientos,

Agradecimientos al Centro para la Industria 4.0 C4i de la Universidad de Concepción por el apoyo en este proyecto gracias a su equipamiento, metodología y equipo humano.

A mi profesor guía, por su gran apoyo y confianza en mi trabajo. Además de su flexibilidad y humanidad.

A mis compañeros de Universidad, que hicieron de esta etapa una gran experiencia.

A la Universidad de Concepción y al Departamento de Ingeniería Mecánica, donde forjé mi pensamiento crítico, gracias a la vocación de grandes profesores.

Y en especial agradezco a mi madre, por su amor incondicional, por su sustento diario y por ser mi inspiración...

Tabla de contenido

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. MARCO GENERAL	1
1.2. ESTADO DEL ARTE	2
1.3. HIPÓTESIS	3
1.4. OBJETIVO GENERAL	3
1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA	5
2.1. FABRICACIÓN DE ESPECÍMENES	5
2.1.1. <i>Geometría y configuración de especímenes</i>	5
2.2. DISEÑO EXPERIMENTAL	6
2.2.1. <i>Tratamiento térmico</i>	6
2.2.2. <i>Análisis de porosidades</i>	6
2.2.3. <i>Ensayo de Flexión cuasi-estático</i>	7
2.2.4. <i>Ensayo de Fatiga en flexión</i>	8
2.2.5. <i>Distribución Weibull</i>	9
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	11
3.1. ANÁLISIS DE POROSIDADES	11
3.1. FLEXIÓN CUASI-ESTÁTICA	13
3.2. ENSAYOS DE FATIGA EN FLEXIÓN	14
3.3. DISTRIBUCIÓN WEIBULL Y CURVAS DE CONFIANZA	18
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES	20
REFERENCIAS	21

Lista de Figuras

Figura 1.1 Ensayo de fatiga en flexión. Fuente: (<i>Prabhakar et al., 2020</i>), a) Esquema ensayo fatiga en flexión con 3 puntos de apoyo. b) Parámetros de función desplazamiento vs tiempo en ensayo de fatiga.....	2
Figura 2.1 Dimensiones de los especímenes en [mm].	5
Figura 2.2 Esquema de la configuración interna de especímenes.....	6
Figura 2.3 Zona de objetivo de captura de micrografías.....	7
Figura 2.4 Esquema ensayo de flexión en tres puntos de contacto.	7
Figura 3.1 Micrografías de la sección transversal de los especímenes para ver porosidades y vacíos. a) Sin tratamiento térmico. b) Con tratamiento térmico de 175°C por 6 horas.....	12
Figura 3.2 Curvas de esfuerzo-deformación bajo flexión de 3 puntos.....	13
Figura 3.3 Falla de especímenes sometidos a fatiga en flexión. a) Grupo sin tratamiento térmico. b) Grupo con tratamiento térmico.	15
Figura 3.4 Historia de deformación durante vida a la fatiga. b) Ensayos a 70% de carga en especímenes sin tratamiento térmico. b) Ensayos a 50% de carga en especímenes con tratamiento térmico.	16
Figura 3.5 Etapas identificadas en la vida a la fatiga en flexión de especímenes de Onyx reforzado con fibra de vidrio sin tratamiento térmico.....	17
Figura 3.6 Curvas S-N de vida a la fatiga para confianza al 50%.....	19

Lista de tablas

Tabla 3.1. Porosidad promedio obtenida de las micrografías para cada grupo de especímenes.....	11
Tabla 3.2. Resultados de propiedades en flexión para ensayos cuasi-estáticos.....	14
Tabla 3.3. Datos de vida a la fatiga obtenidos para cada nivel de carga ensayado.....	14
Tabla 3.4. Parámetros y valores determinados de la distribución Weibull para cada nivel de carga.	18
Tabla 3.5. Parámetros a y b de la Función potencia para cada grupo de prueba.	18

Resumen

En los últimos años la impresión 3D o 3DP se ha ampliado para incluir a los materiales compuestos, donde, los filamentos de polímeros y los de refuerzo son extruidos juntos durante la impresión. En general, gran parte del desarrollo investigativo se ha llevado a cabo para los polímeros impresos reforzados con fibra corta, partículas, microfibra, entre otros refuerzos cortos; mientras que la investigación para polímeros reforzados con fibra continua impresos en 3D se encuentra en una etapa joven de desarrollo. En el presente informe se investiga la vida a la fatiga en flexión para un material compuesto de Onyx reforzado con fibra continua de vidrio impreso en una impresora Marktwo de Markforged.

Esta investigación aborda el estudio sobre el efecto en la vida a la fatiga en flexión al aplicar un tratamiento térmico de 175°C por 6 horas a un compuesto de Onyx reforzado con fibra continua de vidrio impreso en una impresora Markforged. También se analiza el efecto del tratamiento térmico en los vacíos y porosidades del compuesto.

Para estudiar la vida a la fatiga en flexión, se utiliza la flexión con 3 puntos de apoyo. Se define una geometría con relación de espesor- distancia de apoyos de 16:1. Primero, se realizan ensayos de flexión cuasi estática a una velocidad de 2 [mm/min], para determinar la carga máxima monotónica del material, con el fin de poder definir los límites de los niveles de carga. Para los ensayos de fatiga, se define una razón de amplitud R de 0.1. Se ensayan 5 especímenes por nivel de carga y la velocidad del cabezal es de 20 [mm/s]. El análisis de los datos para obtener la vida a la fatiga se realiza mediante la distribución Weibull de dos parámetros.

Se analizan las porosidades de los especímenes de ambos grupos mediante micrografías, obteniéndose una reducción del 40,68% en los vacíos para el grupo con tratamiento térmico. Esta reducción en las porosidades va acompañada con un aumento del 70% en el esfuerzo máximo promedio y un 40% de la rigidez en el ensayo de flexión cuasi-estática. Esta mejora se relaciona directamente con la reducción de los vacíos, debido a que se genera una interfaz fibra-fibra y fibra-matriz más fuerte, también la cristalización del nylon producto del aumento de la temperatura contribuye al mejoramiento de las propiedades mecánicas.

Con respecto a la vida a la fatiga en flexión, se observa una reducción en todos los niveles de carga para el grupo con tratamiento térmico. Esta reducción se atribuye a la degradación sufrida por la matriz debido a las altas temperaturas. Evidenciándose en la ruptura de la matriz en todas las fallas durante los ensayos de fatiga.

Palabras clave: Manufacturación aditiva, Tratamiento térmico, Fatiga.

Nomenclatura

3DP	Impresión 3D
AM	Manufacturación aditiva
CV	Coefficiente de variación
d	Deflexión punto medio viga, <i>mm</i>
FDA	Función de distribución acumulativa
FDP	Función de densidad de probabilidad
h	Espesor de espécimen, <i>mm</i>
L	Distancia entre apoyos
P	Carga, <i>N</i>
R	Relación de amplitud
S	Función potencia
SD	Desviación estándar
TMAF	Tiempo medio a la falla
TT	Tratamiento térmico

Subíndices

din	Dinámico
est	Estático
i	Elemento número “i”
máx	Máximo
mín	Mínimo

Simbología

<i>a</i>	Parámetro función potencia
<i>b</i>	Parámetro función potencia
α	Parámetro de escala
β	Parámetro de forma
σ	Esfuerzo de tensión, <i>MPa</i>
ε	Deformación

CAPÍTULO 1. Introducción

1.1. Marco general

Actualmente la manufacturación aditiva (AM) es un proceso de conformado que consiste en ir fabricando una pieza o elemento a medida que se le agrega material. Hoy en día el modelado por deposición fundida (MDF) o más conocido como impresión 3D (3DP) es uno de los procesos de manufacturación aditiva más utilizados y de relativo bajo costo en el mundo, además de tener una variedad de aplicaciones y proyecciones futuras (Ngo et al., 2018). Esta técnica permite crear geometrías complejas, las cuales serían prácticamente imposibles de fabricar con otros procesos. Los campos de aplicación de la impresión 3D se presentan en la industria aeroespacial, automovilística, construcción, metal y aleaciones, electrónica y biomédica. Esta tecnología ha presentado un crecimiento significativo en los últimos años y se proyecta revolucione la industria de la manufacturación, creando la próxima generación de materiales de alto desempeño (Kabir et al., 2020).

Sin embargo, las propiedades mecánicas de las piezas de materiales termoplásticos resultantes de la 3DP se encuentran por debajo del desempeño mecánico de otros materiales ingenieriles. Es debido a lo anterior que en busca de mejorar el desempeño de las piezas impresas se comienza a integrar diferentes refuerzos en forma de fibra, los cuales son mezclados con los filamentos termoplásticos y extruidos juntos durante la impresión. Con esto nace la impresión 3D de materiales compuestos, la cual consiste en piezas impresas de matriz polimérica reforzadas con fibra las que presentan mejoras en sus propiedades mecánicas en comparación con las piezas impresas sólo de termoplásticos (Ning et al., 2015).

Markforged es la empresa que desarrolla esta tecnología en el año 2014, creando las primeras impresoras de materiales compuestos reforzados con fibra continua en el mundo, además de distintos filamentos; como por ejemplo Onyx, un filamento utilizado como matriz, el cual se compone de Nylon reforzado con microfibras de carbono (MarkForged, 2020).

Hasta la fecha los materiales compuestos impresos en 3D se clasifican en 2 tipos, los que se encuentran reforzados con fibras cortas, partículas y nanopartículas; y los que están reforzados con fibra continua. Los compuestos impresos en 3D reforzados con fibra corta han sido estudiados y se han utilizado extensamente en el último tiempo, en distintos tipos de aplicaciones (Kabir et al., 2020), esto debido a que sus propiedades mecánicas presentan un aumento comparado con los materiales impresos en 3D sin reforzar. Sin embargo, esta mejora no es muy elevada y alcanza un límite a un nivel bajo de contenido de fibra (Ning et al., 2015).

Es debido a lo anterior que los materiales compuestos impresos en 3D reforzados con fibra continua representan una potencial e interesante alternativa, dado que las propiedades mecánicas logradas son mayores a las de los compuestos reforzados con fibra corta (Kabir et al., 2020), (Blok et al., 2018), (Zhuo et al., 2021). En el artículo de Díaz-Rodríguez et al. (2021) recopilan una serie de investigaciones que han estudiado propiedades mecánicas hasta ese momento. De esta investigación se desprende que aún existen muchas propiedades no caracterizadas para este tipo de materiales, como

lo es la fatiga en flexión. Además, se carece de información sobre el efecto de los parámetros de impresión en propiedades mecánicas, entre muchas otras cosas.

Finalmente, la impresión 3D de polímeros reforzados con fibra continua comprende un campo de investigación y estudio amplio, esto es debido a que aún se encuentra en una etapa joven de desarrollo.

1.2. Estado del Arte

Las investigaciones realizadas a la fecha en torno a la fatiga para materiales compuestos impresos en 3d son escasas. Existen 5 artículos referentes a fatiga en compuestos impresos en 3D hasta el 2021, todos estudian la fatiga axial, por lo tanto, no existen publicaciones que hasta la fecha caractericen la fatiga en flexión para este tipo de materiales, por lo tanto, se buscan referencias sobre la fatiga en flexión en laminados tradicionales, con el fin de identificar procedimientos y normas utilizadas.

Prabhakar et al. (Prabhakar et al., 2020) estudian el efecto de la saturación de agua de mar sobre la fatiga en flexión para compuestos de ester-vinilo reforzado con fibra de carbono, se basan en la norma ASTM D7264, la cual es indicada para ensayos de flexión en compuestos con matriz polimérica y testean 3 probetas por nivel de carga. En el artículo primero someten a las probetas a ensayos de flexión de 3 puntos cuasi-estáticos para determinar la deformación promedio a la cual se llega a la falla y definir los porcentajes de carga que aplican en el ensayo de fatiga, donde el ciclo de carga oscila entre un valor máximo y mínimo como se aprecia en la Figura 1.1. La relación de amplitud que utilizan es de $R = 0.1$ (cociente entre la carga máximo y mínima) y la frecuencia del movimiento del cabezal es de 1 Hz, en este artículo realizaron el ensayo de fatiga con la misma máquina servo-hidráulica que se dispone para este proyecto. La relación entre la distancia de los soportes y el espesor de la probeta que utilizaron fue de 32:1, valor recomendado por la norma.

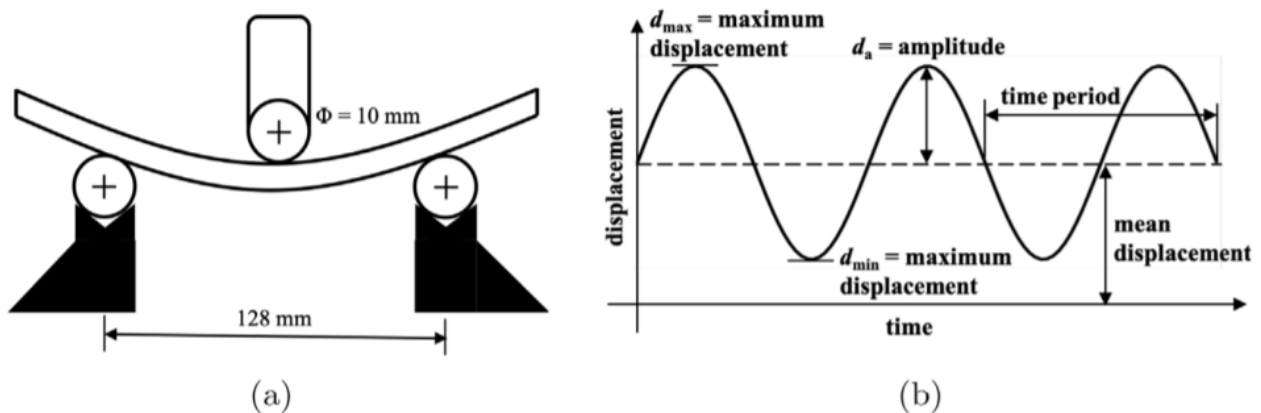


Figura 1.1 Ensayo de fatiga en flexión. Fuente: (Prabhakar et al., 2020), a) Esquema ensayo fatiga en flexión con 3 puntos de apoyo. b) Parámetros de función desplazamiento vs tiempo en ensayo de fatiga.

En el artículo de Fan et al. (Fan et al., 2019) someten a fatiga en flexión a un laminado, en el estudio no nombran la norma utilizada, pero utilizan un ensayo de flexión de 3 puntos, donde a diferencia del procedimiento de (Prabhakar et al., 2020) la razón espesor-distancia soportes es de 16:1.

En (Song et al., 2021) estudian la fatiga en flexión en un laminado con tejido en 3d, realiza el ensayo con flexión en 3 puntos, utilizando una razón de amplitud de 0.1, una razón espesor-apoyos de 16:1, una frecuencia de ciclos de 3 Hz y testeando 3 probetas por cada nivel de esfuerzo.

Algunos artículos describen el análisis estadístico de los datos para la construcción de la curva S-N. Por ejemplo en el artículo de Selmy et al. (2013) testean 5 especímenes por nivel de carga y utilizan una distribución Weibull de dos parámetros para el análisis de los datos de vida a la fatiga y obtención de la curva. También en el estudio de Raif Sakin e Irfan Ay (2008) se detalla paso a paso el procedimiento de obtención de parámetros del modelo Weibull para ensayos de fatiga en flexión de un compuesto de poliéster reforzado con fibra de vidrio. Utilizan el método de regresión lineal, obteniendo los valores de probabilidad de cada espécimen con el Rango medio de Bernard.

Ultimamente se han abordado investigaciones sobre el post-procesamiento de materiales compuestos impresos en 3D, con el fin de disminuir las porosidades y vacíos que son inherentes al proceso de manufactura aditiva y así mejorar las propiedades mecánicas. Kui Wang et al. (2021) someten a tratamiento térmico bajo distintas condiciones a compuestos reforzados con fibra continua de carbono impresos en 3D. En este estudio logran comparar los efectos de la temperatura del tratamiento térmico en la porosidad, cristalinidad del material y estabilidad dimensional. También evalúan las propiedades en flexión, donde se concluye que el tratamiento térmico mejora las propiedades mecánicas del compuesto de fibra de carbono impreso en 3D por medio de una disminución en las porosidades, acompañada de una interfaz más fuerte.

En la investigación de Hetrick et al. (2022) desarrollan e implementan un nuevo procedimiento que consiste en la aplicación de presión con distintos niveles de temperatura, con el fin de remover los vacíos en forma de burbujas de aire de los especímenes. En el artículo se obtuvo que la reducción de vacíos dependía en gran medida de la dirección de la fibra, sin embargo la densidad aumentó para todos los especímenes, confirmando una reducción de la porosidad.

Ali et al. (2023) indagan en la aplicación de un tratamiento térmico de 200°C con 250 kPa por 15 minutos a un compuesto reforzado con fibra de carbono impreso en 3D donde varían la orientación de impresión y otros parámetros de fabricación. Como resultado obtienen un aumento del 6.65% en la resistencia para los compuestos reforzados con tratamiento térmico indicando que este aumento se debe a que el material de la matriz es completamente absorbido por el material de refuerzo y, por lo tanto, la porosidad disminuye, entonces puede soportar una carga mayor debido a interfaces más fuertes que dan como resultado propiedades mecánicas mejoradas.

1.3. Hipótesis

Esta investigación se realiza bajo la hipótesis que “ La aplicación de un tratamiento térmico de 175°C por 6 horas a un compuesto de Onyx reforzado con fibra continua de vidrio impreso en 3D genera una mejora en la vida a la fatiga en flexión”

1.4. Objetivo general

Determinar el efecto que tiene la aplicación de un tratamiento térmico de 175°C por 6 horas en la vida a fatiga en flexión en un compuesto de Onyx reforzado con fibra continua de vidrio impreso en 3D

1.5. Objetivos específicos

Los objetivos específicos se enlistan a continuación:

- O1 Imprimir probetas con impresora Marktwo.
- O2 Realizar tratamiento térmico a grupo de compuestos de Onyx reforzado con fibra continua de vidrio impresos en 3D.
- O3 Efectuar ensayos de flexión cuasi-estática con 3 puntos de apoyo.
- O4 Realizar ensayos de fatiga en flexión con 3 puntos de apoyo.
- O5 Determinar curvas de Wholer para ambos grupos de estudio.
- O6 Obtener porcentaje de vacíos y porosidades para ambos grupos de estudio.

CAPÍTULO 2. Metodología

2.1. Fabricación de especímenes

Los compuestos impresos reforzados con fibra continua de vidrio que se ensayan y analizan en este estudio se imprimen con una impresora MarkTwo de MarkForged. Los materiales que se utilizarán en esta investigación son: Fibra de vidrio de MarkForged como refuerzo de fibra continua; y Onyx de MarkForged como filamento de matriz. Onyx es un compuesto de Nylon reforzado con fibra corta de carbono 3.5 veces más rígido que el Nylon (MarkForged, 2020), además exhibe mayor tenacidad y resistencia al calor que otros polímeros utilizados en la manufacturación aditiva, como el ABS. Al igual que Onyx, el filamento de fibra de vidrio también es un compuesto. Fernandes et al. (Fernandes et al., 2021) analizan los filamentos de fibra continua en una microescala. Determinan que el filamento de fibra contiene un 30% de volumen de fibra aproximadamente, esto causa que los compuestos fabricados por manufacturación aditiva tengan menos volumen de fibra que los compuestos tradicionales, generando una menor resistencia y rigidez en las piezas.

Para las capas superiores e inferiores se utiliza un llenado sólido de Onyx (100% infill), con una deposición de filamentos de $\pm 45^\circ$, esta configuración es la que viene por defecto en Eiger. Los parámetros tales como velocidad de impresión, temperatura de la boquilla de extrusión y espesor de capa, son determinados automáticamente por el software en función de los materiales utilizados.

2.1.1. Geometría y configuración de especímenes

La geometría de los especímenes se muestra en la Figura 2.1 y esta se define de acuerdo con lo recomendado por la norma ASTM D 7264, la cual está indicada para ensayos de flexión para materiales compuestos con matriz polimérica. La geometría de las probetas es rectangular, con dimensiones de largo, ancho y espesor de 80 x 13 x 4 mm respectivamente.

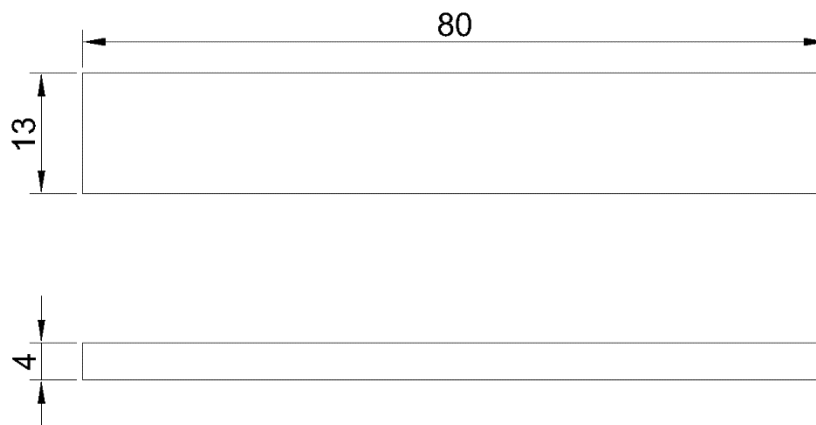


Figura 2.1 Dimensiones de los especímenes en [mm].

En cuanto a la configuración interna de los especímenes, en la Figura 2.2 se muestra un esquema de la sección transversal de las piezas, donde se pueden identificar las zonas de refuerzo, las paredes y el llenado (infill). Estos parámetros son configurados en el Software Eiger, donde se definen

4 capas superiores e inferiores, 2 capas laterales para las paredes de 0.4mm cada capa, 8 capas de refuerzo de fibra de vidrio y en el centro un llenado tipo triangular al 37%. El volumen de fibra aproximado que entrega el software para los especímenes es de 0.24.

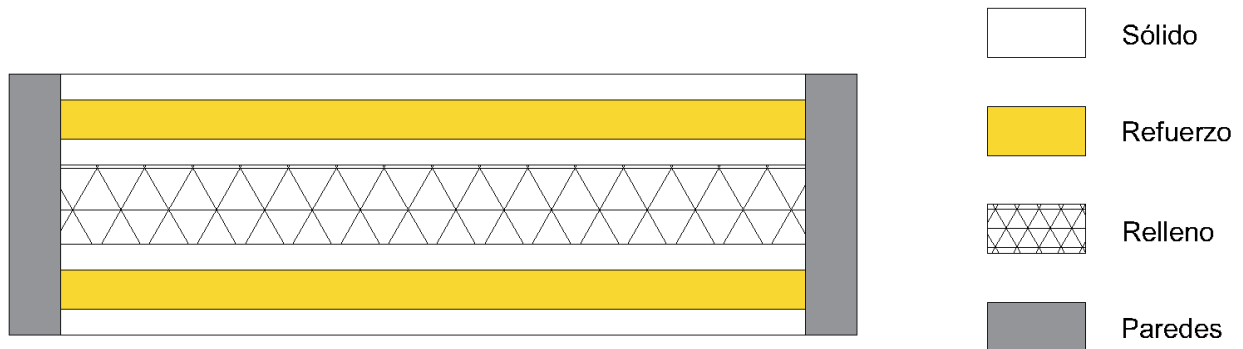


Figura 2.2 Esquema de la configuración interna de especímenes.

2.2. Diseño experimental

2.2.1. Tratamiento térmico

La temperatura utilizada para el tratamiento térmico se establece mediante pruebas anteriores realizadas en el horno utilizado en la investigación, las cuales se basan en el procedimiento realizado por (Wang et al., 2021), donde analizan la resistencia al corte interlaminar para especímenes con tratamientos térmicos a 100°C, 150°C, 175°C y 200°C, donde se extrae que el rango de temperatura y tiempo que maximiza las propiedades mecánicas en flexión se encuentra entre 4-8 h y 150°C-200°C. De acuerdo con esto, se establece para esta investigación un tratamiento térmico de 175°C por 6 horas en un horno no presurizado, con atmosfera normal, con una razón de aumento de temperatura de 10°C/min, hasta llegar a los 175°C que son mantenidos por 6 horas para finalmente detenerse y dejarse enfriando hasta la temperatura ambiente.

2.2.2. Análisis de porosidades

Con el fin de comparar el efecto del tratamiento térmico sobre los vacíos y porosidades de los especímenes y su impacto en las propiedades mecánicas se realizan 5 micrografías de la sección transversal de especímenes aleatorios para ambos grupos (con y sin tratamiento térmico). Estas micrografías son analizadas con el software ImageJ, para estimar el porcentaje de área de vacíos en la sección transversal y obtener un valor promedio para cada grupo.

Las imágenes se toman abarcando el área de refuerzo de los especímenes, donde también se incluyen las capas exteriores de Onyx, en la Figura 2.3 se indica esquemáticamente la zona de objetivo de las micrografías.

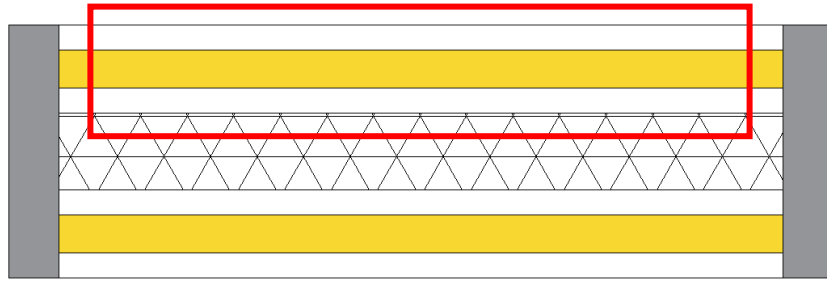


Figura 2.3 Zona de objetivo de captura de micrografías

Este método es utilizado anteriormente, como en los artículos de (Blok et al., 2018; Fernandes et al., 2021; Wang et al., 2021). De esta manera se obtiene un valor promedio de las porosidades en la matriz, fibra y conjunto de ambos grupos de probetas.

2.2.3. Ensayo de Flexión cuasi-estático

Se realizan ensayos de flexión cuasi-estática mediante una flexión de 3 puntos, Figura 2.4, según lo indicado por la norma ASTM D7264/7264M. Este procedimiento se realiza con el propósito de determinar la carga y deformación promedio a la falla para la configuración de probetas diseñada. El ensayo se realiza a una velocidad de cabezal de 2 mm/min y la razón entre la distancia de los apoyos y el espesor de la viga es de 16:1, siendo la probeta un 20% más larga que la zona entre los apoyos.

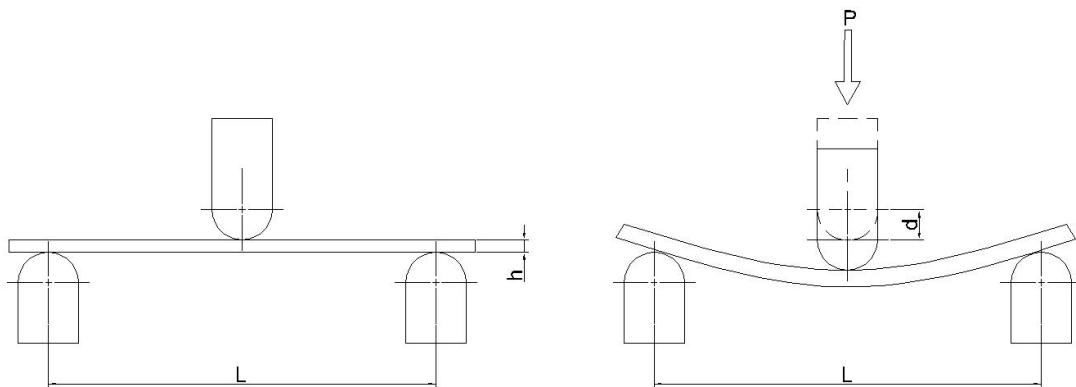


Figura 2.4 Esquema ensayo de flexión en tres puntos de contacto.

El esfuerzo de flexión máximo ocurre en la mitad del sistema y se calcula en las superficies exteriores de los especímenes, está dado según la ecuación (1) :

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (1)$$

Mientras que la deformación máxima en la superficie externa que también ocurre en el centro de la distancia entre los apoyos se calcula según la ecuación (2):

$$\epsilon = \frac{6dh}{L^2} \quad (2)$$

Donde, P: Fuerza aplicada [N], L: Distancia entre soportes [mm], b: Ancho de la viga [mm], h: Espesor de la viga [mm], d: Deflexión del punto medio de la viga [mm].

Adicionalmente se calcula el módulo elástico en flexión para una deformación entre 0.001 y 0.003. Se deben mencionar los valores medios calculados para las propiedades con su desviación estándar.

2.2.4. Ensayo de Fatiga en flexión

Dado que actualmente no existen normas específicas para los ensayos de fatiga en flexión en materiales compuestos, las pruebas realizadas en la presente investigación se llevan a cabo utilizando un ensayo dinámico con cargas cíclicas de flexión en 3 puntos, donde el cabezal que aplica la carga en la mitad de los apoyos posee un movimiento de carácter sinusoidal. La razón de amplitud (ecuación (3)) para cada nivel de carga es de 0.1, esta razón se define como el cociente entre la carga mínima del ciclo y la carga máxima.

$$R = \frac{P_{mín}}{P_{máx}} = 0.1 \quad (3)$$

Para los ensayos se la velocidad del cabezal durante el movimiento se define en 20 mm/s y se utiliza una máquina electromecánica con una celda de carga de 5 kN. El nivel de carga de cada ensayo se define en la ecuación (4) y está dado por el cociente entre la carga máxima alcanzada durante el movimiento y la fuerza máxima monotónica determinada en los ensayos de flexión cuasi-estática.

Donde,

$$\frac{P_{máx_{din}}}{P_{máx_{est}}} = \% \text{ nivel de carga} \quad (4)$$

$P_{máx_{din}}$: Carga máxima durante el ensayo de fatiga [N],

$P_{máx_{est}}$: Carga máxima monotónica (ensayo flexión cuasi-estática) [N].

Para determinar la curva S-N del material, los niveles de carga que se estudian son: 90%, 70%, y 50%. Se construyen curvas para 3 niveles distintos de confianza; 90%, 50% y 10% de probabilidad de falla. Además, se estipulan 5 probetas por nivel, teniendo un total de 15 probetas a ensayar para cada grupo. Esto se justifica por lo indicado en (Reifsnider, 1991), donde se recomienda testear más especímenes que niveles de carga, para obtener mayor representación estadística por nivel.

Para la construcción de las curvas S-N se hace uso de la función potencia, la cual es utilizada para el mismo fin en los artículos (Sakin & Ay, 2008) y (Nurashikin & Hazizan, 2011). Esta función se describe en la ecuación (5) y es caracterizada por dos parámetros a y b .

$$S = a(N_f)^b \quad (5)$$

Donde,

- S : Nivel de carga %,
 N_f : Numero de ciclos a la falla,
 α, b : Parámetros a determinar de la función.

2.2.5. Distribución Weibull

Dado que para los ensayos de fatiga se establece un límite máximo de 1 millón de ciclos a registrar para cada espécimen, es esperable que para los niveles de carga más bajos algunas unidades no alcancen a fallar antes de límite establecido. De acuerdo con lo anterior, es posible que los datos obtenidos para los distintos niveles de carga sean completos (se conoce el momento de falla exacto de cada unidad) o censurados (algunas unidades no alcanzan la falla antes del millón de ciclos).

Luego, el método más indicado y utilizado (Kızılersü et al., 2018) para proceder con este tipo de datos es el método de estimación de la máxima verosimilitud. En el método de estimación de la máxima verosimilitud se define una función $L(\alpha, \beta)$ de máxima verosimilitud la cual se representa en la ecuación (6).

$$L(\alpha, \beta) = \prod_{\delta=1} f(t_i; \alpha, \beta) \prod_{\delta=0} 1 - F(t_i; \alpha, \beta) \quad (6)$$

Donde $f(t_i; \alpha, \beta)$ es la FDP presentada en la ecuación (2) y $F(t_i; \alpha, \beta)$ es la FDA de la ecuación (7). El valor de δ indica si se utiliza la función de densidad para los datos no censurados o la función de confiabilidad para los datos censurados. Al reemplazar, la función de máxima verosimilitud para datos con censura a la derecha queda como:

$$L(\alpha, \beta) = \prod_{i=1}^n \left\{ \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t_i}{\alpha} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t_i}{\alpha} \right)^\beta} \right\}^{\delta_i} \left\{ e^{-\left(\frac{t_i}{\alpha} \right)^\beta} \right\}^{1-\delta_i} \quad (7)$$

Por último, para obtener los parámetros α y β se debe maximizar esta función, derivando con respecto a un parámetro mientras se considera constante el otro. Se puede notar que la función de máxima verosimilitud consiste en el producto de una serie de valores menores que 1, por ende, esto trae generalmente problemas computacionales al momento de calcular. Para evitar este problema, se maximiza el logaritmo de la función $L(\alpha, \beta)$, obteniendo la ecuación (8). Esto es conveniente, debido que, el logaritmo, al ser una función que aumenta monótonamente, los valores que maximizan $\ln(L(\alpha, \beta))$ son los mismos que maximizan a $L(\alpha, \beta)$.

$$\ln(L(\alpha, \beta)) = \sum_{i=1}^n (n\delta_i \ln \beta - n\beta \delta_i \ln \alpha) + (\beta - 1) \sum_{i=1}^n (\delta_i \ln t_i) - \sum_{i=1}^n \left(\frac{t_i}{\alpha} \right)^\beta \quad (8)$$

De esta forma es más sencillo maximizar una función que se compone de sumatorias que una función que se compone del producto de funciones. Para la obtención de los parámetros mediante el método recientemente mencionados se hará uso del software Excel con su complemento Solver, además se corroboran los resultados obtenidos con los del software Minitab.

Se puede calcular el tiempo medio a la falla (TMAF), la desviación estándar (SD) y el coeficiente de variación de la distribución Weibull de dos parámetros en las ecuaciones (9), (10) y (11) respectivamente.

$$TMAF = N_0 = \alpha \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (9)$$

$$SD = \alpha \cdot \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)} \quad (10)$$

$$CV = \frac{SD}{N_0} = \frac{\alpha \cdot \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)}}{\alpha \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)} \quad (11)$$

Donde Γ es la función gamma.

CAPÍTULO 3. Resultados y discusión

3.1. Análisis de porosidades

Al analizar y comparar las micrografías de las probetas se evidencia una clara disminución en las porosidades para el grupo con tratamiento térmico. En la tabla 3.1, se adjuntan los porcentajes de área promedio de porosidades para ambos grupos. Donde específicamente se obtiene una disminución de las porosidades del 40.68%.

Tabla 3.1. Porosidad promedio obtenida de las micrografías para cada grupo de especímenes.

	Sin tratamiento térmico	Con tratamiento térmico
Porosidad promedio	19.02%	11.28%

Las secciones transversales obtenidas por micrografías de los especímenes sometidos y no sometidos a tratamiento térmico se muestran en las Figuras 3.1 (a) y (b) respectivamente. En las figuras se muestra una porción de las capas superiores de las probetas, las cuales se componen de 2 capas de Onyx, seguidas por 4 capas de fibra de vidrio. Estas capas se encuentran indicadas con el color blanco y amarillo en la Figura 2.2 (Sección 2.1 cap. 2).

En la Figura 3.1 (a) se presenta la micrografía de la sección transversal de un espécimen de Onyx reforzado con fibra de vidrio continua sin tratamiento térmico. En la imagen se indica claramente una variedad de vacíos, de distinta morfología, que se producen durante la impresión. Se pueden apreciar los vacíos que se generan en las interfaces del apilamiento, donde se observa que los vacíos de mayor envergadura aparecen en las interfaces Onyx-fibra y fibra-fibra, mientras que las porosidades y vacíos de menor tamaño se concentran en las capas de fibra. Esto disminuye y limita un potencial desempeño mecánico de estos materiales, dada la alta cantidad y concentración de vacíos que son inherentes a este proceso de manufacturación.

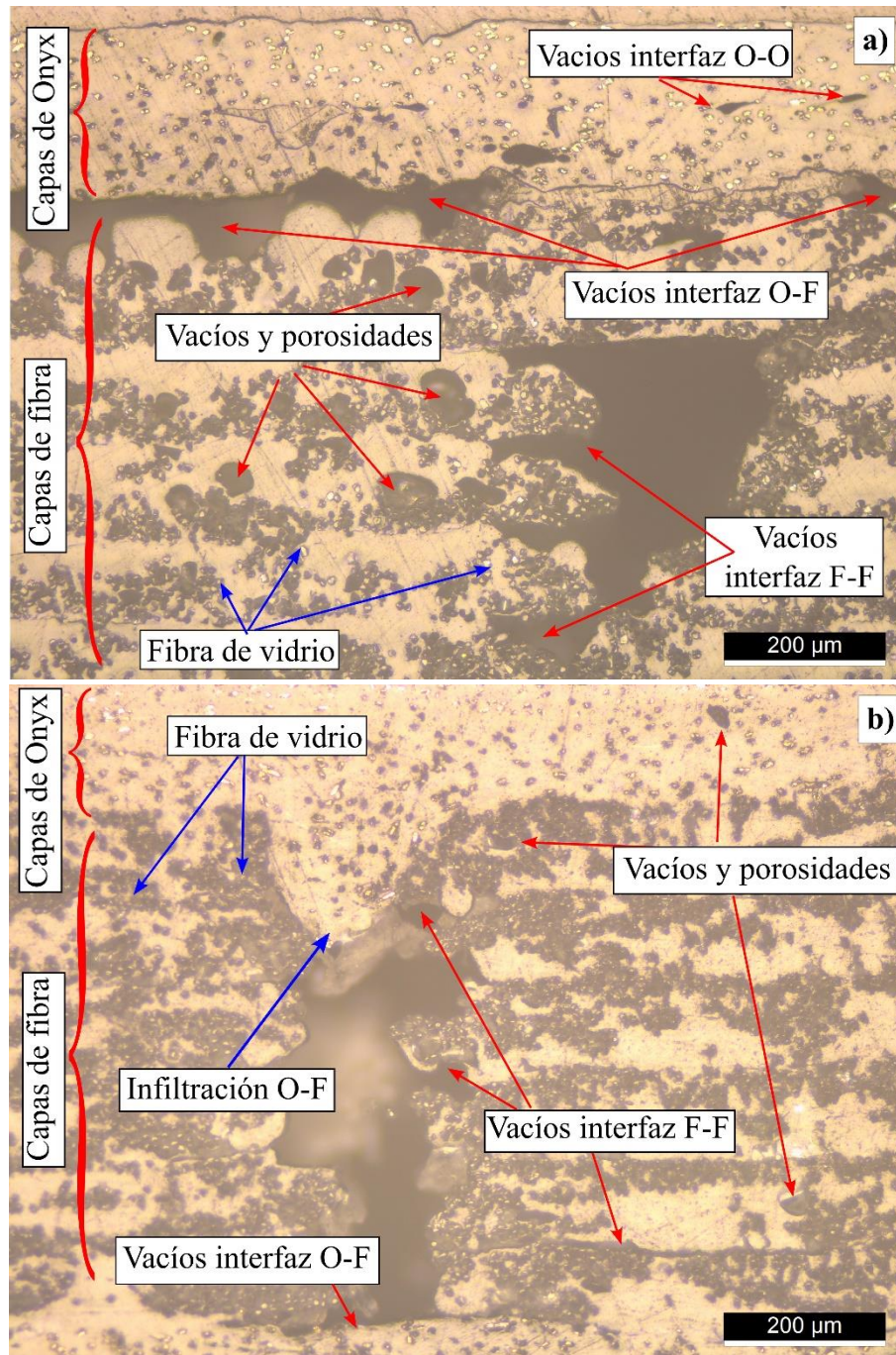


Figura 3.1 Micrografías de la sección transversal de los especímenes para ver porosidades y vacíos. a) Sin tratamiento térmico. b) Con tratamiento térmico de 175°C por 6 horas.

Por otro lado, en la Figura 3.1 (b) se muestra una micrografía de la misma porción de sección transversal, pero de un espécimen con tratamiento térmico, en la cual se pueden identificar los mismos tipos de vacíos presentes en los individuos sin tratamiento térmico, sin embargo, se observa una evidente disminución en cantidad y tamaño de las porosidades. Se observa que los vacíos que se generan entre las interfaces prácticamente desaparecen, a excepción de aquellos vacíos que originalmente presentaban un gran tamaño, los cuales, al no tener mucha disponibilidad de material

en las capas contiguas, no alcanzan a ser llenados. Dado que las porosidades disminuyen, las capas se cohesionan de mejor manera, generando interfaces más fuertes (Wang et al., 2021). En algunos casos se observa una infiltración de las capas superiores de Onyx en las capas de fibra de vidrio.

3.1. Flexión cuasi-estática

Las curvas de esfuerzo-deformación promedio obtenidas de los ensayos realizados bajo flexión cuasi-estática con 3 puntos de apoyo para ambos grupos de especímenes se muestran en la Figura 3.2. Se presenta un aumento del 70% en el esfuerzo máximo para los especímenes con tratamiento térmico. Este incremento se atribuye a la disminución de vacíos y porosidades como se describe en el artículo de Wang et al (2021).

Además, la rigidez se ve acrecentada en un 40% con respecto a los especímenes sin tratamiento térmico, esto se atribuye a la cristalización que se produce en el Nylon que contiene el filamento Onyx, obteniéndose una matriz más rígida y endurecida, incluso se obtuvo un aumento del 20% en la deformación máxima promedio a la falla, a pesar de tener un endurecimiento de la matriz.

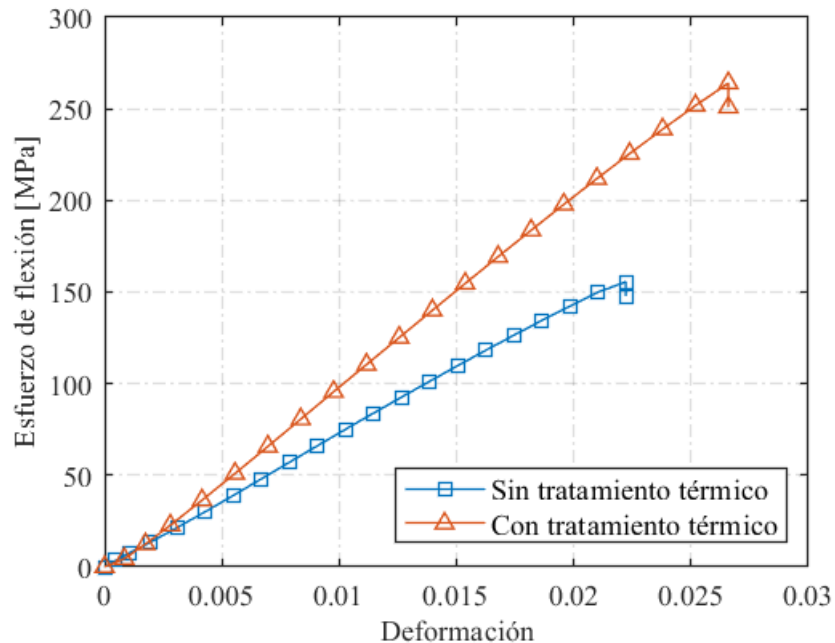


Figura 3.2 Curvas de esfuerzo-deformación bajo flexión de 3 puntos.

Las propiedades mecánicas obtenidas de los cuatro ensayos de cada grupo se adjuntan en la Tabla 3.2, donde se puede notar que los resultados para el grupo sin tratamiento térmico presento un 3.6% de variación en el esfuerzo máximo, mientras que en los especímenes sometidos a tratamiento térmico la variación fue de un 14.8%. Esto también se ve en sus modos de falla, ya que el modo de falla de las probetas sin tratamiento térmico fue el mismo para todas, sin embargo, para las probetas con tratamiento térmico algunas fallaron por compresión en la superficie superior y otras por tracción en la superficie inferior, mostrando una ruptura catastrófica de la matriz, con separación de la fibra. Lo que puede indicar que el tratamiento térmico a 175° C por 6 horas produce un aumento en las propiedades mecánicas, eso sí, genera mayor incertidumbre en el modo de falla del elemento.

Tabla 3.2. Resultados de propiedades en flexión para ensayos cuasi-estáticos.

Muestras	Esfuerzo máximo [MPa]	Deformación máxima	Modulo Elástico [GPa]
Sin tratamiento térmico	155.54 ± 5.50	2.22e-2 ± 7.58e-4	7.56 ± 0.19
Con tratamiento térmico	264.09 ± 39.28	2.66e-2 ± 4.20e-3	10.59 ± 163.95

3.2. Ensayos de fatiga en flexión

En la Tabla 3.3 se adjuntan los datos de vida a la fatiga obtenidos de los ensayos realizados para el grupo de especímenes sin tratamiento térmico, ordenados ascendentemente para los 5 especímenes testeados en cada nivel de carga.

Tabla 3.3. Datos de vida a la fatiga obtenidos para cada nivel de carga ensayado

Nivel de carga	90%	70%	50%				
Carga [N]	303.3-30.3	571-57.1	240.0-24.0	400-40	168.5-16.8	285.5-28.5	
	S.T.T	T.T	S.T.T	T.T	S.T.T	T.T	S.T.T= Sin
Ciclos	1	1	164	2	2204	13235	tratamiento
	6	1	1108	5	5615	14667	térmico
	11	1	4832	603	16061	16192	T.T= Con
	19	1	25747	3917	108128	43603	tratamiento
	6738	128	26921	6624	1038169	48791	térmico

Los resultados de los ensayos de fatiga arrojan en una primera instancia que la vida a la fatiga en flexión disminuye en todos los niveles de carga para el grupo de probetas sometidas a tratamiento térmico. Esta disminución en la vida a la fatiga se atribuye a la degradación térmica que sufre el nylon y los polímeros presentes en el compuesto (Dong & Gijsman, 2010), esta degradación representa un deterioro molecular producto de la temperatura, la cual genera un aumento en la fragilidad y disminución de la ductilidad.

Analizando las imágenes de los especímenes fallados, se tiene en la Figura 3.3 a) las probetas sin tratamiento térmico, las que presentaron el mismo modo de falla; compresión (buckling) de la matriz, esto produce que las fibras dejen de soportar las cargas. Durante la falla se observó una alta deformación de los especímenes, sin llegar a romperse la matriz, evidenciando la alta ductilidad del Onyx sin tratamiento térmico.

Se puede notar en la Figura 3.3 b), que los modos de falla en los especímenes con tratamiento térmico, a diferencia de los especímenes sin tratamiento térmico, comprenden ruptura de matriz y desprendimiento de fibras, las que se observaron sin notorios daños en la mayoría de los casos. En ningún caso se observó una matriz dúctil, ni compresión (buckling) de ésta. Estas fallas se dieron de manera súbita y repentina, lo que es característico en materiales frágiles. Lo anterior indica que la causa de la disminución de vida a la fatiga es producto de la degradación térmica sufrida por la matriz, la que provoca que falle prematuramente.

No se identifica ningún patrón de influencia del nivel de carga en la variación de los resultados, sin embargo, en el artículo de Pertuz et al (2020), el grupo de especímenes que presenta mayor dispersión de vida a la fatiga, es el que posee una mayor cantidad de volumen de fibra. Esto refuerza la idea que el aumento en la variación de los datos para el grupo sin tratamiento térmico se atribuye a la gran cantidad de vacíos y porosidades que presentan los individuos de este grupo, los cuales pueden generar distintos mecanismos de falla microestructurales, que derivan en una dispersión estadística de la vida a la fatiga.

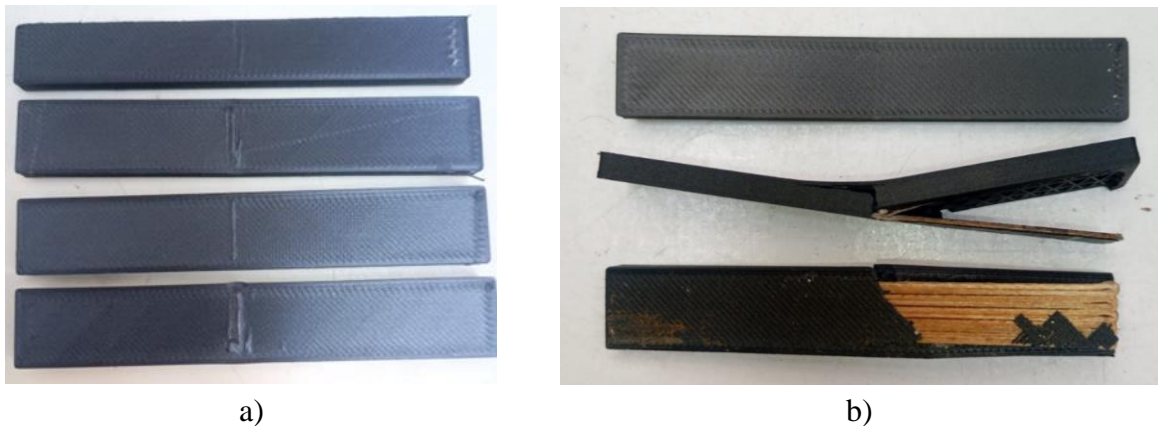


Figura 3.3 Falla de especímenes sometidos a fatiga en flexión. a) Grupo sin tratamiento térmico. b) Grupo con tratamiento térmico.

Se analiza, además, la historia de deformación en los especímenes durante su vida a la fatiga, con el propósito de conocer que sucede con la rigidez e identificar los eventos de falla. Para el análisis se utiliza el nivel de carga de 70% y 50% para el grupo sin tratamiento térmico y con tratamiento térmico respectivamente, ya que son los conjuntos de vida más homogéneos y de número de ciclo similares. Se debe mencionar que la máquina solo guarda los datos de deformación hasta aproximadamente los 18,000 ciclos, después de este valor, se guarda el último dato del ensayo.

En la Figura 3.4 se presentan los ciclos de vida versus la deformación para ambos grupos. Se detecta una diferencia notable en la historia de deformación entre los grupos, la cual se manifiesta en la rigidez de los especímenes. En el grupo con tratamiento térmico la rigidez de las probetas varía muy poco, menor al 30%, mientras que para el grupo sin tratamiento térmico se registran disminuciones del 300% en la rigidez, lo anterior refuerza la hipótesis sobre la poca capacidad que tiene la matriz para soportar la deformación cíclica producto de la degradación por la aplicación de alta temperatura (Dong & Gijssman, 2010).

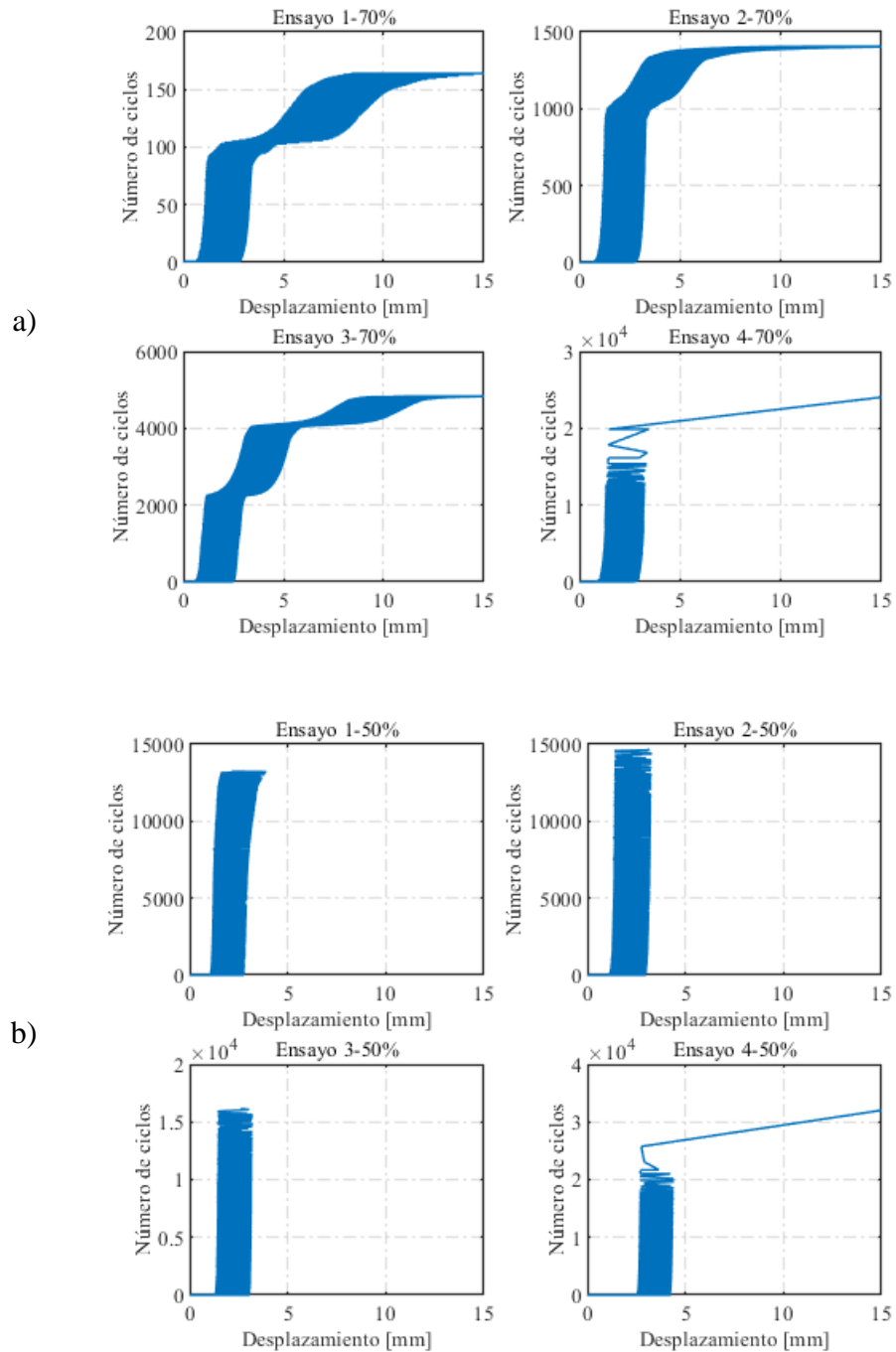


Figura 3.4 Historia de deformación durante vida a la fatiga. a) Ensayos a 70% de carga en especímenes sin tratamiento térmico. b) Ensayos a 50% de carga en especímenes con tratamiento térmico.

Se identifican patrones que se repiten en todos los ensayos del grupo sin tratamiento térmico, como, por ejemplo, que en un inicio se produce una pequeña reducción de rigidez en todos los especímenes, en los primeros ciclos de vida. Luego, se mantiene una rigidez aproximadamente

constante, hasta alcanzar algún evento que produce una reducción drástica de rigidez y eventualmente la falla. Se definieron 3 etapas fundamentales en la vida a la fatiga de los especímenes sin tratamiento térmico, estas 3 etapas pueden variar en su duración u otros aspectos, sin embargo, se presentan en todos los especímenes. En la Figura 3.5 se muestran las distintas etapas identificadas en la vida a la fatiga de las muestras sin tratamiento térmico.

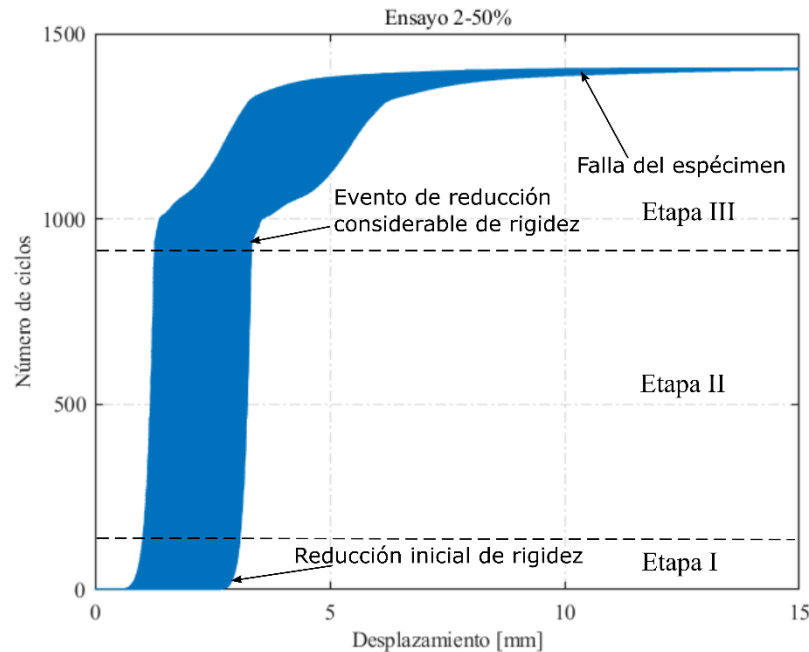


Figura 3.5 Etapas identificadas en la vida a la fatiga en flexión de especímenes de Onyx reforzado con fibra de vidrio sin tratamiento térmico.

La primera etapa se da lugar en los primeros ciclos de vida de los individuos, no se identifica un número preciso de ciclos, ya que varía entre pruebas. Esta etapa se caracteriza por presentar una reducción de rigidez del orden del 10% aproximadamente. Esta reducción de rigidez se atribuye al daño que se produce típicamente en materiales compuestos durante su exposición a las cargas cíclicas (Bryan Harris, 2003), este daño obedece a mecanismos que ocurren a nivel microestructural en el material, como lo son: rotura de fibras, formaciones de grietas, roturas interfaz fibra-matriz, agrietamiento de la matriz o delaminaciones.

Luego, se da lugar a la segunda etapa, la que concentra el mayor porcentaje de tiempo de vida del espécimen. En esta etapa no existe una reducción notoria en la rigidez lo que la hace prácticamente constante. Se puede decir que la segunda etapa contempla el periodo de vida que el elemento está sometido a las cargas sin presentar ningún mecanismo de falla.

Finalmente la tercera y última etapa comienza cuando existe un evento que provoca una reducción drástica de la rigidez del espécimen. Este evento puede ser una delaminación, ruptura de matriz u otro mecanismo de falla. En algunas ocasiones se identifica más de un evento de reducción de rigidez, lo que provoca un escalonamiento del gráfico de ciclos-deformación hasta la eventual falla del

espécimen, como sucede en el gráfico del ensayo 3, en la Figura 3.5 a). Para el grupo con tratamiento térmico se observa que la rigidez se mantiene prácticamente constante hasta una falla súbita.

3.3. Distribución Weibull y curvas de confianza

A continuación, en la Tabla 3.4 se muestran los parámetros obtenidos de la distribución Weibull para cada grupo de datos, utilizando el método de Máxima verosimilitud. También se adicionan los valores de TMAF (tiempo medio a la falla), Desviación estándar y Coeficiente de variación Weibull.

Tabla 3.4. Parámetros y valores determinados de la distribución Weibull para cada nivel de carga.

% Carga		α	β	Media Weibull	Desviación estándar	C.V
90%	Sin T.T	123.77	0.2988	1166.04	6357.52	5.45
	Con T.T	7.8531	0.4351	21.03	57.72	2.74
70%	Sin T.T	9075.65	0.6535	12325.05	19527.78	1.58
	Con T.T	877.24	0.3746	3530.29	12399.9	3.51
50%	Sin T.T	137457.51	0.3675	587268.92	2133434.51	3.63
	Con T.T	31019.8	1.8965	27527.5	15095	0.55

Los valores obtenidos de los parámetros de la distribución Weibull fueron validados en los softwares Minitab y Matlab. Al analizar los resultados, se evidencia que, la vida a la fatiga para los grupos con tratamiento térmico disminuye en todos los niveles de carga, también se observa que, para todos los grupos, excepto el grupo con tratamiento térmico a 50% de carga, se obtiene un parámetro de forma β menor que 1, esto es un indicador de falla temprana de los especímenes, es decir, mortandad infantil. Además, un parámetro de forma inferior a 1, representa una tasa de riesgo decreciente en el tiempo, por lo tanto, los especímenes que superen una falla temprana lograrán una vida mucho mayor en comparación a los individuos que fallaron temprano de su mismo nivel de carga, como se puede apreciar en los datos de la Tabla 3.2

En la Figura 3.6 se grafican las curvas de confianza obtenidas de ambos grupos estudiados, para la probabilidad de falla P_{50} , utilizando la función potencia de la ecuación 18. Se adjuntan los valores obtenidos para los parámetros a y b en la Tabla 3.4

Tabla 3.5. Parámetros a y b de la Función potencia para cada grupo de prueba.

Parámetros	a	b
Grupo sin TT	76.52	-0.0504
Grupo con TT	120.31	-0.0747

Se observa que las curvas de ambos grupos mantienen la misma forma, lo que indica que el tratamiento térmico no afecta significativamente en la tasa de cambio de número de ciclos con respecto al nivel de carga. Sin embargo, se observa que existe una traslación en el eje horizontal entre las curvas, en particular esto representa que, para un mismo nivel de carga, el grupo sin tratamiento térmico presenta una mayor vida a la fatiga.

No se identifica ningún comportamiento asintótico de los datos de vida a la fatiga en el rango de carga estudiado. Se recomienda estudiar el comportamiento a la fatiga para niveles de carga más bajos, con el fin de determinar si existe algún nivel límite de carga que no genere falla en el material.

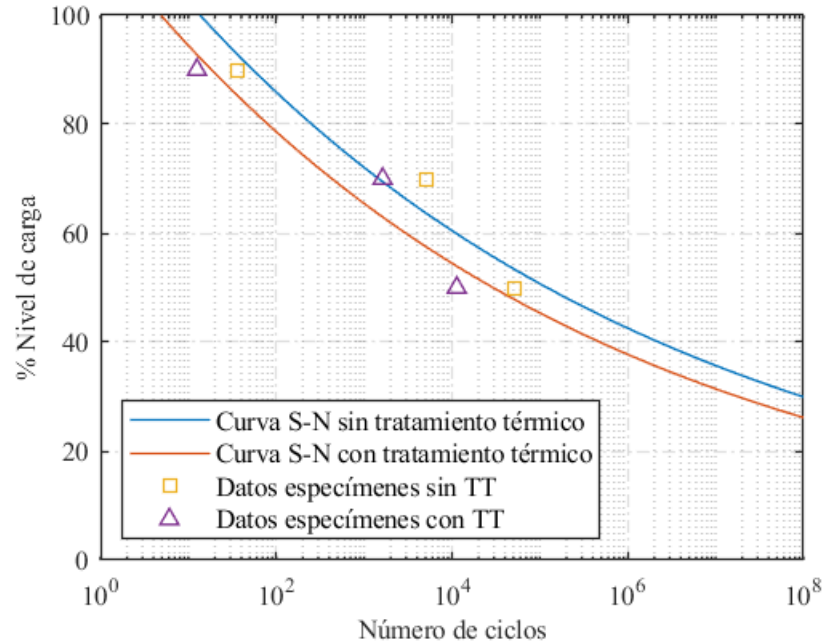


Figura 3.6 Curvas S-N de vida a la fatiga para confianza al 50%.

Finalmente, de las curvas S-N obtenidas para ambos grupos se concluye que la vida a la fatiga en flexión para compuestos de Onyx reforzados con fibra de vidrio impresos en 3D se ve disminuida en un factor de hasta 5 para los niveles de carga entre 90% y 70%. Esta disminución se atribuye a la degradación térmica sufrida por el Nylon del filamento Onyx, la que produce fallas tempranas en la matriz.

CAPÍTULO 4. Conclusiones

Esta investigación abarca el estudio del efecto de la aplicación de un tratamiento térmico de 175°C por 6 horas sobre la vida a la fatiga en flexión para los niveles de carga entre 90% y 50% a especímenes de Onyx reforzados con fibra de vidrio impresos en 3D, poniendo especial atención al efecto en los vacíos y porosidades que son inherentes al proceso de impresión 3D. A continuación, se exponen las principales conclusiones de la investigación.

Sobre los vacíos y porosidades se determina una reducción del 40.68% promedio producto del tratamiento térmico. Esta reducción de las porosidades se produce por el movimiento molecular que genera la aplicación de energía térmica al polímero, promoviendo la eliminación de vacíos y a su vez la cristalización de la estructura molecular.

El tratamiento térmico mejoro en un 70% el esfuerzo máximo promedio en los ensayos de flexión cuasi-estática. Esto se atribuye a la disminución de los vacíos y porosidades en el compuesto, creando una interfaz más fuerte entre matriz-fibra (Geng et al., 2018), permitiendo soportar mayores cargas. Por otro lado, el tratamiento térmico contribuyó en un aumento de la rigidez promedio del 40%, este aumento obedece a la cristalización que sufre el nylon presente en el filamento Onyx producto de la temperatura aplicada, rigidizando la pieza, pero también haciéndola más frágil.

Se concluye que el tratamiento térmico de 175°C por 6 horas reduce la vida a la fatiga para los compuestos de Onyx con fibra de vidrio impreso en 3D para todos los niveles de carga estudiados. Se observa que la falla en fatiga se produce en la matriz, de esta forma se asocia esta reducción a la degradación del Nylon producto de la alta temperatura, estando cerca del límite de 200°C donde existe aumento de porosidades y degradación en el artículo de (Wang et al., 2021).

Los especímenes sin tratamiento térmico presentan eventos de reducción de rigidez de hasta el 300% durante los ensayos de fatiga. Estos eventos se atribuyen a modos de falla que generan daño acumulado en el compuesto, provocando la falla final.

Como investigaciones futuras se recomienda estudiar la causa particular de estos eventos de reducción de rigidez durante los ensayos de fatiga de los especímenes, con la finalidad de conocer los modos de falla que se presentan a nivel microestructural en el compuesto y así poder disminuirlos. Por otro lado, aún se debe investigar la variación de la temperatura en los tratamientos térmicos y sus efectos sobre distintas propiedades mecánicas de los compuestos, con el objetivo de conocer los rangos de temperatura que optimizan cada propiedad.

Referencias

- Ali, Z., Yan, Y., Mei, H., Cheng, L., & Zhang, L. (2023). Effect of infill density, build direction and heat treatment on the tensile mechanical properties of 3D-printed carbon-fiber nylon composites. *Composite Structures*, 304(P1), 116370. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116370>
- Blok, L. G., Longana, M. L., Yu, H., & Woods, B. K. S. (2018). An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites. *Additive Manufacturing*, 22(May), 176–186. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.039>
- Bryan Harris. (2003). *Fatigue in Composites* (CRC PRESS).
- Díaz-Rodríguez, J. G., Pertúz-Comas, A. D., & González-Estrada, O. A. (2021). Mechanical properties for long fibre reinforced fused deposition manufactured composites. *Composites Part B: Engineering*, 211(October 2020). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108657>
- Dong, W., & Gijsman, P. (2010). Influence of temperature on the thermo-oxidative degradation of polyamide 6 films. *Polymer Degradation and Stability*, 95(6), 1054–1062. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2010.02.030>
- Fan, W., Dang, W., Liu, T., Li, J., Xue, L., Yuan, L., & Dong, J. (2019). Fatigue behavior of the 3D orthogonal carbon/glass fibers hybrid composite under three-point bending load. *Materials & Design*, 183, 108112. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2019.108112>
- Fernandes, R. R., Tamijani, A. Y., & Al-Haik, M. (2021). Mechanical characterization of additively manufactured fiber-reinforced composites. *Aerospace Science and Technology*, 113, 106653. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106653>
- Geng, P., Zhao, J., Wu, W., Wang, Y., Wang, B., Wang, S., & Li, G. (2018). *Effect of Thermal Processing and Heat Treatment Condition on 3D Printing PPS Properties*. <https://doi.org/10.3390/polym10080875>
- Hetrick, D. R., Sanei, S. H. R., & Ashour, O. (2022). Void Content Reduction in 3D Printed Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites through Temperature and Pressure Consolidation. *Journal of Composites Science*, 6(5). <https://doi.org/10.3390/jcs6050128>
- Kabir, S. M. F., Mathur, K., & Seyam, A. F. M. (2020). A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites: History, mechanism, materials and properties. *Composite Structures*, 232(September 2019), 111476. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111476>
- Kızılersü, A., Kreer, M., & Thomas, A. W. (2018). The Weibull distribution. In *Significance* (Vol. 15, Issue 2). <https://doi.org/10.1111/j.1740-9713.2018.01123.x>
- MarkForged. (2020). *No Title*. <https://markforged.com/>
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143(February), 172–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
- Ning, F., Cong, W., Qiu, J., Wei, J., & Wang, S. (2015). Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. *Composites Part B: Engineering*, 80. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.013>

- Nurashikin, S., & Hazizan, A. (2011). Journal of Composite Materials. *Journal of Composite Materials*, 46(2), 183–191. <https://doi.org/10.1106/002199803028680>
- Pertuz, A. D., Díaz-Cardona, S., & González-Estrada, O. A. (2020). Static and fatigue behaviour of continuous fibre reinforced thermoplastic composites manufactured by fused deposition modelling technique. *International Journal of Fatigue*, 130(July 2019), 105275. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105275>
- Prabhakar, P., Garcia, R., Imam, M. A., & Damodaran, V. (2020). Flexural fatigue life of woven carbon/vinyl ester composites under sea water saturation. *International Journal of Fatigue*, 137(November 2019), 105641. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105641>
- Reifsnider, K. . (1991). *Fatigue of Composite Materials: Volume 4 of Composite Materials Series: Vol. V*.
- Sakin, R., & Ay, I. (2008). Statistical analysis of bending fatigue life data using Weibull distribution in glass-fiber reinforced polyester composites. *Materials and Design*, 29(6), 1170–1181. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.05.005>
- Selmy, A. I., Azab, N. A., & Abd El-Baky, M. A. (2013). Flexural fatigue characteristics of two different types of glass fiber/epoxy polymeric composite laminates with statistical analysis. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 518–527. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2012.08.017>
- Song, W., Fan, W., Liu, T., Chen, X., Wang, S., Zhao, Y., Song, C., Mi, P., Dou, H., & Gao, X. (2021). Flexural fatigue properties and failure propagation of 3D stitched composites under 3-point bending loading. *International Journal of Fatigue*, 153(May), 106507. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106507>
- Wang, K., Long, H., Chen, Y., Baniassadi, M., Rao, Y., & Peng, Y. (2021). Heat-treatment effects on dimensional stability and mechanical properties of 3D printed continuous carbon fiber-reinforced composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 147(May), 106460. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106460>
- Zhuo, P., Li, S., Ashcroft, I. A., & Jones, A. I. (2021). Material extrusion additive manufacturing of continuous fibre reinforced polymer matrix composites: A review and outlook. *Composites Part B: Engineering*, 224, 109143. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2021.109143>