



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



**EFFECTOS DE LA DISTRIBUCIÓN DE FIBRA Y TRATAMIENTOS
TÉRMICOS EN EL COMPORTAMIENTO INTERLAMINAR DE
TERMOPLÁSTICOS REFORZADOS CON FIBRA CONTINUA IMPRESOS
EN 3D**

POR

Rodolfo Hernán Hermosilla Brito

Tesis de magíster presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Magíster en ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería Mecánica

Profesor Guía:
Dr. Carlos Andrés Medina Muñoz

Marzo 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

Agradezco mucho la ayuda de mi profesor guía, don Carlos Medina por ayudarme en la toma de decisiones y brindarme orientación en todo el desarrollo de esta tesis.

También quisiera agradecer a Benjamín Escudero, Don Mario, quien me ayudó en el taller mecánico, y Alexis Salas por ayudarme en la fabricación de las probetas y el desarrollo de los experimentos que realicé, ya que, aunque estuviesen trabajando en otros proyectos, se hicieron tiempo para poder brindarme apoyo en los ensayos, y sin ellos no los podría haber hecho.

También agradezco el constante apoyo personal que me han brindado mis padres y hermana, quienes siempre confiaron en mí y me dieron la motivación de levantarme todos los días a trabajar en esta Tesis.

Finalmente, agradecer a mis amigos cercanos, quienes me acompañaron no sólo durante el trabajo de esta Tesis, sino que en gran parte de mi carrera universitaria.

Gracias a estas personas me he convertido en un buen profesional, y también en una buena persona.

Resumen

Los materiales compuestos reforzados con fibra continua impresos en 3D corresponden a una tecnología en desarrollo, los cuales, si bien cuentan con las propiedades de objetos fabricados en 3D, y materiales compuestos, también tienen ciertas desventajas, donde la principal corresponde a la cantidad de vacíos que se generan. Estos vacíos, de acuerdo con la literatura, afectan a las propiedades mecánicas tanto en el plano como fuera del plano. Sin embargo, se pueden reducir variando la distribución de refuerzo continuo, y realizando tratamientos térmicos.

En el presente trabajo se realizan ensayos mecánicos para evaluar 3 diferentes laminados, los cuales corresponden al caso en que hay 1 capa de refuerzo seguida de 1 capa de matriz, al caso en el que hay 2 capas de refuerzo y 2 capas de matriz, y al caso en el que hay 3 capas de refuerzo y de 3 de matriz. También se realizan tratamientos térmicos, los cuales consisten en exponer probetas a temperaturas de 100, 150, 175, y 200 °C durante 1, 3, 6 y 8 horas para cada temperatura, mediante un horno eléctrico tubular. Se analizan los cambios de masa, cambios dimensionales, y se analizan los vacíos mediante la toma de micrografías para los diferentes casos.

La metodología utilizada consiste en que en primera instancia se definen los tipos de distribuciones de refuerzos de fibra mediante una extensa revisión de la literatura, luego se realizan los ensayos definidos, después se analizan estos resultados para seleccionar el mejor laminado, y finalmente se definen y realizan los tratamientos térmicos a las horas y temperaturas señaladas.

Los ensayos mecánicos realizados corresponden al ensayo de tracción fuera del plano, compresión fuera del plano, y flexión de viga corta, obteniendo los mejores resultados con el caso de 3 capas de refuerzo seguidas de 3 capas de matriz, con una resistencia a la tracción interlaminar de 9.10 MPa, resistencia al corte interlaminar de 19.27 MPa y resistencia a la fluencia en compresión fuera del plano de 38.36 MPa.

Se obtiene que el mejor caso corresponde al de 175°C durante 6 horas, generando un aumento de 145% en el ensayo de flexión de viga corta con respecto al caso con el laminado más desfavorable y sin tratamiento térmico. Se observa que a medida que aumentan las horas y las temperaturas se genera una mayor disminución de masa, llegando hasta una disminución del 3.35%, y también se observa una variación dimensional despreciable en todos los casos. Las micrografías observadas muestran una disminución del 5% en los vacíos, con respecto a las probetas sin tratamiento térmico y también una disminución visible en los bordes de las probetas debido al tratamiento térmico.

Palabras clave: Markforged, Tratamiento térmico, Distribución de refuerzos, propiedades interlaminares.

Abstract

3D printed continuous fiber reinforced composite materials correspond to a developing technology, which, although they have the properties of 3D manufactured objects, and composite materials, also have certain disadvantages, where the main one corresponds to the number of voids that are generated. These voids, according to the literature, emerge to both in-plane and out-of-plane mechanical properties. However, they can be reduced by varying the distribution of continuous reinforcement, and by performing heat treatments.

In the present work, mechanical tests were carried out to evaluate 3 different laminates, which correspond to the case in which there is 1 reinforcement layer followed by 1 matrix layer, to the case in which there are 2 reinforcement layers and 2 matrix layers, and to the case where there are 3 reinforcement layers and 3 matrix layers. Thermal treatments are also carried out, which consist of exposing specimens to temperatures of 100, 150, 175, and 200 °C for 1, 3, 6, and 8 hours for each temperature, using a tubular electric furnace. Mass changes, dimensional changes, and voids are analyzed by taking micrographs for the different cases.

The methodology used consists of firstly defining the types of fiber reinforcement distributions through an extensive review of the literature, then carrying out the defined tests, then analyzing these results to select the best laminate, and finally defining and perform heat treatments at the times and temperatures indicated.

The mechanical tests carried out correspond to the out-of-plane tensile test, out-of-plane compression, and short beam bending, obtaining the best results with the case of 3 layers of reinforcement followed by 3 layers of matrix, with an interlaminar tensile strength of 9.10 MPa, interlaminar shear strength of 19.27 MPa and yield strength in out-of-plane compression of 38.36 MPa.

It is obtained that the best case corresponds to 175°C for 6 hours, discovering an increase of 145% in the short beam bending test with respect to the case with the most unfavorable laminate and without heat treatment. It is observed that as the hours and temperatures increase, a greater decrease in mass is generated, reaching a decrease of 3.35%, and a negligible dimensional variation is also observed in all cases. The observed micrographs show a 9% decrease in voids, with respect to the specimens without heat treatment and a visible decrease in the edges of the specimens due to heat treatment.

Keywords: Markforged, Heat treatment, Reinforcements distribution, Interlaminar properties.

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos.....	vi
Lista de Tablas	vii
Lista de Figuras	viii
NOMENCLATURA	x
1 CAPÍTULO 1: Introducción y Estado del arte.....	1
1.1 Contexto.....	1
1.2 Estado del arte	2
2 CAPÍTULO 2: Hipótesis, objetivos y metodología	11
2.1 Hipótesis	11
2.2 Objetivos.....	11
2.3 Metodología.....	12
3 CAPÍTULO 3: Procedimientos experimentales	14
3.1 Ensayos con variación de distribución de los refuerzos	14
3.2 Ensayos con tratamientos térmicos.....	20
4 CAPÍTULO 4: Resultados y discusiones	22
4.1 Distribución de refuerzos de fibra continua	22
4.2 Tratamientos térmicos	29
5 CAPÍTULO 5: Conclusiones	36
5.1 Con respecto a la hipótesis	36
5.2 Con respecto a los objetivos	36
5.3 Trabajos futuros	38
Referencias	39

Lista de Tablas

Tabla 1.1: Comparación de 2 tipos de refuerzo junto con propiedades mecánicas normalizadas (o ponderadas) a un volumen de fibra de 15%. Fuente: Block et al. (2018).	3
Tabla 1.2: Resultados ILSS para 3 diferentes especímenes. Fuente: Fernandes et al. (2021)	8
Tabla 4.1: Resultados del ensayo de tracción fuera del plano	23
Tabla 4.2: Parámetros calculados para cada caso en estudio.	24
Tabla 4.3: Esfuerzo cortante interlaminar máximo para cada caso.....	28
Tabla 4.4: Valores máximos de resistencia al corte interlaminar.	32
Tabla 4.5: Porcentajes de vacíos calculados con el software ImageJ	34

Lista de Figuras

Figura 1.1: Impresora Markforged MarkTwo. Fuente: Markforged (http://markforged.com).	2
Figura 1.2: Falla en tracción. Probeta rectangular y huesoforme. Fuente: Pyl et al. (2018).	3
Figura 1.3: Vacíos encontrados en probetas de a) 6 capas de fibra de carbono y b) 2 capas de fibra de carbono. Fuente: Klift et al. (2016)).	4
Figura 1.4: Análisis microscópico de filamentos de Nylon con fibra de carbono proporcionados por empresa MarkForged. Fuente: Block et al. (2018).	5
Figura 1.5: Diferentes casos ensayados en compresión. Fuente: Araya et al. (2018)	6
Figura 1.6: Micrografías de especímenes de compresión. A y B muestran un apilamiento consecutivo de fibras. C y D muestran una distribución equidistante. Fuente: Araya et al. (2018).	6
Figura 1.7: Diferentes configuraciones de distribución de refuerzo para ensayo ILSS. Fuente: Caminero et al. (2018).	7
Figura 1.8: Esfuerzo v/s desp. para 3 diferentes especímenes. Fuente: Fernandes et al. (2021)	8
Figura 1.9: Diferentes configuraciones de distribución de refuerzo para ensayo ILSS, acompañadas de sus respectivas micrografías. Fuente: Yavas et al. (2021).	8
Figura 1.10: Resultados del ensayo ILSS para diferentes apilamientos. Fuente: Yavas et al. (2021).	9
Figura 1.11: (a) Evolución del contenido de porosidad. (b) Probeta tratada a 70°C. (c) Probeta tratada a 130°C. Fuente: Pascual-Gonzales et al. (2021).	10
Figura 2.1: Carta Gantt.	13
Figura 3.1: Distribución de refuerzo en 3 casos a probar.	15
Figura 3.2: Esquema de aplicación de fuerzas	16
Figura 3.3: Geometría utilizada en los ensayos de tracción fuera del plano	16
Figura 3.4: Esquema de caso sin reducción de diámetro v/s caso con reducción de diámetro.	17
Figura 3.5: Probetas montadas en la máquina de ensayos	17
Figura 3.6: Geometría a utilizar en el ensayo de compresión fuera del plano.	18
Figura 3.7: Detalle de cálculo de esfuerzo de fluencia.	18
Figura 3.8: Geometría a utilizar en el ensayo de corte interlaminar (ILSS).	19
Figura 3.9: 1. Esquema de aplicación de la carga de corte interlaminar. 2. Probeta montada en la máquina de ensayos Zwick Roell Z005.	19
Figura 3.10: Diagrama explicativo de definición de segmento para definir escala.	21
Figura 4.1: Curvas de esfuerzo v/s deformación para el ensayo de tracción fuera del plano.	22
Figura 4.2: Modo de falla de las probetas del ensayo de tracción fuera del plano.	23
Figura 4.3: Resultados promedio para los ensayos de Compresión fuera del plano.	24
Figura 4.4: Fallas de probetas debido a compresión interlaminar. A la izquierda el caso full fibra. A la derecha el caso 1O1F.	25
Figura 4.5: Especímenes ensayados en compresión interlaminar.	26
Figura 4.6: Curvas de Esfuerzo v/s desplazamiento para el ensayo de Flexión de viga corta	27
Figura 4.7: Gráfico comparativo de máximos valores obtenidos en el ensayo de Flexión de viga corta	27
Figura 4.8: Modos de falla del ensayo de flexión de viga corta.	28

Figura 4.9: Resultados de flexión de viga corta para probetas tratadas a 100°C	30
Figura 4.10: Resultados de flexión de viga corta para probetas tratadas a 150°C	30
Figura 4.11: Resultados de flexión de viga corta para probetas tratadas a 175°C	31
Figura 4.12: Probetas tratadas térmicamente a 200°C durante 1h.	31
Figura 4.13: Curvas con mayor resistencia al corte interlaminar para cada temperatura de tratamiento térmico.....	32
Figura 4.14: Variación porcentual de masa para las diferentes temperaturas para las diferentes horas de tratamiento.....	33
Figura 4.15: Distorsión geométrica a diferentes temperaturas. Fuente: Pascual-Gonzales et al. (2021).	34

NOMENCLATURA

Acrónimos

<i>FFF</i>	: Fused filament fabrication (Fabricación por filament fundido)
<i>AM</i>	: Additive manufacturing (Manufactura aditiva)
<i>F RTP</i>	: Fiber-reinforced thermoplastic (termoplástico reforzado con fibra)
<i>CF RTP</i>	: Carbon Fiber-reinforced thermoplastic (termoplástico reforzado con fibra de carbono)
<i>101F</i>	: Caso de distribución de carga 1 capa de Onyx seguida de 1 capa de fibra.
<i>202F</i>	: Caso de distribución de carga 2 capa de Onyx seguida de 2 capa de fibra.
<i>303F</i>	: Caso de distribución de carga 3 capa de Onyx seguida de 3 capa de fibra.
<i>FF</i>	: Caso de distribución de carga “Full fibra”
<i>TFP</i>	: Tracción fuera del plano
<i>CFP</i>	: Compresión fuera del plano
<i>FVC</i>	: Flexión de viga corta
<i>ILSS</i>	: Interlaminar Shear Strength (resistencia al corte interlaminar)

CAPÍTULO 1: Introducción y Estado del arte

1.1 Contexto

En la última década ha habido un gran aumento en el interés y desarrollo de los materiales compuestos debido a sus particulares características, ya que muestran una excepcional resistencia mecánica y térmica a alta temperatura (hasta 200°C); materiales con fibra de carbono y fibra de vidrio presentan excelente resistencia de tracción y compresión, y tienen aplicaciones en diversas industrias como por ejemplo embalaje, construcción, aviación, deportes, biomedicina; y existe una gran variedad de aplicaciones en componentes termomecánicos y aeroespaciales (Rajak et al., (2019), Fleischer et al., (2018) y Hsissou et al., (2021)).

Fleischer et al., (2018) plantean que existen diferentes procesos de fabricación de materiales compuestos, como por ejemplo moldeo por compresión, disposición manual, autoclave, moldeo por inyección, entre otros. El problema de estos procesos es que no son automáticos y en la mayoría de los casos requieren láminas pre impregnadas para la fabricación de las piezas, y no se tiene mucha libertad de ordenamiento de las fibras en el material, ya que, si bien se pueden fabricar diferentes laminados y variar las orientaciones de fibra, estas orientaciones son con fibras rectas, y es bastante complejo fabricar laminados con fibras curvas.

Por otro lado, de acuerdo con Yaragatti N., & Patnaik, A. (2020), la industria de la impresión 3D ha presentado un gran crecimiento desde sus inicios en los 1980s, logrando hoy en día un tamaño de mercado que, considerando las máquinas de impresión 3D y los productos, software y servicios relacionados, tuvo un valor de US \$15.8 mil millones en el 2020, con un crecimiento estimado de hasta US \$25.6 mil millones para 2024.

Dentro de todos los avances realizados en la industria de la impresión 3D, está la impresión de materiales compuestos de fibra continua, la cual es lograda utilizando dos tipos diferentes de filamento para obtener materiales con este tipo de refuerzo. Esto permite la manufactura de materiales compuestos con geometrías complejas, y procesos automatizados, características que no tienen los procesos de fabricación convencionales.

La empresa Markforged, fundada el año 2015, fabrica impresoras capaces de imprimir materiales compuestos reforzados con fibra continua. Esto mediante el uso de filamentos termoplásticos como matriz, los cuales pueden ser Nylon, que corresponde a poliamida 6, u Onyx, que es Nylon con fibras cortas de carbono; y filamentos de fibra continua de refuerzo, que puede ser fibra de vidrio, fibra de vidrio de alta resistencia, fibra de carbono y kevlar. Cabe destacar que los filamentos de refuerzo de fibra son una mezcla de fibra y un material termoplástico, esto para mejorar la adhesión entre fibra y matriz.

Actualmente, la facultad cuenta con la impresora Markforged MarkTwo, mostrada en la Figura 1, la cual puede fabricar piezas con las matrices y fibras ya mencionadas.

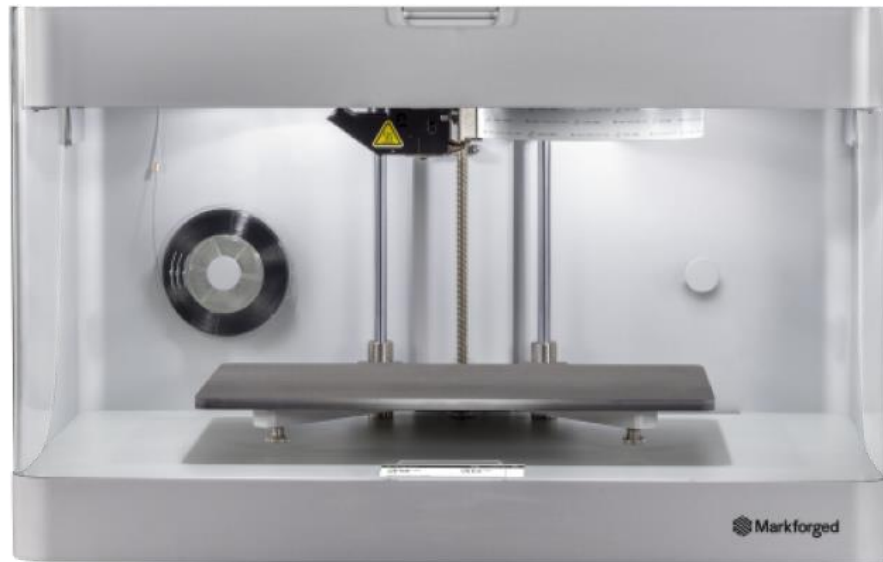


Figura 1.1: Impresora Markforged MarkTwo. Fuente: Markforged (<http://markforged.com>).

1.2 Estado del arte

En la presente sección se abordan temáticas relacionadas con los estudios mecánicos de los materiales compuestos impresos en 3D reforzados con fibra continua, tanto en el plano como fuera del plano, se comentan las desventajas observadas por la literatura, y cómo influyen la distribución de los refuerzos y tratamientos térmicos en éstas.

1.2.1 Estudios de propiedades mecánicas en el plano de materiales compuestos impresos en 3D

En la literatura existen diversos estudios relacionados con la caracterización mecánica de piezas fabricadas por la impresora Markforged Marktwo (o su antecesora, la Markforged MarkOne), donde en la mayoría de los casos se utiliza Nylon con fibra de carbono.

Un ejemplo es Blok et al. (2018), quienes realizaron ensayos de tracción, flexión y corte en probetas de Nylon con fibra continua de carbono, impresas en la Markforged MarkTwo, y compararon los resultados con probetas de Nylon con fibras cortas de carbono (1 solo filamento). Sus resultados se muestran en la Tabla 1. Se observa que, a pesar de la alta porosidad, cantidad de vacíos, y limitada cantidad de volumen de fibra que se comentaba anteriormente, las piezas de materiales compuestos impresos en 3D, al llevar refuerzos de fibra continua generan mayor resistencia mecánica y mayor módulo elástico que una pieza que no los lleva.

Este comportamiento de resistencia ha sido estudiado por otros autores, como por ejemplo Justo et al. (2018), quienes realizaron una caracterización de probetas impresas en 3D reforzadas con fibra de

vidrio y Nylon, abarcando ensayos de tracción, compresión (a 0° y 90°) y corte en el plano, obteniendo valores de resistencia de tracción y compresión de 574.58 MPa y 82.00 MPa, en el caso de 0°, y de 9.84 [MPa] y 12.73 [MPa] en el caso de 90°, respectivamente, y resistencia al corte de 67.77 [MPa].

Tabla 1.1: Comparación de 2 tipos de refuerzo junto con propiedades mecánicas normalizadas (o ponderadas) a un volumen de fibra de 15%. Fuente: Block et al. (2018).

	Nylon con fibra corta de carbono (Onyx)		Nylon con fibra continua de carbono	
Volumen de fibra [%]	6		27	
Porosidad [%]	1.1		9	
	Medido	Normalizado (V_f 15%)	Medido	Normalizado (V_f 15%)
Módulo elástico [GPa]	1.85	4.6	62.5	34.4
Resistencia tracción [MPa]	33.5	83.8	968	532.4
Módulo de flexión [GPa]	3	7.5	41.6	22.9
Resistencia flexión [MPa]	55.3	138.3	485	266.8
Módulo corte [GPa]	0.31	0.8	2.26	1.2
Resistencia corte [MPa]	19	47.5	31.16	17.1

Otro ejemplo que se destaca es el estudio realizado por Goh G. D. et al. (2018), donde también realizan una caracterización de probetas de fibras de carbono con Nylon, obteniendo un esfuerzo de ruptura de 600 MPa (std = ±60 MPa).

Pyl et al. (2018) evidenciaron de forma experimental que al ensayar en tracción diferentes tipos de probetas, entre ellas, huesoformes y rectangulares, las probetas rectangulares tienen mejor desempeño que las probetas en forma de hueso, ya que éstas últimas, al tener una geometría más compleja, fallan en las zonas curvas, a diferencia de las probetas rectangulares, que fallan de forma longitudinal, como se muestra en la Figura 1.2.

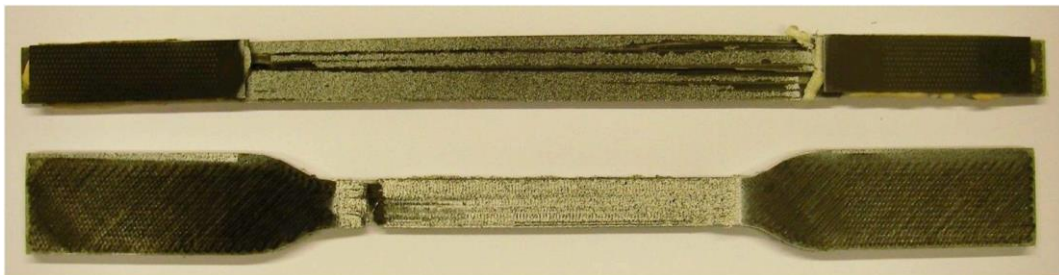


Figura 1.2: Falla en tracción. Probeta rectangular y huesoforme. Fuente: Pyl et al. (2018).

1.2.2 La porosidad

La porosidad es un parámetro que en la literatura se mide mediante micrografías realizadas en las probetas, y se calcula como el porcentaje de vacíos que existen en éstas. Actualmente no existen ecuaciones que relacionen este parámetro con el comportamiento mecánico de las probetas.

Teniendo en mente lo anterior, el hecho mostrado por Pyl et al. (2018) de que las probetas con geometría más compleja fallen en zonas cercanas a las curvas es atribuido por estos autores a la cantidad de vacíos y porosidades que se generan en éstas. Este comportamiento se ha evidenciado en años anteriores por diversos autores mencionados a continuación.

Klift et al. (2016) realizaron análisis microscópicos a probetas de Fibra de carbono con Nylon, encontrando una gran cantidad de porosidad y vacíos en muestras de 2 y 6 capas de fibra carbono, como se muestra en la Figura 1.3.

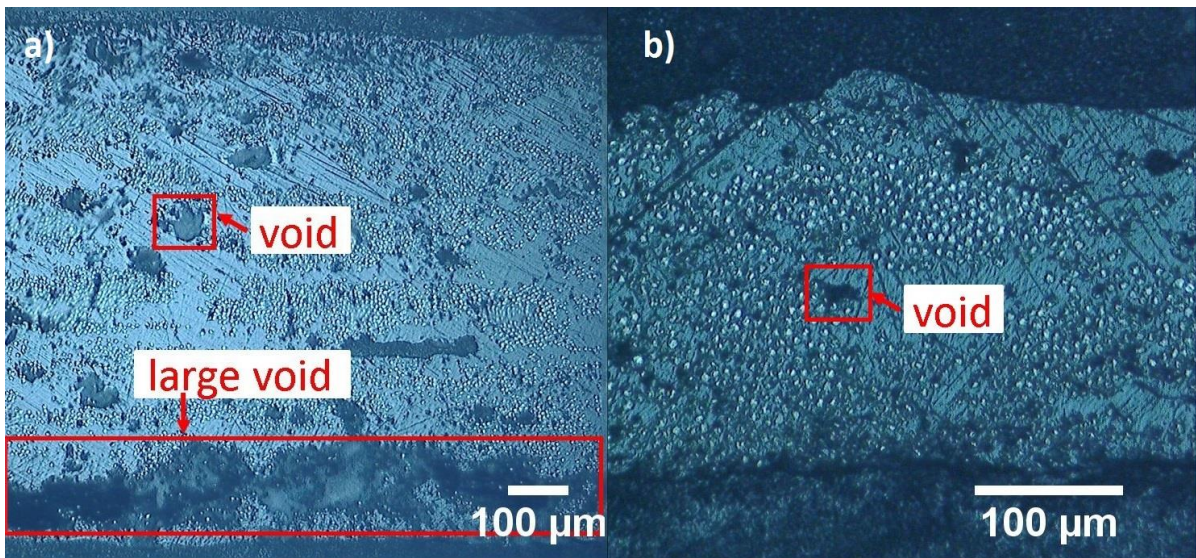


Figura 1.3: Vacíos encontrados en probetas de a) 6 capas de fibra de carbono y b) 2 capas de fibra de carbono. Fuente: Klift et al. (2016).

Esta cualidad de las piezas fabricadas con manufactura aditiva de materiales compuestos es destacada por diversos autores como Blok et al. (2018), Kavir et al., (2020) y Goh G. D. et al. (2018), coincidiendo en que estas piezas cuentan con alta porosidad y vacíos, perjudicando las propiedades mecánicas. Block et al. (2018) utilizaron microscopía óptica en un filamento antes de imprimir, como se muestra en la Figura 1.4, y midieron el volumen de fibra de éste, obteniendo un valor del 20%. Sin embargo, señalan que este valor no es constante a lo largo del filamento, lo cual implica que la existencia de vacíos y porosidades provienen de éste, y no necesariamente se generan en el proceso de fabricación en sí. Este valor de volumen de fibra en el filamento ha sido estudiado por otros autores, como Fernandes et al. (2021) obteniendo 30% utilizando la misma metodología, lo cual, al ser un valor diferente al obtenido por Blok et al. (2018), refuerza de idea de que la distribución de fibra en el filamento no es constante.

El hecho de que el volumen de fibra sea del 20-30% en el filamento implica un límite en el volumen de fibra de las piezas finales. De acuerdo con Pascual et al. (2020), quienes estudiaron las fibras y resinas utilizadas en la impresión 3D, los filamentos de impresión con fibra continua son porosos ya que presentan hasta 8% de tendencia de absorción de agua del ambiente, y tienen secciones transversales heterogéneas, donde se encuentran zonas ricas en polímero y zonas ricas en fibra.

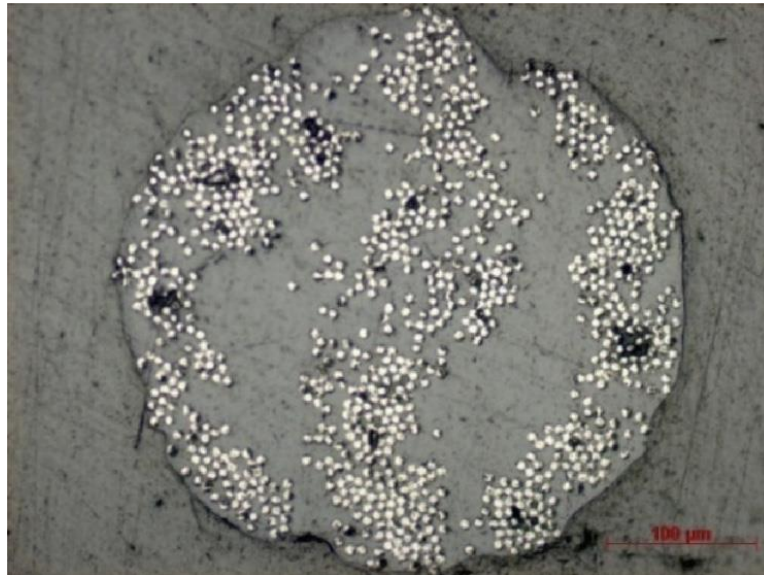


Figura 1.4: Análisis microscópico de filamentos de Nylon con fibra de carbono proporcionados por empresa MarkForged. Fuente: Block et al. (2018).

Este comportamiento de los filamentos de fibra genera que piezas complejas tengan gran cantidad de vacíos y, por consiguiente, se vean afectadas sus propiedades mecánicas.

De acuerdo con lo anterior, todos los autores investigados concuerdan en que los termoplásticos reforzados con fibra continua y fabricados por equipos de la empresa Markforged, cuentan con una alta cantidad de porosidad y vacíos, y se ha demostrado que éstos afectan diferentes propiedades mecánicas como resistencia a la tracción, compresión, corte, y torsión. Sin embargo, se ha estudiado vagamente la forma en que estos vacíos y porosidades afectan a las propiedades interlaminares, y cómo afecta la distribución de refuerzos de fibra a éstas.

1.2.3 Adherencia interlaminar

Araya et al. (2018), realizaron ensayos de compresión dentro del plano variando la distribución de las fibras, la orientación de éstas, y el ordenamiento (concéntrico e isotrópico) como se muestra en la Figura 1.5. Obtuvieron que el mejor caso era el equidistante (E) (el caso de la derecha en la figura), con un módulo elástico a la compresión de 2.102 GPa y un esfuerzo de ruptura de compresión en el plano de 53.3 MPa.

Estos autores complementan su estudio con imágenes microscópicas como las mostradas en la Figura 1.6, donde se observa que cuando el apilamiento de fibras es consecutivo (Figura 1.6, imágenes A y

B), hay un desorden de las capas de fibra, y cuando hay capas de Onyx entre capas de fibra, esto no ocurre (Figura 1.6, imágenes C y D).

El hecho de que la distribución de fibra altere las propiedades mecánicas y cantidad de vacíos y porosidades da a entender que es posible seleccionar una distribución que genere mayor rendimiento que otra, pero lo adecuado sería evaluar el comportamiento interlaminar, ya que finalmente la cantidad de vacíos y porosidades influyen en la adherencia entre una lámina y otra, lo cual ha sido estudiado por los autores mencionados a continuación.

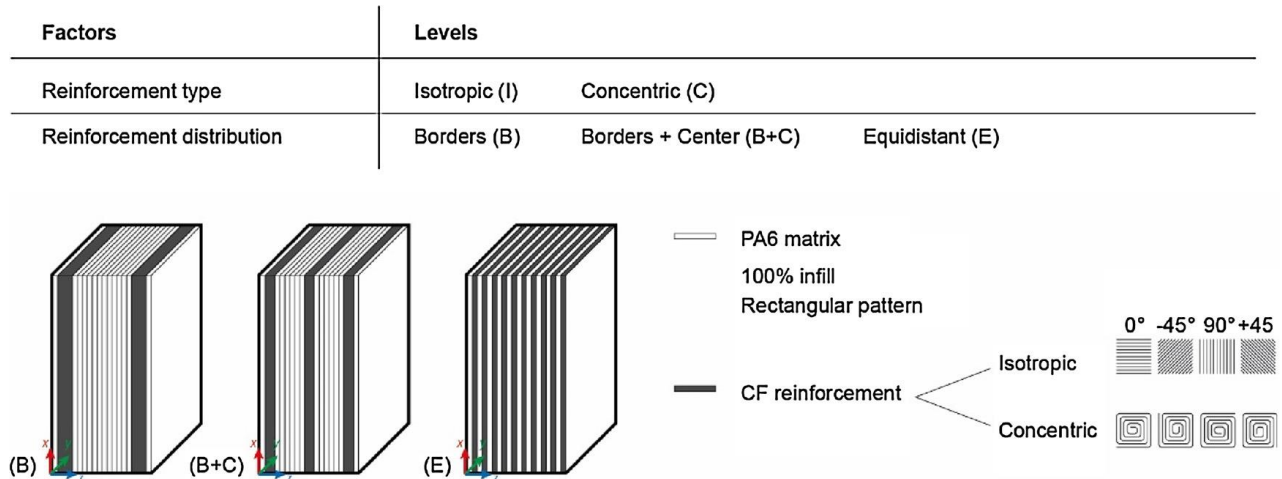


Figura 1.5: Diferentes casos ensayados en compresión. Fuente: Araya et al. (2018)

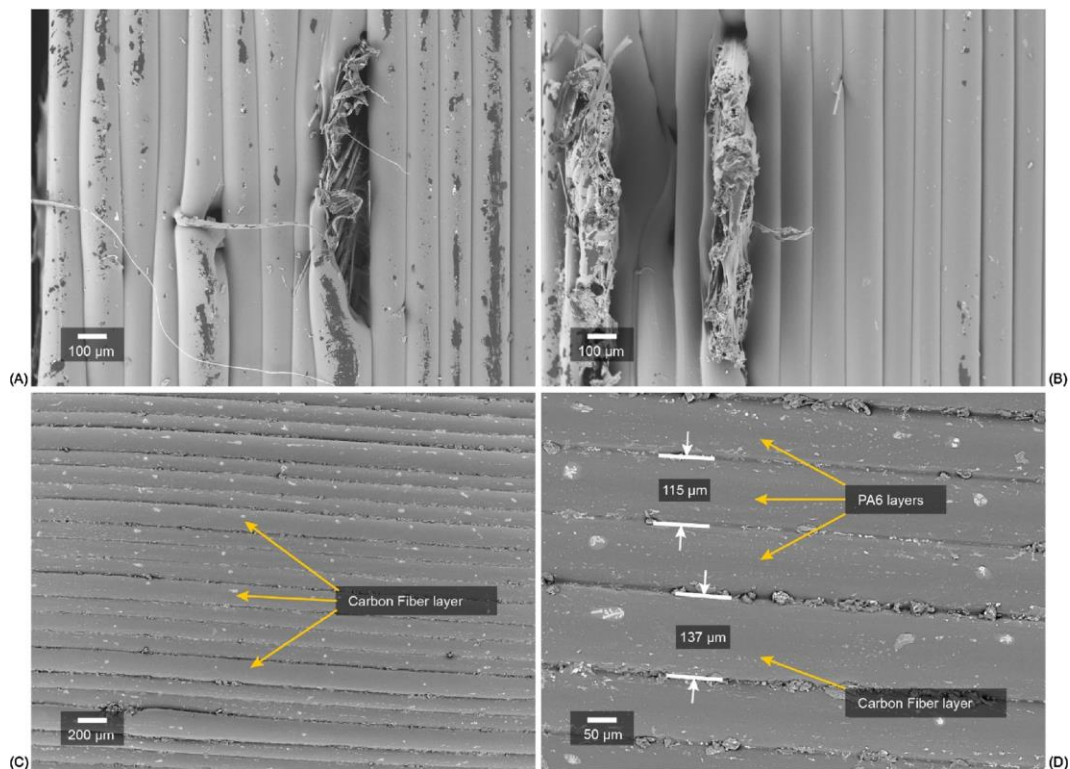


Figura 1.6: Micrografías de especímenes de compresión. A y B muestran un apilamiento consecutivo de fibras. C y D muestran una distribución equidistante. Fuente: Araya et al. (2018).

Caminero et al. (2018) evaluaron el efecto del espesor de capa y volumen de fibra en la adherencia interlaminar de un compuesto impreso en 3D (impreso en la Markforged MarkTwo), utilizando ensayos de flexión de viga corta (ILSS, por sus siglas en inglés). En la Figura 1.7 se puede apreciar los 3 casos que compararon, donde el primero es sólo matriz, el segundo tiene una capa de matriz entre 2 capas de fibra, y el tercero tiene sólo una capa de fibra gruesa.

Obtuvieron que el comportamiento interlaminar (ILSS) es mayor en las probetas con refuerzo, y también que disminuye a medida que el espesor de capa aumenta, es decir, el “tipo A” mostrado en la Figura 1.7 tiene mayor resistencia al corte interlaminar que el “tipo B”, debido a que en esta última se generaba mayor porosidad. La porosidad y los vacíos los analizaron utilizando micrografías.

El factor importante señalado por Caminero et al. (2018) es que la resistencia interlaminar varía a medida que cambia la distribución de las fibras, debido al reordenamiento de éstas y variación en las porosidades, lo cual es consistente con lo comentado por Araya et al. (2018).

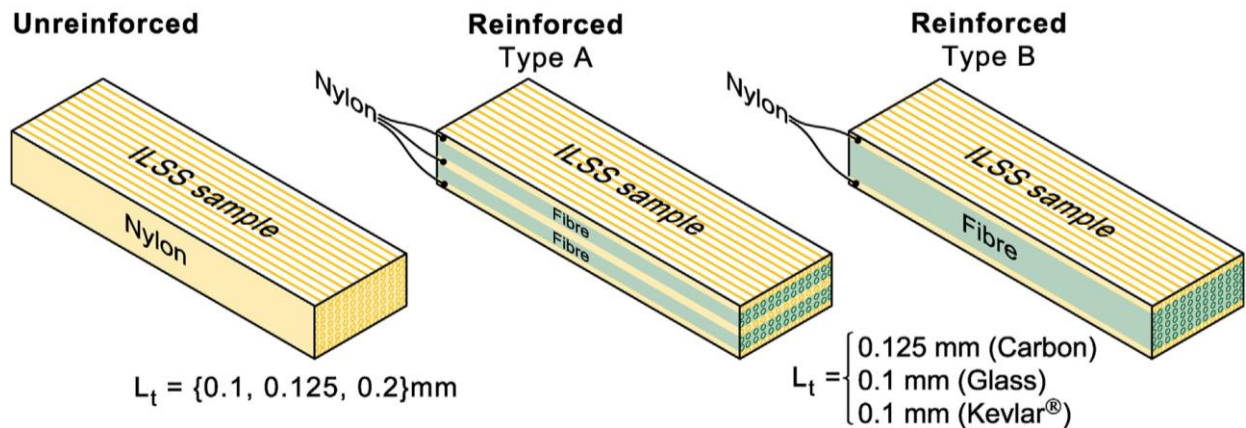


Figura 1.7: Diferentes configuraciones de distribución de refuerzo para ensayo ILSS. Fuente: Caminero et al. (2018).

Iragi et al. (2019) caracterizaron Nylon con fibra de carbono (Markforged MarkTwo) mediante ensayos de tracción, compresión, corte en el plano y corte fuera del plano, donde para este último se realizó un ensayo de flexión de viga corta (ILSS). Obtuvieron un esfuerzo de resistencia al corte interlaminar de 34.1 MPa, donde el laminado utilizado fue de $[0^\circ]_{46}$ (sin láminas de Nylon entre fibra). Esto fue realizado sólo con objetivo de caracterizar, por lo que en el ensayo interlaminar no se estudiaron variaciones en la distribución de fibra.

Fernandes et al. (2021) realizaron ensayos de corte interlaminar de Onyx con fibra de carbono (Markforged MarkTwo) para 3 casos, uno sin refuerzo de fibra continua, otro con llenado isotrópico, y otro con llenado concéntrico; estos 2 últimos con un laminado de $[0^\circ]_{52}$. Los resultados obtenidos de resistencia al corte interlaminar se muestran en la Tabla 2, donde se observa que independiente del tipo de llenado, se triplicó la resistencia interlaminar con respecto al caso sin refuerzo continuo. En la Figura 1.8, se observa la curva de esfuerzo-desplazamiento de corte interlaminar, donde se observa que el llenado concéntrico tiene una menor resistencia que el isotrópico, lo cual, de acuerdo con estos autores, se debe a que el llenado concéntrico es más propenso a delaminación que el llenado isotrópico.

debido a la orientación de las fibras. También se observa que luego de alcanzar un máximo esfuerzo, el llenado isotrópico tiene una caída más abrupta que el llenado concéntrico (falla más frágil), indicando que este último es más dúctil, lo cual se debe a que en el centro del espécimen hay una región con mayor cantidad de matriz.

Tabla 1.2: Resultados ILSS para 3 diferentes especímenes. Fuente: Fernandes et al. (2021)

Especímen	ILSS (MPa)
Fibras concéntricas	30.255 ± 3.188
Fibras isotrópicas	30.994 ± 2.231
Onyx sin refuerzo	10.752 ± 1.301

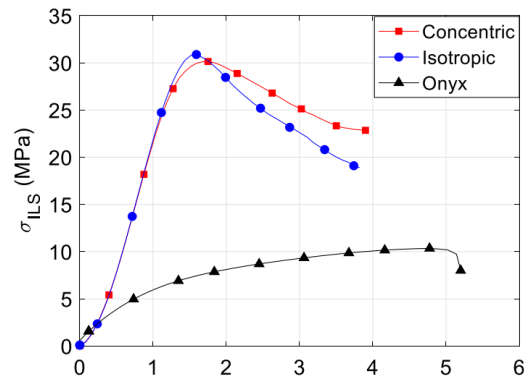


Figura 1.8: Esfuerzo v/s desp. para 3 diferentes especímenes. Fuente: Fernandes et al. (2021)

Los autores que han realizado el estudio más completo sobre variación de distribución de fibra en propiedades interlaminares son Yavas et al. (2021), quienes investigaron la resistencia al corte interlaminar (ensayo ILSS) mediante un estudio experimental y numérico en Onyx con fibra de carbono (Markforged MarkTwo). En la Figura 1.9 se muestra la variación de apilamiento de refuerzo que utilizaron. Se observan 5 casos, el primero sólo con fibra de carbono, el segundo una variación de 1 lamina de fibra y 1 de matriz (1 y 1), el segundo 2 y 2, el tercero 3 y 3, y el último 4 y 4.

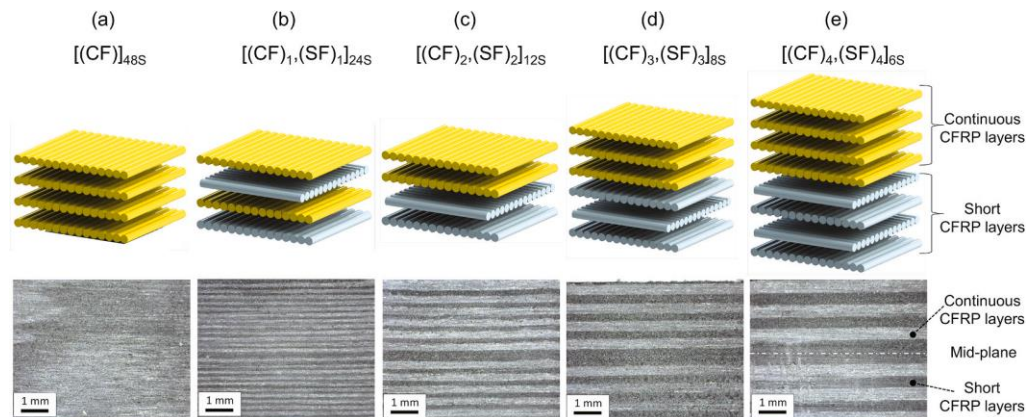


Figura 1.9: Diferentes configuraciones de distribución de refuerzo para ensayo ILSS, acompañadas de sus respectivas micrografías. Fuente: Yavas et al. (2021).

Sus resultados se pueden observar de forma resumida en la Figura 1.10, donde se aprecia claramente que a medida que aumenta la cantidad de láminas consecutivas, aumenta la resistencia interlaminar. En sus análisis de resultados comentan que acompañando al crecimiento en ILSS, el modo de falla cambia también, comenzando por un agrietamiento frágil de la matriz de Onyx, y cambiando a una falla entre la interfaz fibra/matriz.

Si bien el trabajo de Yavas et al. (2021) es bastante completo en el estudio de la distribución del refuerzo en el comportamiento interlaminar, es el único de su tipo, y sólo realizaron un ensayo para evaluar el comportamiento mecánico (ILSS), al igual que los trabajos mencionados de Caminero et al. (2018) e Iragi et al. (2019), Fernandes et al. (2021) y Pascual et al. (2021).

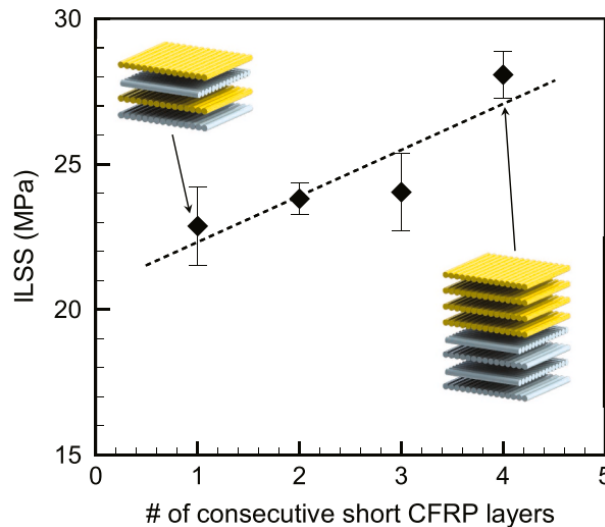


Figura 1.10: Resultados del ensayo ILSS para diferentes apilamientos. Fuente: Yavas et al. (2021).

Recapitulando, como señalan los autores mencionados anteriormente, el reordenar las láminas de refuerzo de tal forma de agregar láminas de matriz entre láminas de fibra, hace que se disminuyan los vacíos y porosidades en las probetas, lo cual, experimentalmente se ha observado que genera un aumento en las propiedades mecánicas.

1.2.4 Tratamientos térmicos

Otra manera de disminuir la cantidad de vacíos y porosidades señalada por la literatura, a parte del ordenamiento de las láminas de fibra y matriz, es realizar un tratamiento térmico a los materiales después de imprimir. A continuación, se comentan los dos artículos donde se ha intentado realizar esta mejora a estos materiales, siendo ambos del presente año.

Pascual-Gonzales et al. (2021) analizaron el efecto de tratamientos térmicos en la microestructura, analizada utilizando microtomografía computarizada de rayos X; propiedades interlaminares, y estabilidad dimensional en materiales compuestos reforzados con fibra de carbono impresos en 3D, incluyendo ensayos de flexión de viga corta para evaluar la respuesta interlaminar.

Concluyen que las piezas tratadas a 150°C muestran una reducción de la porosidad de aproximadamente 87% y mejora la resistencia interlaminar un 145%, sin modificar las dimensiones

nominales. También concluyen que para temperaturas mayores a 250°C se pierde totalmente la geometría de la probeta.

En la Figura 1.11 se observa en (a) la evolución del contenido de la porosidad, y en (b) y (c) probetas tratadas a 70°C y 130°C respectivamente.

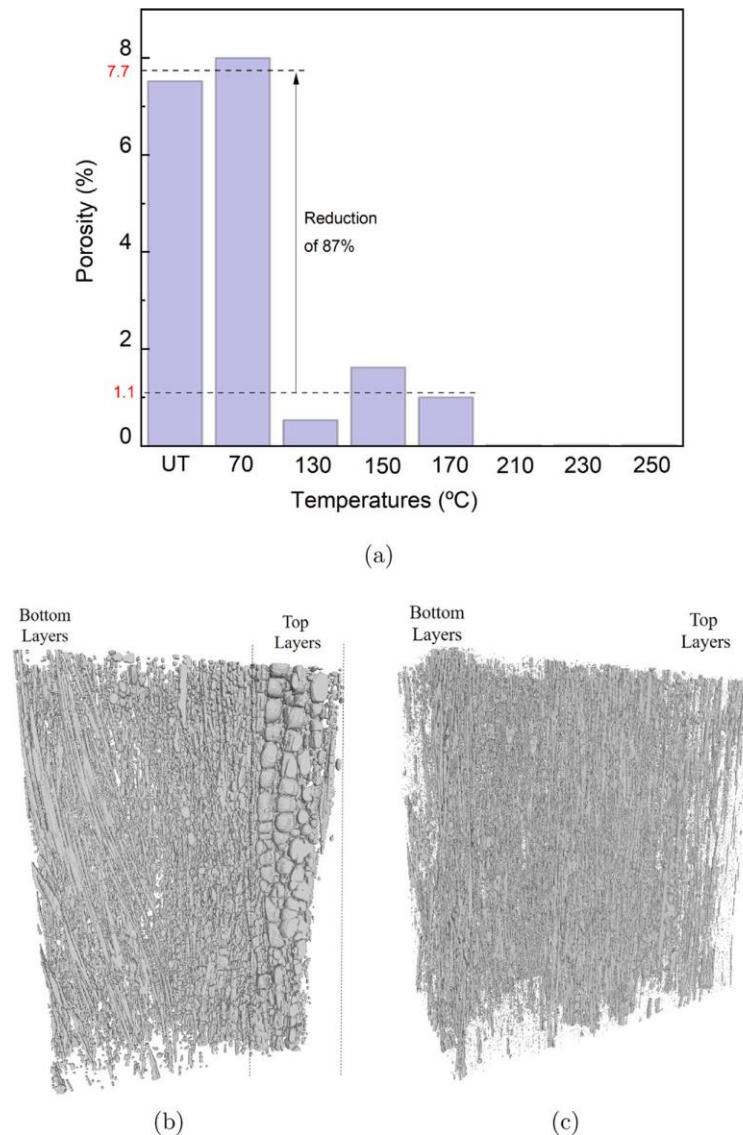


Figura 1.11: (a) Evolución del contenido de porosidad. (b) Probeta tratada a 70°C. (c) Probeta tratada a 130°C. Fuente: Pascual-Gonzales et al. (2021).

Wang et al (2021) investigaron los efectos de tratamiento térmico en la porosidad, estabilidad dimensional y propiedades de flexión. En este caso probaron diferentes configuraciones de distribución de los refuerzos. Concluyeron que el tratamiento térmico pudo mejorar las propiedades mecánicas de estos materiales, disminuyendo la porosidad y fortaleciendo la interfaz entre matriz y fibra. También el tratamiento térmico retrasó la iniciación de grietas en las pruebas de flexión. Probaron diferentes temperaturas aplicadas durante diferente cantidad de tiempo, donde su mejor resultado fue a 100°C durante 8 horas.

CAPÍTULO 2: Hipótesis, objetivos y metodología

En virtud de lo comentado en el capítulo anterior, la problemática que aborda el presente trabajo consiste en caracterizar propiedades interlaminares (fuera del plano) mediante diferentes ensayos (ILSS, tracción fuera del plano, compresión fuera del plano), de termoplásticos impresos en 3D reforzados con fibra continua, variando la distribución de los refuerzos de fibra. También analizar el comportamiento interlaminar al realizar tratamiento térmico, mediante los mismos ensayos nombrados, y análisis de micrografías. Esto será realizado de acuerdo con la siguiente hipótesis y los siguientes objetivos generales y específicos.

2.1 Hipótesis

Considerando que Pascual-González et al. (2021) obtuvo una mejora entre 140% y 150% en el corte interlaminar, y teniendo en cuenta el estudio de Wang et al. (2021) quienes obtuvieron los mejores resultados al realizar el tratamiento térmico de 150°C durante 8 horas, se plantea la siguiente hipótesis:

“La adición de láminas de matriz entre láminas de fibra continua, junto con un tratamiento térmico de 150°C durante 8h mejora las propiedades interlaminares en un 150%”.

2.2 Objetivos

El trabajo propuesto será realizado de acuerdo con los siguientes objetivos.

Objetivo general:

[OG1]: Determinar experimentalmente la configuración de distribución de fibra y el tratamiento térmico que generen la mayor resistencia interlaminar en materiales compuestos impresos en 3D reforzados con fibra continua.

Objetivos específicos:

[OE1]: Definir tipos de distribuciones de refuerzos de fibra a analizar.

[OE2]: Realizar ensayos de tracción fuera del plano, compresión fuera del plano, y flexión de viga corta con las distribuciones de refuerzo de fibra definidas (Onyx con fibra de vidrio).

[OE3]: Seleccionar la distribución de refuerzos de fibra que genera mayor resistencia interlaminar.

[OE4]: Diseñar y realizar tratamientos térmicos a evaluar de acuerdo con la distribución de fibra seleccionada.

[OE5]: Analizar las probetas tratadas térmicamente mediante ensayos mecánicos interlaminares y análisis micro mecánicos.

2.3 Metodología

La metodología del presente trabajo se plantea de acuerdo con el cumplimiento de los objetivos específicos.

[OE1]: Definir tipos de distribuciones de refuerzos de fibra a analizar.

Para definir los tipos de distribuciones de refuerzos de fibra se realizará una extensa revisión de la literatura, de acuerdo con los objetivos del estudio. Se analiza y compara la adición de láminas de matriz, entre láminas de refuerzo.

[OE2]: Realizar ensayos de tracción fuera del plano, compresión fuera del plano, y flexión de viga corta con las distribuciones de refuerzo de fibra definidas.

Los ensayos de tracción fuera del plano se realizan basándose en la norma ASTM D7291 y recomendaciones de autores como San Juan et al. (2016) y Hara et al. (2010). Los ensayos de compresión fuera del plano se realizarán basándose en la norma ASTM D695, y recomendaciones de Kim et al. (2010). Los ensayos de flexión de viga corta (ILSS) se realizarán basándose en la norma D2344 y recomendaciones de diversos autores como Caminero et al. (2018), Iragi et al. (2019), y Yavas et al (2021).

Las recomendaciones las normas y autores mencionados se utilizan en primera instancia, pero el diseño de probetas y realización de experimentos es iterativo, ya que este tipo de ensayos no se han realizado, o se han realizado de manera muy escasa, para este tipo de materiales.

[OE3]: Seleccionar la distribución de refuerzos de fibra que genera mayor resistencia interlaminar.

La selección del caso que genere mayor resistencia interlaminar se realizará analizando los gráficos de esfuerzo deformación, los esfuerzos de ruptura y el módulo elástico obtenido en las pruebas anteriores.

[OE4-OE5]: Precisar y llevar a cabo tratamientos térmicos a evaluar de acuerdo con la distribución de fibra seleccionada. - Analizar las probetas tratadas térmicamente mediante ensayos mecánicos interlaminares y análisis micro mecánicos.

Los tratamientos térmicos se definen basándose en los estudios realizados por Pascual et al. (2021) y Wang et al. (2021), resultando en la utilización de las probetas de flexión de viga corta, las cuales se tratarán durante 1, 3, 6 y 8 horas, a temperaturas de 100°C, 150°C, 175°C y 200°C, utilizando 2 especímenes por caso, para luego realizar los ensayos de flexión de viga corta, y luego tomar especímenes para el estudio de micrografías mediante un microscopio óptico.

Esta metodología será realizada siguiendo la carta gantt mostrada en la Figura 2.1, donde se considera un plazo de 18 meses para la presente tesis.

Plan de trabajo

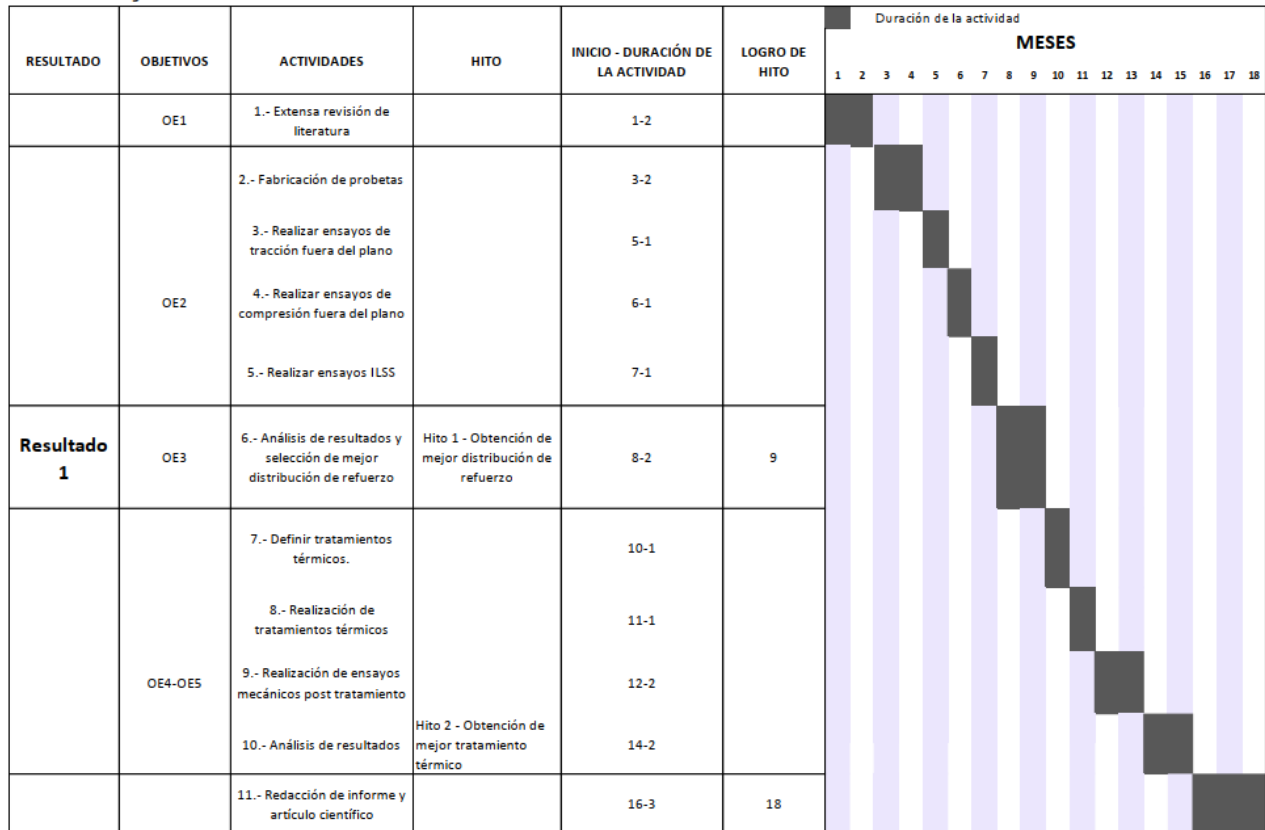


Figura 2.1: Carta Gantt.

CAPÍTULO 3: Procedimientos experimentales

En el presente capítulo se describen en detalle los experimentos a realizar. Para todos éstos, se utilizará como matriz el material **Onyx**, y como refuerzo de fibra continua el filamento de **fibra de vidrio**, ambos proporcionados por la empresa Markforged. Se seleccionan estos materiales debido a la disponibilidad en el laboratorio de impresión 3D de la facultad.

3.1 Ensayos con variación de distribución de los refuerzos

Se evaluarán 3 diferentes laminados, los cuales se definen basándose en los trabajos de los autores Araya et al. (2018) y Yavas et al. (2021). Con éstos se realizarán 3 diferentes ensayos, con los cuales se evaluará el comportamiento interlaminar de cada caso.

3.1.1 Laminados

Los laminados a evaluar se aprecian en la Figura 3.1, donde el color amarillo representa las láminas de fibra de vidrio (letra F) y el color gris representa las capas de Onyx (letra O). Una de las limitaciones de la impresora es que siempre deben ir 2 capas de Onyx en la cara superior e inferior de los objetos que se imprimen, orientadas a $\pm 45^\circ$, y por lo menos 1 capa en el resto de las caras. Por este motivo se observa que al inicio y al final de los laminados siempre se tienen 2 capas de Onyx. El espesor de las capas tanto de Onyx como de fibra de vidrio es de 0,1 [mm]. Se agrega también 1, 2 y 3 capas de fibra al final de cada laminado (y antes de las 2 láminas inferiores) respectivamente para obtener laminados simétricos. Todas las láminas de todos los casos tienen un llenado isotrópico con una orientación de 0° .

Los valores de n_1 , n_2 y n_3 mostrados van a depender de la probeta a utilizar. Más adelante se comenta que el espesor de cada probeta se define de acuerdo con recomendaciones de normas y artículos, y luego de definir este espesor se calculan los valores de n_1 , n_2 y n_3 para que se cumpla la distribución mostrada en cada caso. La idea es obtener la misma cantidad de láminas de fibra y Onyx en cada caso (para trabajar con volúmenes de fibra similares), pero sólo variar la distribución de éstas.

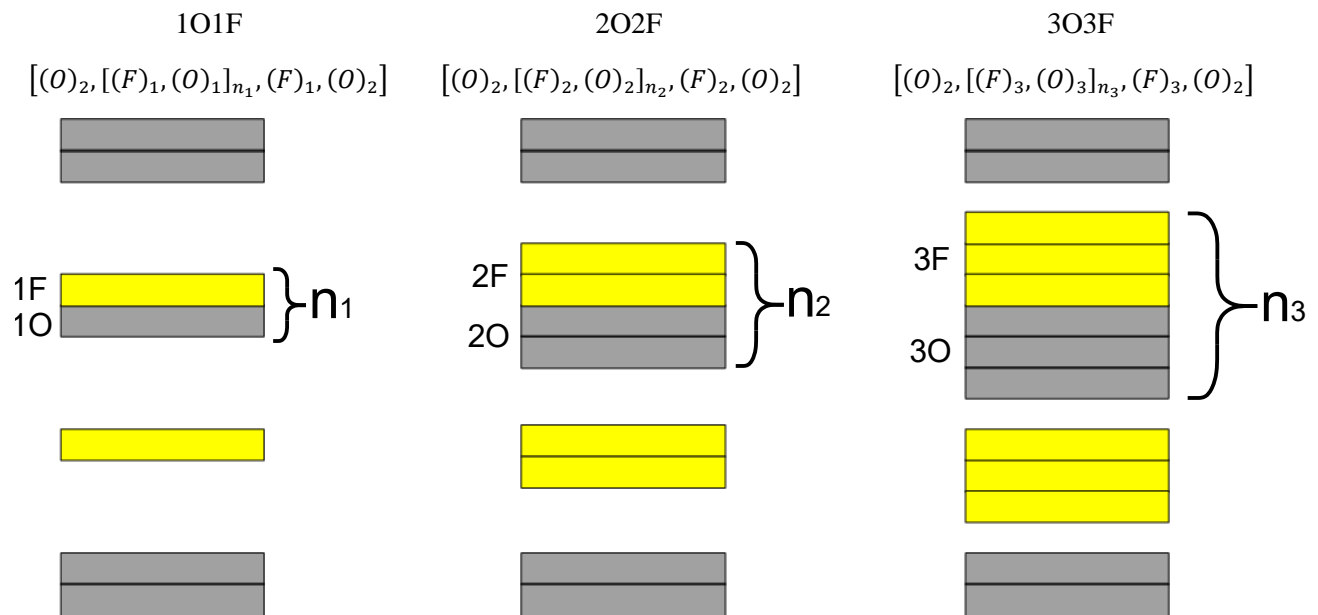


Figura 3.1: Distribución de refuerzo en 3 casos a probar.

3.1.2 Ensayo de tracción fuera del plano

Actualmente no existen trabajos científicos que hayan estudiado la tracción fuera del plano para evaluar el comportamiento interlaminar, solo hay trabajos que han estudiado este parámetro en materiales compuestos fabricados por métodos convencionales. Un ejemplo es San Juan et al. (2016) quienes realizaron ensayos de tracción y compresión fuera del plano, por lo que se va a adoptar una metodología similar a la que realizan ellos. También se utiliza como referencia la norma ASTM D7291/D7291M. La máquina utilizada es una Zwick Roell con celda de carga de 5 kN, la velocidad de desplazamiento del cabezal es de 1 mm/min. Si bien la norma requiere 5 especímenes por ensayo, se utilizarán 3 especímenes por prueba, ya que el proceso de fabricación es mucho más preciso que los procesos de fabricación de materiales compuestos tradicionales. En la Figura 3.2 se muestra un esquema de aplicación de la fuerza, donde también se aprecia la forma de la probeta, y el sentido de las fibras. En la Figura 3.3 se muestra de manera más concreta la geometría de la probeta. Cabe destacar que se intentó utilizar pestañas de acero pegadas con un adhesivo epóxico a las probetas, lo cual corresponde a la metodología propuesta por la norma mencionada y por San Juan et al. (2016), sin embargo, para este material se presentaban problemas de adherencia, lo cual significa que en algunos casos el ensayo resultó bien, pero en otros falló el adhesivo; por esto es que se decidió imprimir las probetas directamente junto con las pestañas de Onyx, donde el refuerzo se aplicó sólo en la sección central como mostrado en la Figura 3.2.

Debido a que como sólo en la sección central hay refuerzos de fibra, para medir el módulo elástico se utiliza un strain gauge en esta zona, como muestra la Figura 3.2. Esto ya que las pestañas de Onyx se comportan elásticamente de forma diferente a la sección con refuerzo, por lo tanto, no se puede calcular la deformación como la distancia entre los soportes de la máquina de ensayos.

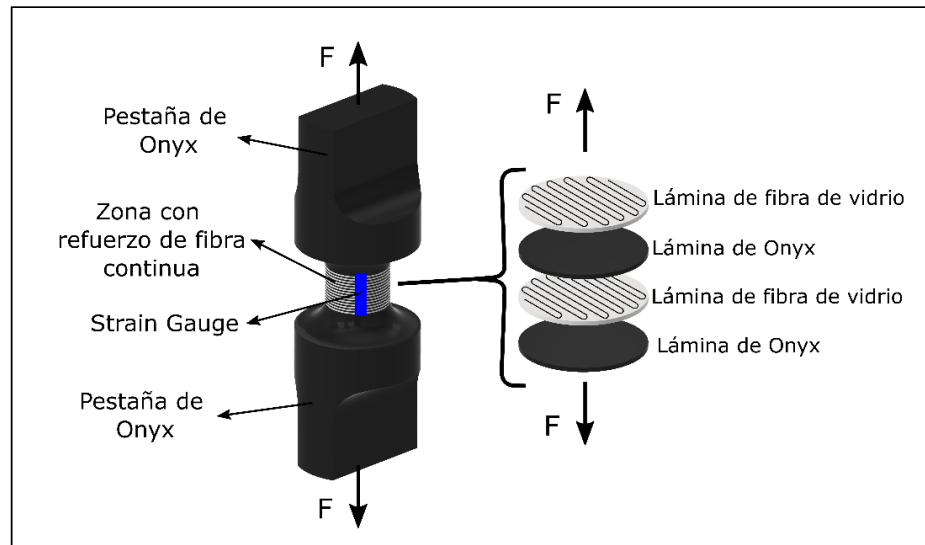


Figura 3.2: Esquema de aplicación de fuerzas

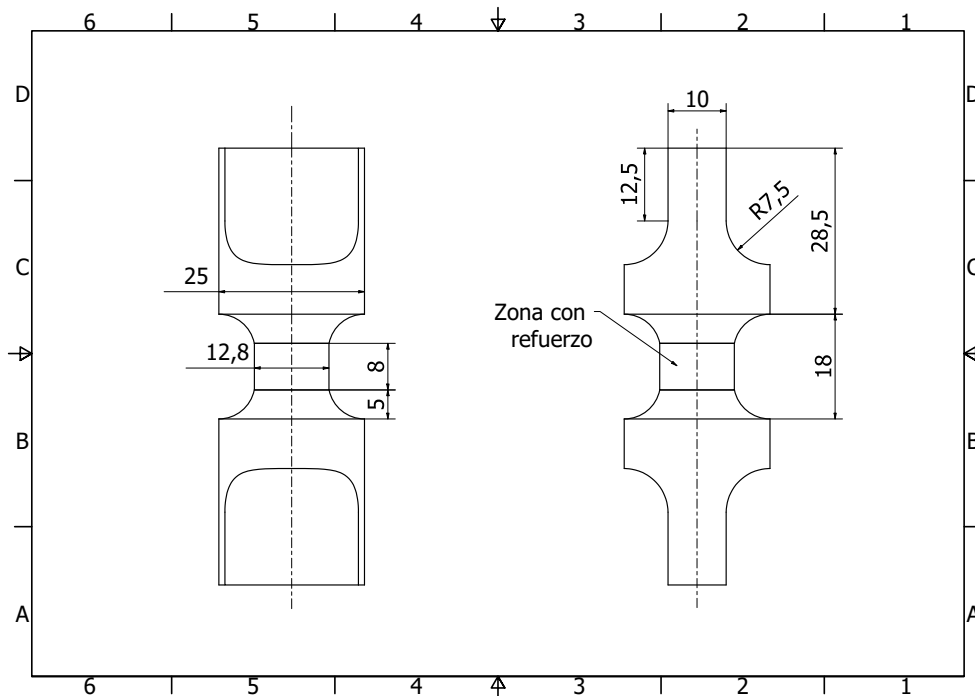


Figura 3.3: Geometría utilizada en los ensayos de tracción fuera del plano

A todas las probetas se les realizó una reducción de diámetro en la zona central donde se ubican los refuerzos con el uso de un torno, esto ya que en esa zona hay 2 láminas de Onyx alrededor, las cuales influyen en los resultados. El software de la impresora tiene opciones bastante limitadas por lo que no permite omitir la impresión de estas 2 láminas de Onyx. En la Figura 3.4 se muestra un esquema de la sección transversal donde fue reducido el diámetro, donde se observa que el área de Onyx fue reducida de 69.78 mm^2 a 35.22 mm^2 , lo que es una reducción del 50% de área transversal de Onyx, por lo que, al reducir el diámetro, la resistencia del Onyx a la fuerza de tracción fuera del plano se reduce en un 50%.

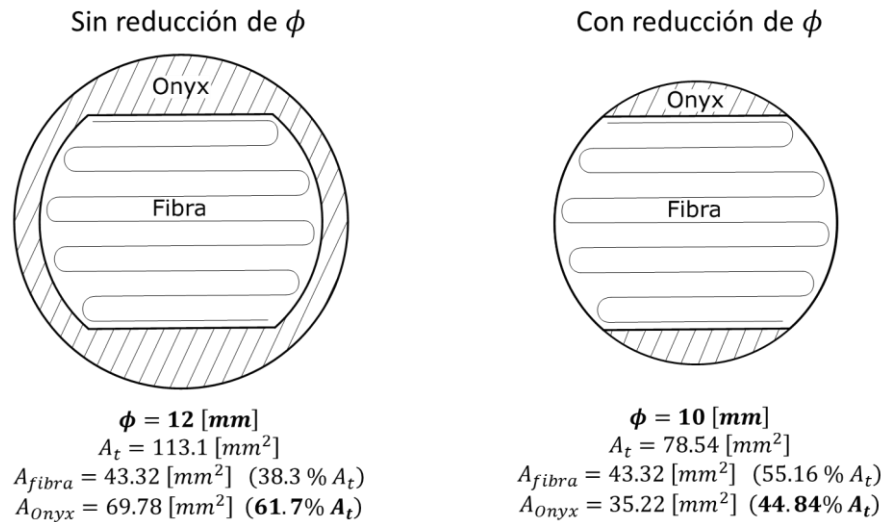


Figura 3.4: Esquema de caso sin reducción de diámetro v/s caso con reducción de diámetro.

En la Figura 3.5 se muestra una imagen de la probeta a utilizar impresa (Fig. 16.1) y montada en la máquina de ensayos (Fig. 16.2.)

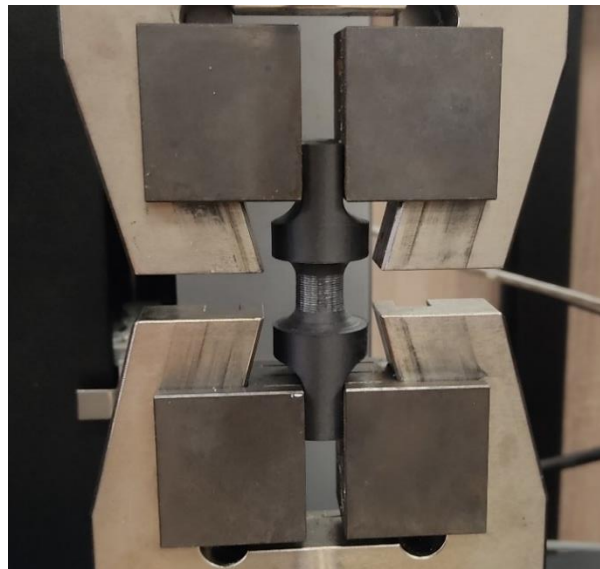


Figura 3.5: Probetas montadas en la máquina de ensayos

3.1.3 Ensayo de compresión fuera del plano

Al igual que en el caso de tracción fuera del plano, no existen estudios que hayan ensayado la compresión fuera del plano, y tampoco existe una norma para materiales compuestos impresos en 3D, por lo que se adoptará una metodología similar a la de Kim et al (2016) que está basada en la norma ASTM D695. En la Figura 3.6 se muestra un esquema de aplicación de la fuerza de compresión, junto con la geometría de la probeta, donde se observa una forma cúbica, con un largo de 10 mm para todas las probetas. Se utilizarán 3 especímenes por prueba al igual que en tracción. La máquina utilizada es

una Instron 8801 de celda de carga de 100 kN donde para medir deformación se mide el desplazamiento del cabezal de la máquina. La velocidad utilizada es de 1 mm/min.

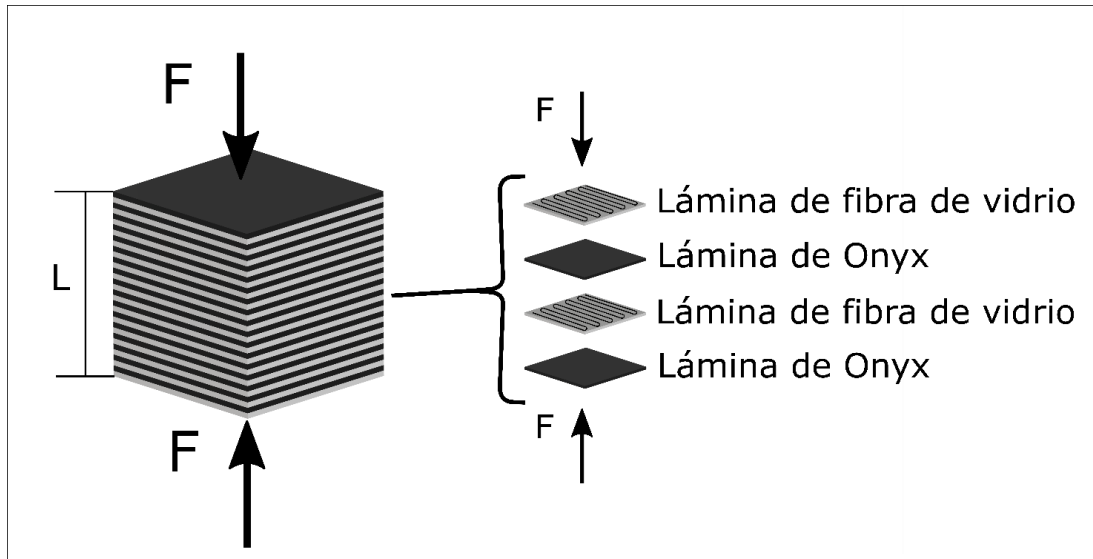


Figura 3.6: Geometría a utilizar en el ensayo de compresión fuera del plano.

Cabe destacar que el esfuerzo de fluencia para este ensayo será calculado como la intersección de rectas tangentes a la zona elástica y zona plástica. Esto ya que de acuerdo con los resultados mostrados más adelante, se generan estas dos zonas. El detalle de cómo se realizó el cálculo del esfuerzo de fluencia se muestra en la Figura 3.7.

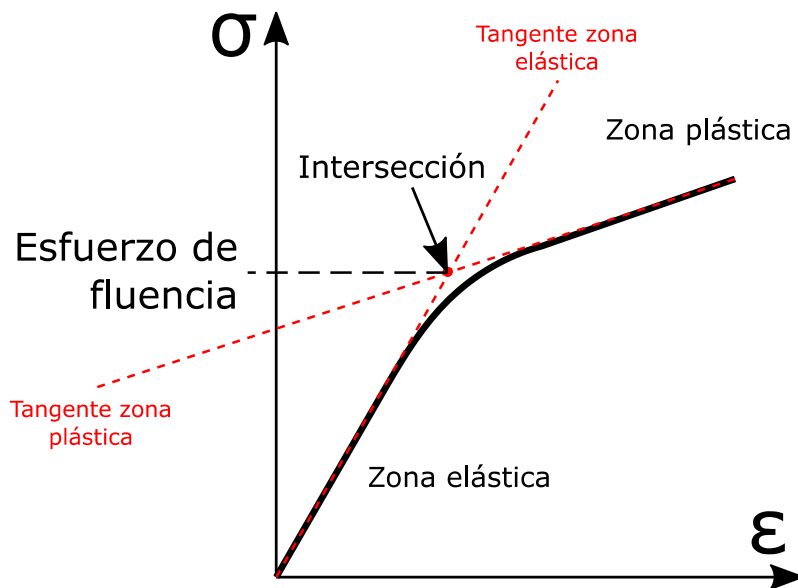


Figura 3.7: Detalle de cálculo de esfuerzo de fluencia.

3.1.4 Ensayo de corte interlaminar (ILSS)

Si bien este ensayo lo han realizado algunos autores como los mencionados en el Capítulo 1, sólo un estudio lo ha hecho probando varios casos de distribución de fibra (Yavas et al. (2021)) con fibra de carbono, y como el presente estudio es realizado con fibra de vidrio, su estudio servirá como comparación desde el punto de vista fenomenológico.

Se tomará como referencia la norma ASTM D2334/D2334M. La máquina utilizada es una Zwick Roell Z005 con celda de carga de 5 kN. La velocidad de desplazamiento del cabezal es de 1 mm/min. El esfuerzo de corte interlaminar de acuerdo con esta norma está dado por la ecuación (1).

$$\tau_{ILSS} = \frac{3}{4} \cdot \frac{P_{max}}{b \cdot h} \quad (1)$$

Donde P_{max} es la carga máxima, h es el g espesor y b es el ancho. De la misma forma que los ensayos anteriores, se fabricarán 3 especímenes por configuración de fibra. La geometría de las probetas se muestra en la Figura 3.8, donde el espesor (t) equivale para todos los casos a 5,9 [mm].

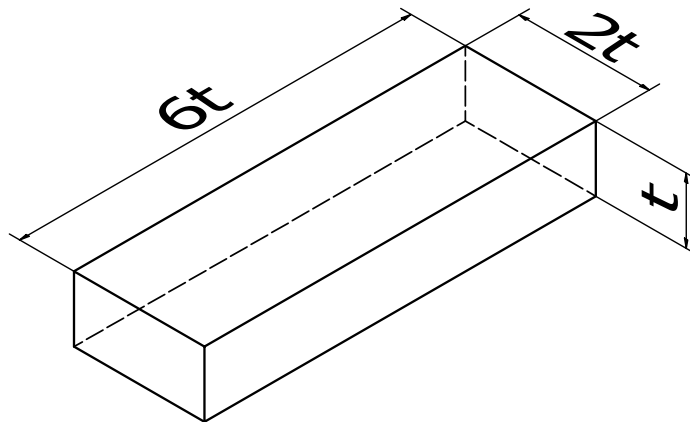


Figura 3.8: Geometría a utilizar en el ensayo de corte interlaminar (ILSS).

En la Figura 3.9.1 se muestra un esquema de cómo se aplica la carga, y en la Figura 3.9.2 se observa una probeta montada en la máquina de ensayos.

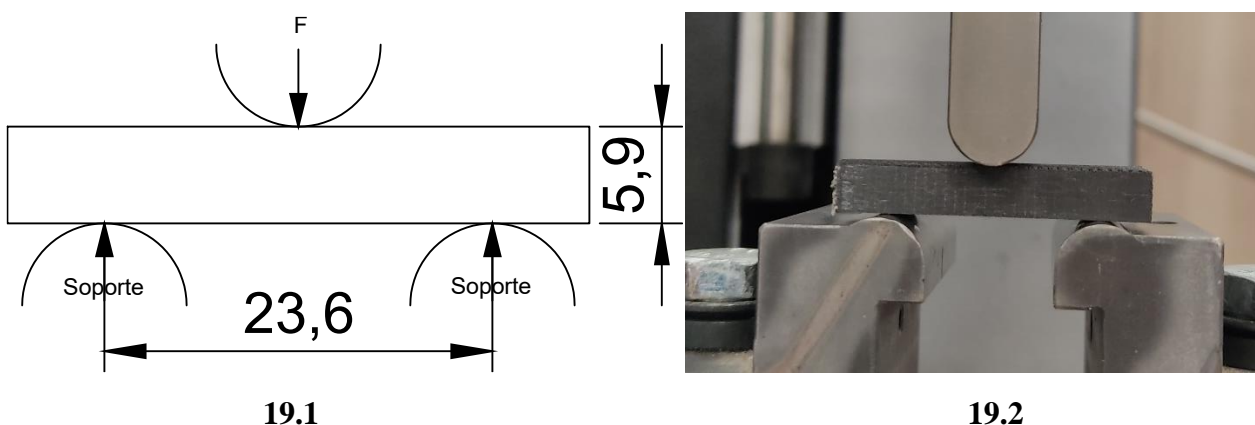


Figura 3.9: 1. Esquema de aplicación de la carga de corte interlaminar. 2. Probeta montada en la máquina de ensayos Zwick Roell Z005.

3.2 Ensayos con tratamientos térmicos

3.2.1 Tratamientos térmicos

El laminado a utilizar para estos tratamientos térmicos corresponde al que presente un mejor desempeño en los ensayos mostrados anteriormente, por lo tanto, será seleccionado en la sección de resultados.

Tomando en consideración los trabajos de Wang et al. (2021) y Pascual-Gonzales et al. (2021), los tratamientos térmicos definidos consisten en aplicar a las probetas de flexión de viga corta temperatura de 100°C, 150°C, 175°C y 200°C, durante periodos de 1, 3, 6 y 8 horas, utilizando 2 especímenes de cada ensayo. Estas temperaturas serán aplicadas en el horno de tubo multi posición SZGL-1200C.

Antes y después de los tratamientos se procede a medir las longitudes principales de las probetas utilizando micrómetros (precisión de 0,01 [mm]), para analizar la distorsión geométrica generada en estas.

También se pesarán las probetas antes y después de éstos, utilizando una balanza analítica Radwag AS 220/C/2 (precisión 1 mg) con objetivo de evaluar las variaciones de la masa producto del cambio del porcentaje de humedad, y posibles cambios en la matriz.

Luego de los tratamientos térmicos y mediciones de longitud y masa, se proceden a realizar los ensayos mecánicos de flexión de viga corta, utilizando la misma metodología descrita en la sección 3.1.4, para luego comparar con los ensayos realizados sin tratamiento térmico.

Finalmente, se toman muestras de los especímenes ensayados, para observar en un microscopio óptico.

3.2.2 Análisis de micrografías

Para realizar los análisis de micrografías se seleccionan las probetas con mayor resistencia de todos los casos de temperatura. De estas probetas se extraen muestras de forma mecánica, para luego sumergir estas probetas en resina epóxica. Una vez curada la resina se realiza un pulido mecánico a la superficie, para poder apreciar la probeta en un microscopio de la empresa Optika Microscopes.

Para cada muestra, se toman micrografías en 3 zonas diferentes, y a diferente aumento, específicamente 4X y 10X.

El análisis de las micrografías se realiza con el programa **ImageJ**. Se utiliza este programa debido a que autores como Blok et al. (2018), Pyl et al. (2018), Wang et al. (2021) y Fernandes et al. (2021) lo utilizan para el análisis de micrografías. Sin embargo, si bien estos autores mencionan el uso de éste software, no dan detalles sobre el procedimiento para definir la escala, y los parámetros para medir vacíos, por lo que a continuación se especifican estos procedimientos.

En primera instancia se utiliza la herramienta Straight, donde se dibuja una línea recta que cruza una sección de fibra, como muestra la Figura 3.10. Se recuerda que el espesor de una lámina es 0.1 mm, y como se define más adelante, el laminado a utilizar en estos ensayos corresponde al 3O3F, por lo

tanto, la línea dibujada debe señalar una distancia de 0.3 mm, o 300 μm . Para definir la escala, se utiliza la línea mencionada, utilizando la herramienta Set scale (Analyze > Set scale) con una distancia de 300 μm .

Se utilizan micrómetros como unidad de medida ya esta unidad es utilizada por los autores mencionados.

Para medir las longitudes de los vacíos se utiliza la misma herramienta Straight para dibujar un segmento recto, y luego se utiliza la herramienta Measure (Analyze > Measure). El objetivo de medir es comparar los tamaños de los diferentes vacíos a encontrar.

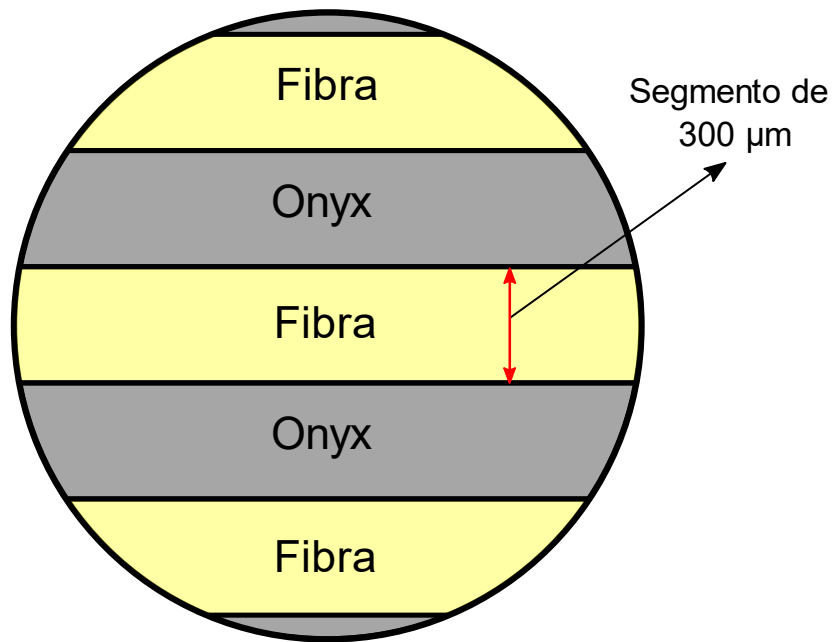


Figura 3.10: Diagrama explicativo de definición de segmento para definir escala.

Se calcula también mediante el mismo software el porcentaje de vacíos de las muestras. En primera instancia, se utiliza la herramienta Measure para medir la superficie total de la micrografía, luego con la herramienta Color Threshold (Image > Adjust > Color threshold) se detectan los vacíos, ajustando los colores de tipo RGB. Luego se realiza una selección de los vacíos detectados con la herramienta Select, para luego medir el área seleccionada con la herramienta Measure. Para calcular el porcentaje de vacíos se divide el área medida de vacíos por el área total de la micrografía.

En la literatura no se encuentra información sobre con qué aumento medir. Autores como Blok et al. (2018) por ejemplo, indican el valor estimado del porcentaje de vacíos sin dar mayores detalles. Sin embargo, autores como Klift et al. (2016), entregan micrografías por ejemplo con longitudes de referencia de 100 μm , por lo tanto, las micrografías utilizadas para esta medición corresponden a las con aumento 10X, ya que están en rangos similares a estos autores, y también experimentalmente se observa que en este aumento se detectan los vacíos de mejor manera que por ejemplo el aumento de 4X. No se utiliza un aumento mayor para tener una mayor área de estudio.

CAPÍTULO 4: Resultados y discusiones

4.1 Distribución de refuerzos de fibra continua

4.1.1 Tracción fuera del plano

Los resultados se muestran de forma resumida en la Figura 4.1. Se observa una clara tendencia a aumentar el esfuerzo máximo de tracción fuera del plano a medida que aumenta la cantidad de láminas de Onyx entre láminas de refuerzo. Esto se debe a que, de acuerdo con lo estudiado en el estado del arte, el hecho de variar la distribución de los refuerzos genera variaciones en los vacíos y porosidades de las probetas, influyendo finalmente en la resistencia mecánica. Otro fenómeno que se observa es que a medida que hay más láminas de Onyx entre láminas de refuerzo la pendiente de las curvas en la zona elástica va disminuyendo, lo cual se atribuye a que al haber mayor cantidad de láminas de Onyx juntas, éstas tienden a deformarse más que cuando hay menos láminas de Onyx juntas, lo cual genera un módulo elástico menor.

De acuerdo con la nomenclatura utilizada, TFP significa tracción fuera del plano, luego, el primer número indica el tipo de laminado (por ejemplo, el 1 indica 1O1F), y el segundo número indica el número de probeta, así, el ensayo TFP 2_3 se refiere al ensayo de tracción fuera del plano, con laminado 2O2F, y probeta número 3.

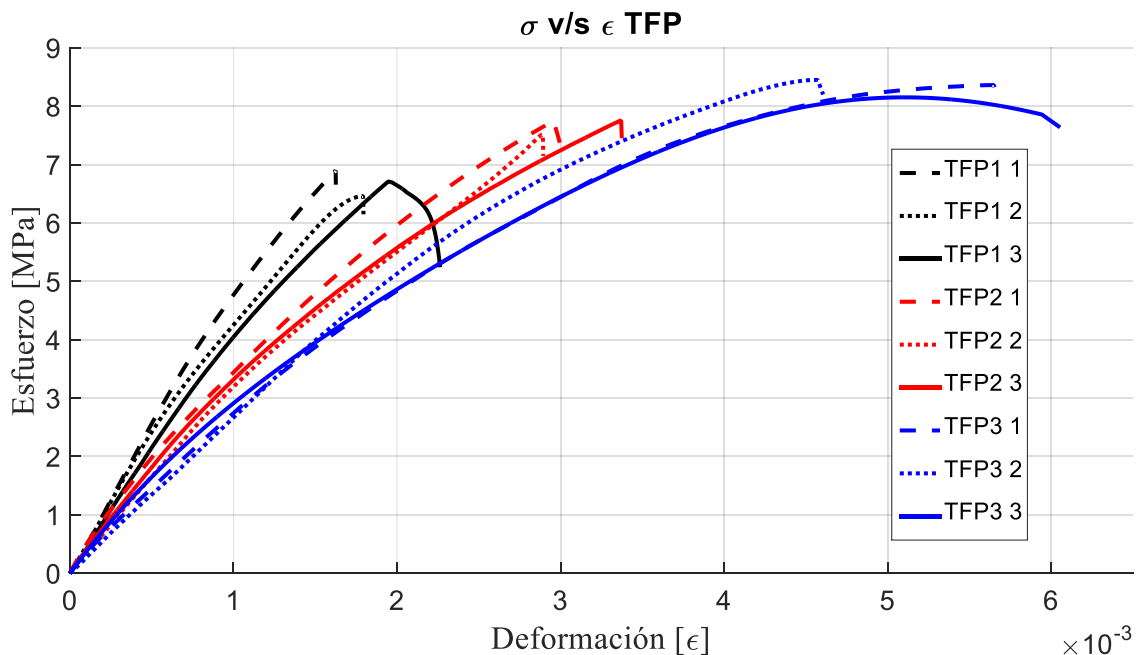


Figura 4.1: Curvas de esfuerzo v/s deformación para el ensayo de tracción fuera del plano.

En la Tabla 4.1 se observa de forma cuantitativa el comportamiento observado. Se observa que se obtiene un aumento del 24.41% al comparar los promedios del laminado 3O3F con el laminado 1O1F. También se observa una disminución del 43.42% entre los promedios de los módulos elásticos de

estos mismos laminados, lo cual se debe a la acción de las capas de Onyx, como fue mencionado. Ambos porcentajes calculados con respecto al laminado 1O1F.

Tabla 4.1: Resultados del ensayo de tracción fuera del plano

Laminado	Espécimen	Esfuerzo de ruptura [MPa]	Promedio Esf ruptura [MPa] (std)	Módulo elástico [MPa]	Promedio módulo elástico [MPa] (std)
1O1F	Esp. 1	6.90	6.69 (0.22)	5050.77	4481.7 (497.20)
	Esp. 2	6.46		4131.44	
	Esp. 3	6.71		4262.90	
2O2F	Esp. 1	7.75	7.67 (0.14)	3085.46	3206.3 (105.02)
	Esp. 2	7.51		3275.14	
	Esp. 3	7.75		3258.44	
3O3F	Esp. 1	8.36	8.32 (0.15)	2475.62	2535.6 (99.97)
	Esp. 2	8.45		2651.03	
	Esp. 3	8.15		2480.23	

La falla obtenida para este ensayo corresponde a una falla frágil, la cual ocurre en la interfaz entre lámina y matriz, específicamente entre láminas de Onyx y láminas de refuerzo, como se muestra en la Figura 4.2.



Figura 4.2: Modo de falla de las probetas del ensayo de tracción fuera del plano.

4.1.2 Compresión fuera del plano

Para este ensayo, se obtuvo bastante similitud en los especímenes de cada caso, por lo que para resumir los resultados se realizó un promedio de las curvas de cada espécimen, mediante el uso de interpolaciones y promedios punto a punto. El resultado final se muestra en la Figura 4.3.

De acuerdo con la nomenclatura utilizada, CFP significa compresión fuera del plano, luego, el primer número indica el tipo de laminado (por ejemplo, el 1 indica 1O1F), y el segundo número indica el número de probeta, así, el ensayo CFP 2_3 se refiere al ensayo de compresión fuera del plano, con laminado 2O2F, y probeta número 3. FF se refiere al caso de full fibra.

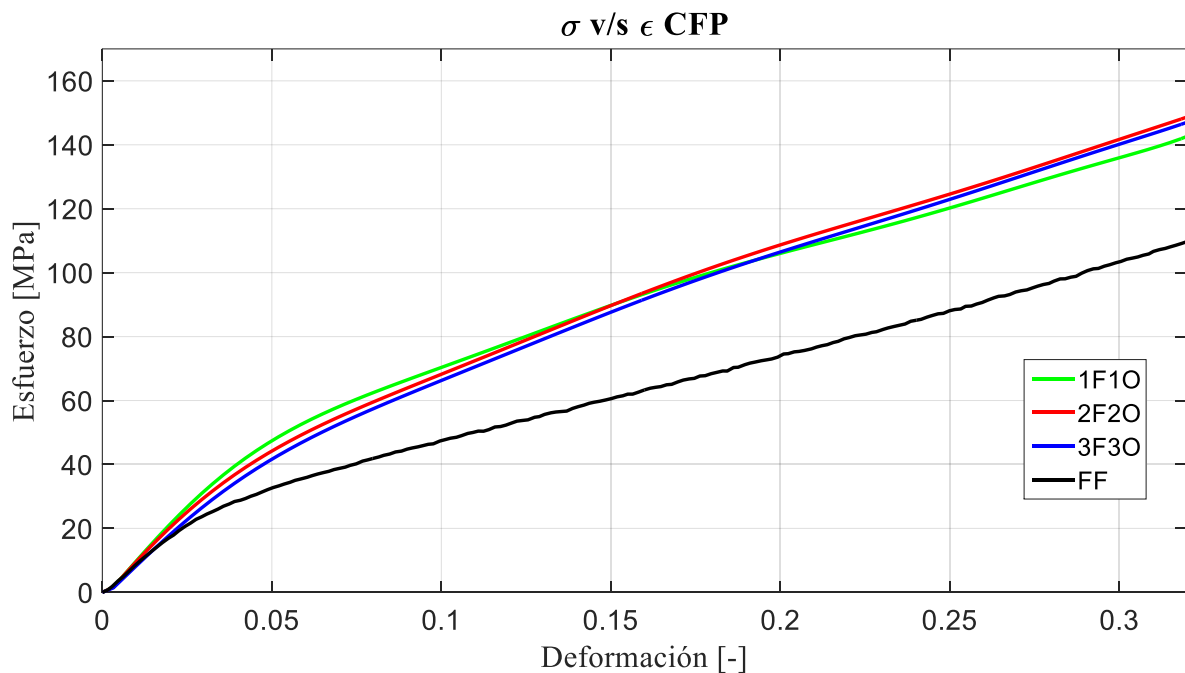


Figura 4.3: Resultados promedio para los ensayos de Compresión fuera del plano.

Como se observa en el gráfico, todas las curvas se detienen al 32% de deformación. Esto se definió ya que la mayoría de las probetas fallaban cerca de esta cantidad de deformación.

El esfuerzo de fluencia, módulo elástico de compresión, y esfuerzo máximo al 32% de deformación, para cada caso se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Parámetros calculados para cada caso en estudio.

Caso	σ_0 [MPa] (std)	E_{comp} [GPa] (std)	$\sigma_{32\%}$ [MPa] (std)
1O1F	44.58 (2.17)	1.19 (0.03)	142.4 (3.1)
2O2F	38.77 (3.61)	1.14 (0.14)	148.8 (3.6)
3O3F	38.36 (2.57)	1.02 (0.16)	147.2 (8.5)
FF	30.13 (0)	0.87 (0)	109.7 (0)

Como se observa en la Figura 4.3, las curvas para todos los casos tienen una zona elástica ubicada al inicio de éstas (hasta una deformación de 0.04 aproximadamente), y luego una zona de deformación plástica, por lo que, al haber 2 zonas aproximadamente rectas, el esfuerzo de fluencia fue calculado como la intersección de rectas tangentes a cada zona mencionada, como fue explicado en la sección 3.1.3.

En la Figura 4.4 se muestran imágenes de fallas de probetas debido a la compresión interlaminar.

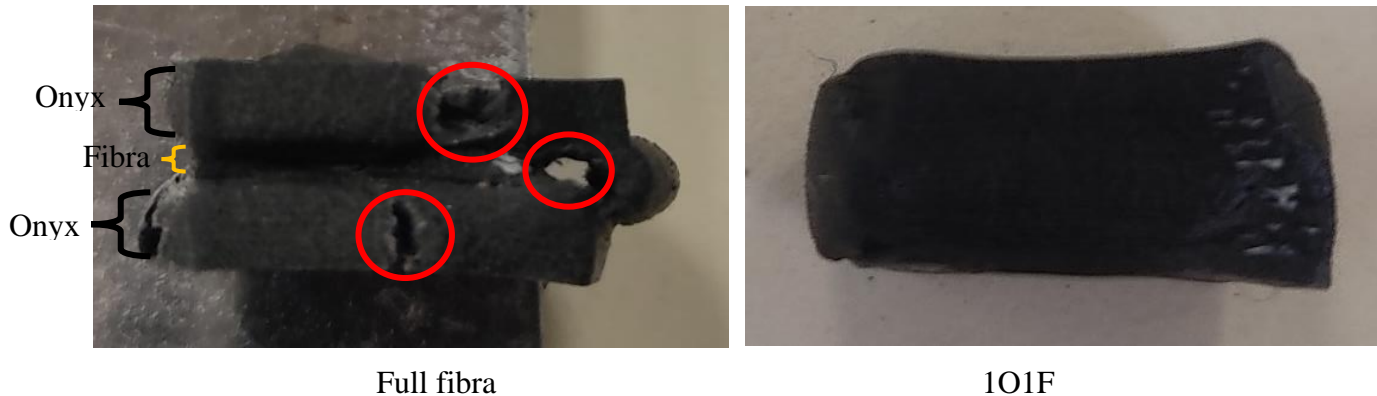


Figura 4.4: Fallas de probetas debido a compresión interlaminar. A la izquierda el caso full fibra. A la derecha el caso 1O1F.

Se observa que la falla de la probeta del caso full fibra tiene varias grietas, y deformaciones mayores debido a éstas, señaladas en los círculos de color rojo, a diferencia de la probeta del caso 1O1F. Esto se debe a que la probeta full fibra, para tener un volumen de fibra similar a las de los otros casos, se ubicaron todas las capas de fibra al centro de ésta, por lo que en la parte superior e inferior de la probeta hay sólo láminas de Onyx, las cuales son las que sufren mayores deformaciones y grietas, mientras que en el centro de ésta prácticamente no hay grietas a simple vista. Por el contrario, la probeta 1O1F tiene todas las capas de refuerzo distribuidas a lo largo del espesor, lo que evita que se generen grietas mayores en las láminas de Onyx.

Este comportamiento se puede apreciar también en la curva de esfuerzo deformación, donde el caso full fibra es el que tiene el menor módulo elástico, y menor esfuerzo de fluencia, en comparación con los casos 1O1F, 2O2F y 3O3F.

El hecho de que el caso 1O1F tenga el esfuerzo de fluencia mayor se atribuye al mismo efecto, de que por ejemplo en el caso 3O3F, las láminas de fibra de Onyx tienen mayor espesor, lo que hace que sean más “débiles” para la compresión interlaminar, resultando en un menor esfuerzo de fluencia.

En la Figura 4.5 se muestran los especímenes luego de ser ensayados para los 3 casos de distribución de fibra, como es señalado. Se observa que todos los especímenes se deforman más en la dirección perpendicular a las fibras a que en dirección paralela. Esto se debe a que la fibra ofrece menor resistencia en esta dirección, por lo que se deduce que un laminado de $\pm 90^\circ$ debería ser más resistente a la compresión interlaminar.



Figura 4.5: Especímenes ensayados en compresión interlaminar.

De acuerdo con lo anterior, las probetas que tengan mayor cantidad de láminas de Onyx de forma consecutiva resisten menor compresión fuera del plano, pero esto es ya que el Onyx tiene más “espacio” para deformarse, lo cual genera lo mostrado en la Figura 4.4. Por lo tanto, como la resistencia a la compresión depende finalmente de cuánta cantidad de láminas consecutivas de Onyx hay, este ensayo no es un buen indicador de la adherencia o resistencia interlaminar, por lo que no se utiliza como criterio para definir el mejor laminado.

4.1.3 Flexión de viga corta

En la Figura 4.6 se muestra el gráfico de Esfuerzo de corte interlaminar v/s desplazamiento de los cabezales para el ensayo de flexión de viga corta. Se observa, al igual que en los ensayos de tracción fuera del plano, que al aumentar las láminas de Onyx entre láminas de refuerzo continuo, aumenta el esfuerzo máximo de corte interlaminar.

Este comportamiento se puede apreciar de mejor manera en la Figura 4.7, donde se realizó un gráfico comparativo con los valores máximos obtenidos. Se observa que, si bien los casos 101F y 202F son similares, hay un claro aumento en todos los especímenes del caso 303F, generando un aumento del 21.88% entre los promedios de los laminados 101F y 303F. Si bien el comportamiento se asemeja a uno exponencial a simple vista, no se tienen datos suficientes para asegurar esto, ya que habría que realizar ensayos por ejemplo de 404F y 505F para poder afirmar cuál es el tipo de comportamiento. Por este motivo se muestra una línea recta, cuyo objetivo es indicar la tendencia aumentar la resistencia a medida que aumentan las láminas de refuerzo entre matriz. Los valores de esfuerzo de corte interlaminar máximo se muestran en la Tabla 4.3.

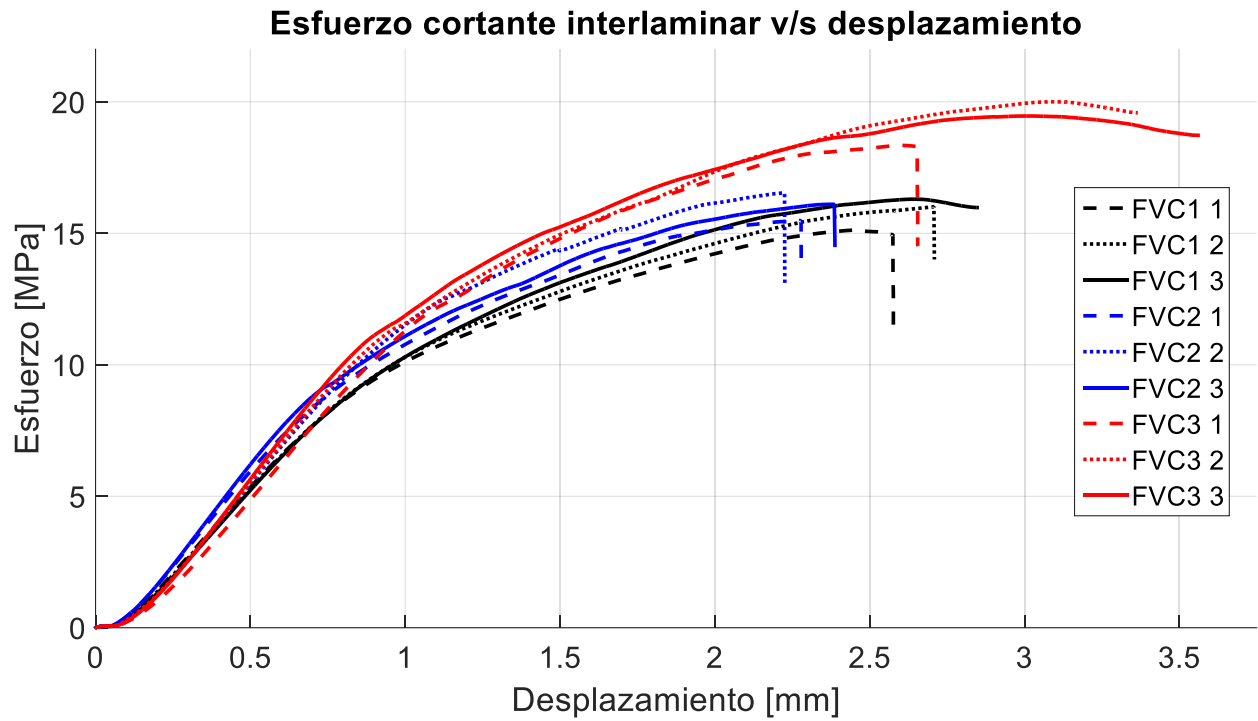


Figura 4.6: Curvas de Esfuerzo v/s desplazamiento para el ensayo de Flexión de viga corta

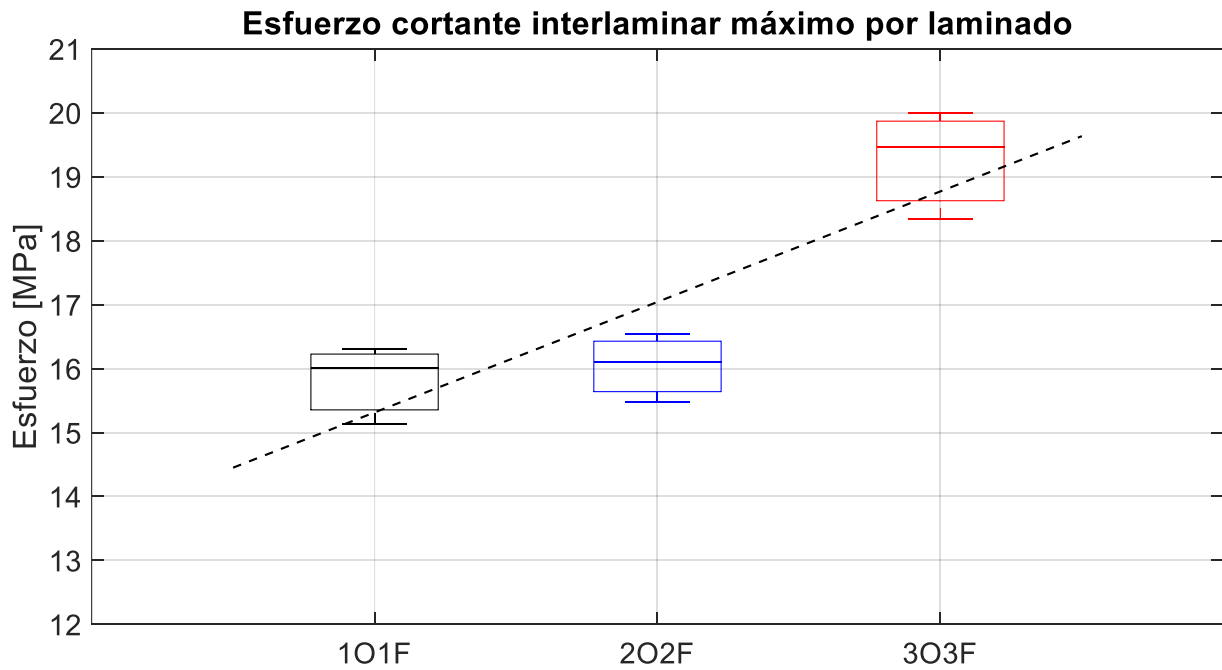


Figura 4.7: Gráfico comparativo de máximos valores obtenidos en el ensayo de Flexión de viga corta

Tabla 4.3: Esfuerzo cortante interlaminar máximo para cada caso.

Caso	τ_{ILSS} [MPa]	Caso	τ_{ILSS} [MPa]	Caso	τ_{ILSS} [MPa]
FVC 1_1	15.14	FVC 2_1	15.48	FVC 3_1	18.35
FVC 1_2	16.01	FVC 2_2	16.54	FVC 3_2	20.01
FVC 1_3	16.30	FVC 2_3	16.11	FVC 3_3	19.46
Promedio (std)	15.81 (0.606)	Promedio (std)	16.04 (0.529)	Promedio (std)	19.27 (0.846)

Para este ensayo se apreciaron 2 tipos de falla mostrados en la Figura 4.8, donde la falla mostrada en la imagen superior corresponde a un fallo repentino y frágil, mientras que la falla mostrada en la imagen inferior corresponde a un fallo más dúctil, donde disminuye progresivamente el esfuerzo máximo y se observan las delaminaciones. Esto también se pudo apreciar en las curvas mostradas en la Figura 4.6, donde las probetas FVC3_2, FVC3_3 y FVC1_3 tienden a disminuir el esfuerzo máximo de corte de manera progresiva, a diferencia del resto de probetas donde la falla es frágil y repentina.

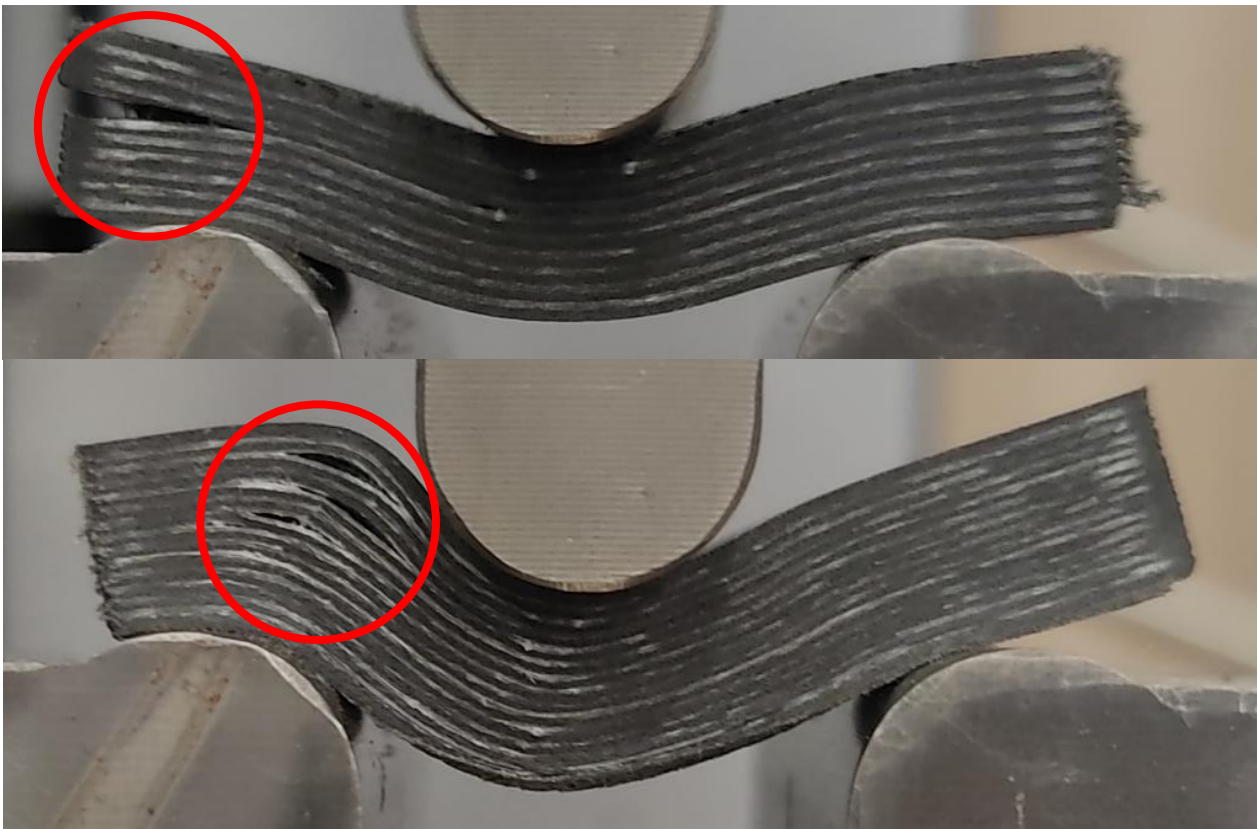


Figura 4.8: Modos de falla del ensayo de flexión de viga corta.

4.2 Tratamientos térmicos

4.2.1 Resistencia interlaminar

Como se explicó en la sección anterior, el laminado con mejor resistencia a la tracción interlaminar y flexión de viga corta corresponde al 3O3F, por lo tanto, éste se selecciona para realizar los tratamientos térmicos.

En la Figura 4.9, Figura 4.10 y Figura 4.11 se muestran las curvas esfuerzo - desplazamiento de los ensayos de flexión de viga corta para las probetas tratadas térmicamente a las temperaturas señaladas (100, 150, 175 °C) a los tiempos de tratamiento correspondiente (1, 3, 6 y 8 h). También se incluye la curva del caso sin tratamiento térmico. Se recuerda que de acuerdo con la norma ASTM D2334/D2334M el valor de importancia en el ensayo de flexión de viga corta corresponde a el máximo alcanzado por las curvas. También se recuerda que la nomenclatura indica las horas de tratamiento seguido del número de la probeta, por lo tanto, la nomenclatura 1H-2 se refiere al tratamiento térmico aplicado durante 1 hora, a la probeta 2.

Para los 3 casos de temperatura se observa que la resistencia al corte interlaminar aumenta a medida que aumentan las horas de tratamiento térmico, lo que genera que en el caso de 100°C se alcance la máxima resistencia a las 8 horas de tratamiento, y en el caso de 150°C y 175°C se alcance la máxima resistencia a las 6 horas de tratamiento.

Un comportamiento interesante que se observa en los gráficos de los casos de 150°C y 175°C es que, a las 8 horas de tratamiento térmico, la resistencia al corte interlaminar disminuye con respecto al caso de 6 horas de tratamiento. Es posible que este comportamiento sea debido a que lo que hace el tratamiento térmico es reordenar internamente la matriz y la fibra, haciendo que se reduzcan los vacíos y se mejore la adherencia interlaminar, sin embargo, puede llegar un punto en el cual se alcance el reordenamiento más eficiente y tratar más tiempo las probetas provoque un efecto opuesto y reduzca la resistencia al corte interlaminar.

Wang et al. (2021) también observan este comportamiento, ya que, si bien ellos no evalúan la resistencia al corte interlaminar, sus resultados muestran una disminución de 300 MPa a 250 MPa de resistencia a la flexión (ensayo diferente a flexión de viga corta) cuando la temperatura aumenta de 150°C a 200°C para un laminado con láminas de refuerzo intercaladas con láminas de matriz (con 4 horas de tratamiento).

Estos autores también varían la cantidad de horas de tratamiento, para las temperaturas de 100°C y 150°C, donde para la resistencia a la flexión obtienen el mismo comportamiento obtenido el presente estudio para el caso de 100°C, alcanzando un máximo a las 8 horas de tratamiento; sin embargo, para el caso de 150°C ellos solamente prueban hasta 4 horas, obteniendo un máximo a este tiempo, por lo que para esta temperatura no hay punto de comparación con lo realizado.

Pascual et al. (2021) observan una disminución de la resistencia al corte interlaminar en temperaturas más elevadas, entre los 230°C y los 250°C. Si bien finalmente igual observan este comportamiento de disminuir la resistencia interlaminar al aumentar la temperatura, estos autores realizan los tratamientos

mediante platos calientes que aplican una presión de 1 MPa durante 15 minutos, lo cual es una metodología completamente diferente a la utilizada en el presente estudio, y por Wang et al. (2021), ya que los tratamientos térmicos de ambos fueron realizados con horno. Por este motivo, Pascual et al. (2021) observan este fenómeno a temperaturas mas elevadas, debido al tiempo y la forma de aplicación.

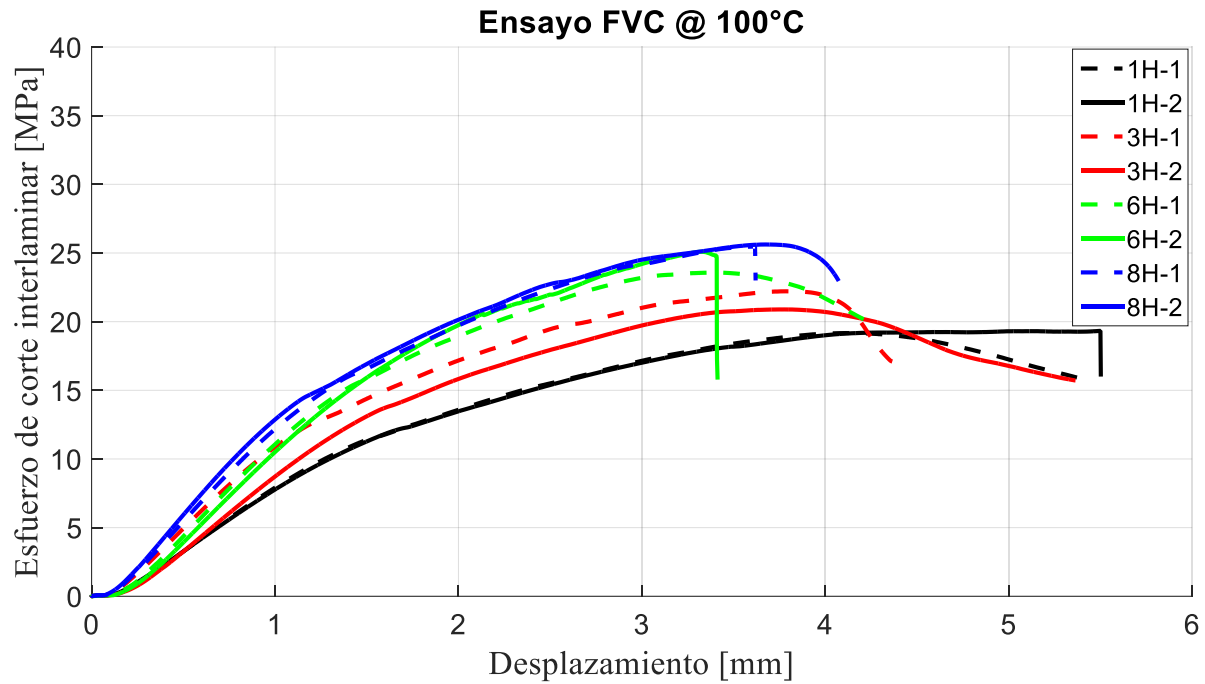


Figura 4.9: Resultados de flexión de viga corta para probetas tratadas a 100°C

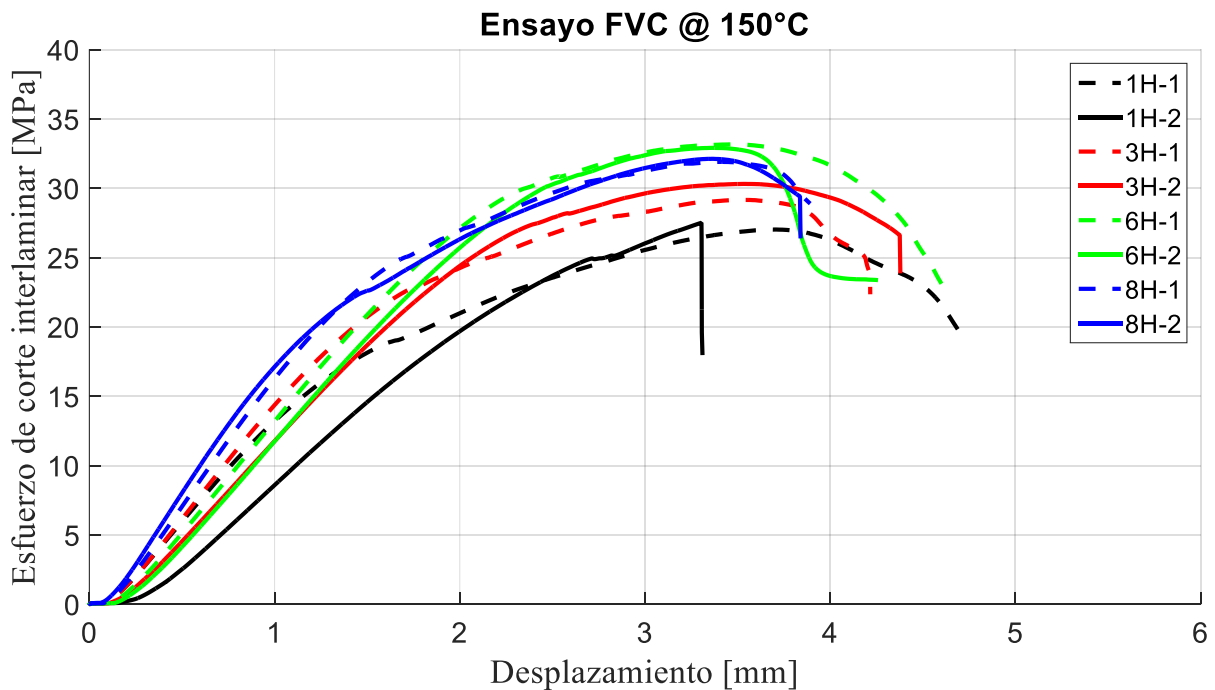


Figura 4.10: Resultados de flexión de viga corta para probetas tratadas a 150°C

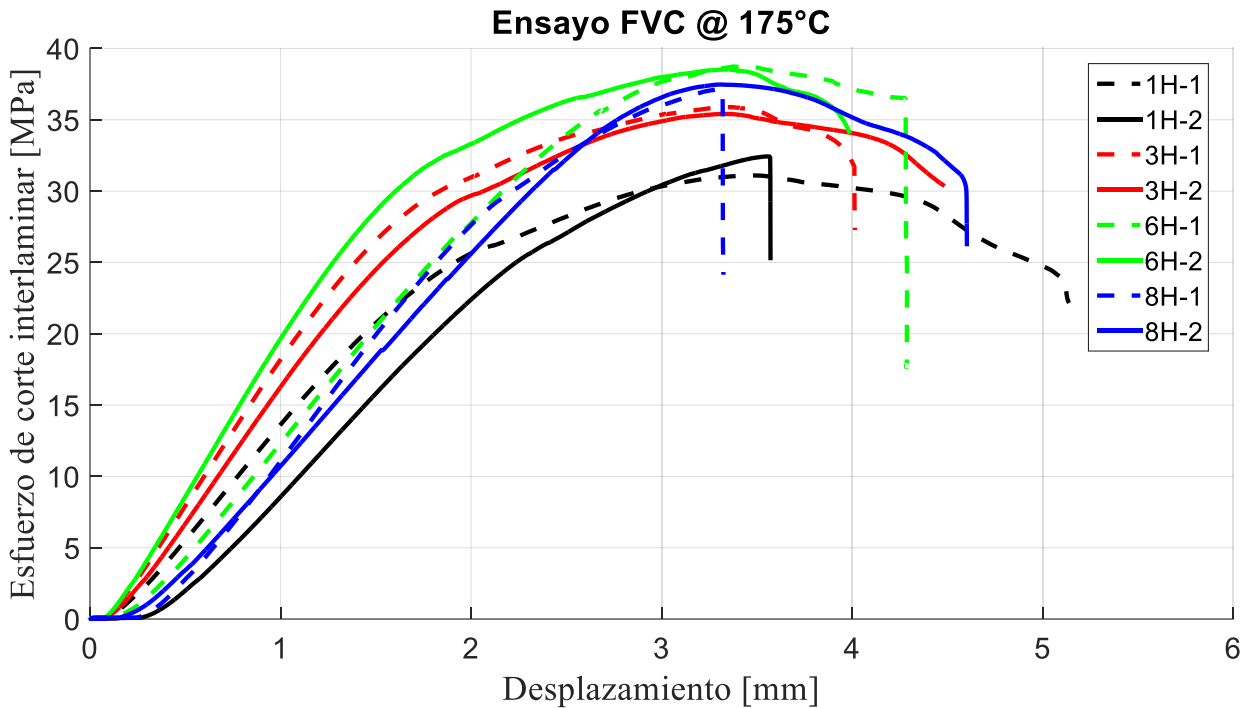


Figura 4.11: Resultados de flexión de viga corta para probetas tratadas a 175°C

En la Figura 4.12 se observan las probetas una vez retiradas del horno para el caso de 200°C durante 1h. Se observa que las probetas experimentaron grandes deformaciones las cuales hacen inviable el tratamiento térmico a esta temperatura. Este caso demuestra lo comentado anteriormente, de que llega un punto en el cual el tratamiento térmico deja de ser beneficioso, generando que el reordenamiento entre matriz y fibra perjudique la resistencia interlaminar, y en este caso extremo la integridad de las probetas.



Figura 4.12: Probetas tratadas térmicamente a 200°C durante 1h.

En la Figura 4.13 se observa un gráfico comparativo con los resultados de mayor resistencia mecánica al corte interlaminar el cada caso. Se observa que los mejores resultados se obtuvieron a 8H para 100°C, a 6H para 150°C y a 6H para 175°C. En la Tabla 4.4 se muestran los valores máximos de los casos señalados en la Figura 4.13 (Promedio entre los 2 especímenes). También se muestra la resistencia interlaminar de los laminados 1O1F y 3O3F (sin tratamiento térmico), los cuales corresponden a los laminados de menor y mayor resistencia al corte interlaminar respectivamente, sin tratamiento térmico.

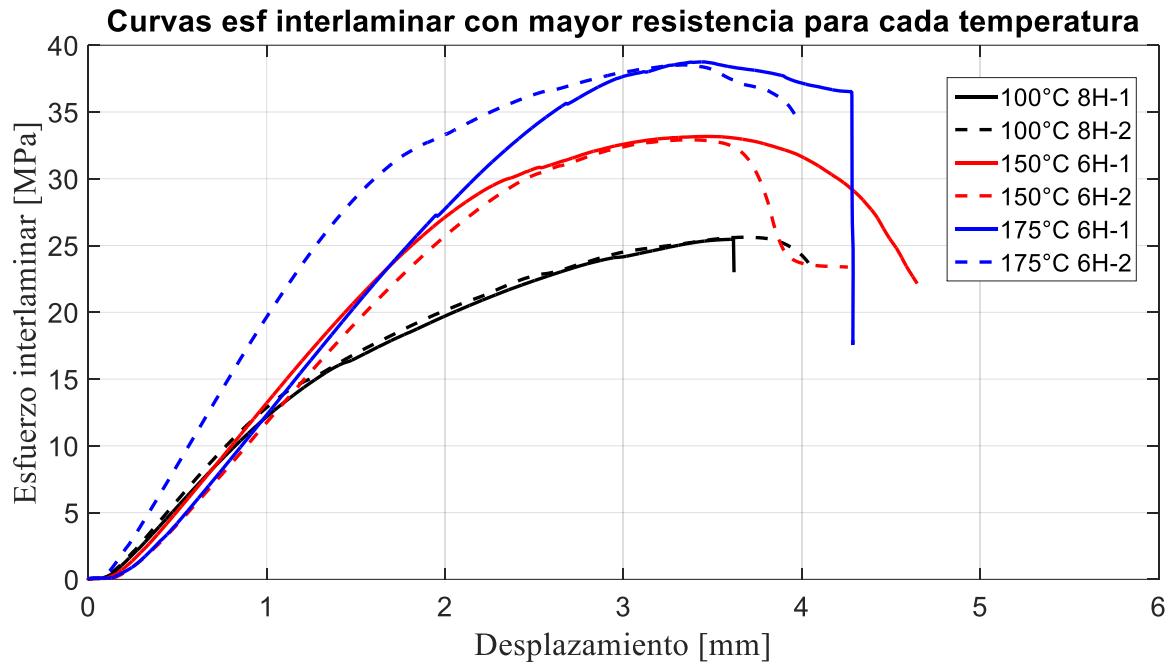


Figura 4.13: Curvas con mayor resistencia al corte interlaminar para cada temperatura de tratamiento térmico.

Tabla 4.4: Valores máximos de resistencia al corte interlaminar.

Tratamiento térmico	τ_{ILSS} [MPa]
Sin tt (1O1F)	15.81
Sin tt (3O3F)	19.27
100 °C (8H)	25.62
150°C (6H)	33.17
175°C (6H)	38.75

Se observa que en los 3 casos de tratamiento térmico se obtiene un valor mayor al caso sin tratamiento térmico con el mismo laminado. También se observa que, con el mejor caso (175°C durante 6h) en comparación con el mismo laminado, pero sin tratamiento térmico se obtiene una mejora de **101.09%** (con respecto al caso sin tt). La mejora total, considerando variación de los refuerzos y tratamiento térmico, se obtiene al comparar el caso de 175°C durante 6h, con el laminado 1O1F, obteniendo una mejora del **145.10%** (con respecto al laminado 1O1F).

4.2.2 Distorsión geométrica y cambios de masa

Con respecto a los cambios de masa, en la Figura 4.14 se muestra un gráfico donde se observa el cambio porcentual de masa con respecto a la masa inicial de las probetas, antes de que entraran al horno. Se observa que para el caso de 100°C no se tienen mayores variaciones, salvo para el caso de 8 horas donde se tiene una variación de masa de **-0.59%**. Se aprecia también que hay mayor pérdida de masa al aumentar la temperatura en todos los casos. Esto se debe a que, al ser materiales bastantes porosos, éstos son propensos a absorber hasta un 8% de la humedad ambiente (Pascual et al. (2020)), siendo esta humedad la que se elimina al realizar tratamiento térmico, y se elimina en mayor medida al aumentar la temperatura. El caso que pierde mayor masa es el tratamiento a 175°C durante 8 horas con una pérdida del **3.35%** del valor de masa inicial. Este valor muestra la diferencia de masa entre cada caso, pero al ser menor al 5% del peso se considera un cambio despreciable en las probetas.

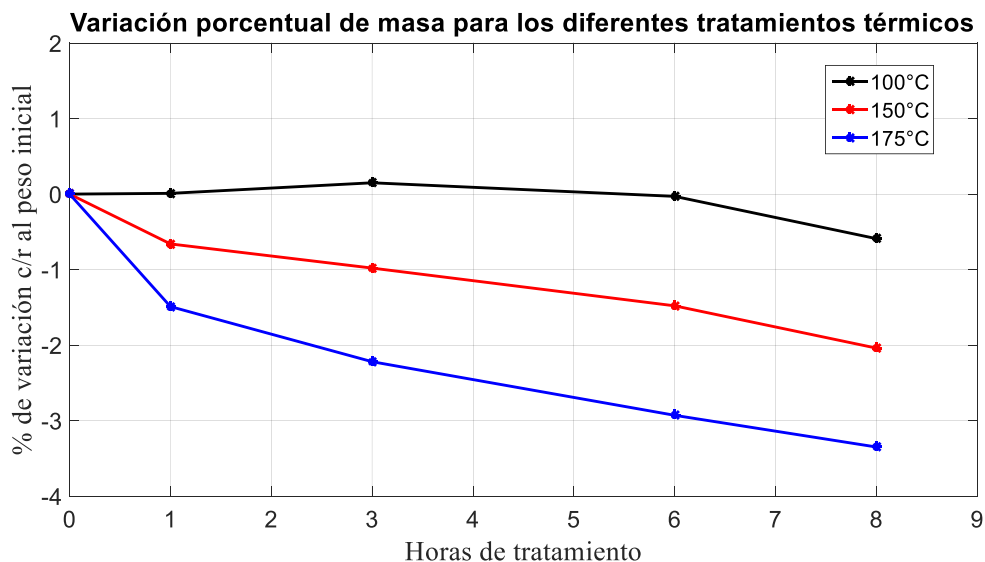


Figura 4.14: Variación porcentual de masa para las diferentes temperaturas para las diferentes horas de tratamiento.

Con respecto a la distorsión geométrica, el cambio más grande fue mostrado con las probetas de 200°C, en la Figura 4.12, donde se observan las grandes deformaciones del Onyx debido a la alta temperatura. En el resto de los casos las variaciones geométricas se mantuvieron despreciables, del orden del 1%, pero sin un sentido lógico con respecto a la temperatura, ni a la cantidad de horas de tratamiento térmico, por lo tanto, esta pequeña diferencia se atribuye a errores del instrumento y errores humanos. Estos resultados son totalmente opuestos a lo obtenido por Pascual-Gonzales et al. (2021), mostrado en la Figura 4.15, donde se obtuvieron variaciones de cercanas hasta el 30% de la dimensión nominal en el espesor. Estas variaciones, sin embargo, se deben a que estos autores aplican la temperatura en platos calientes con una presión de 1 MPa, por lo que, al calentar las probetas, se generan estas deformaciones debido a la presión de los platos, pero no directamente con la temperatura.

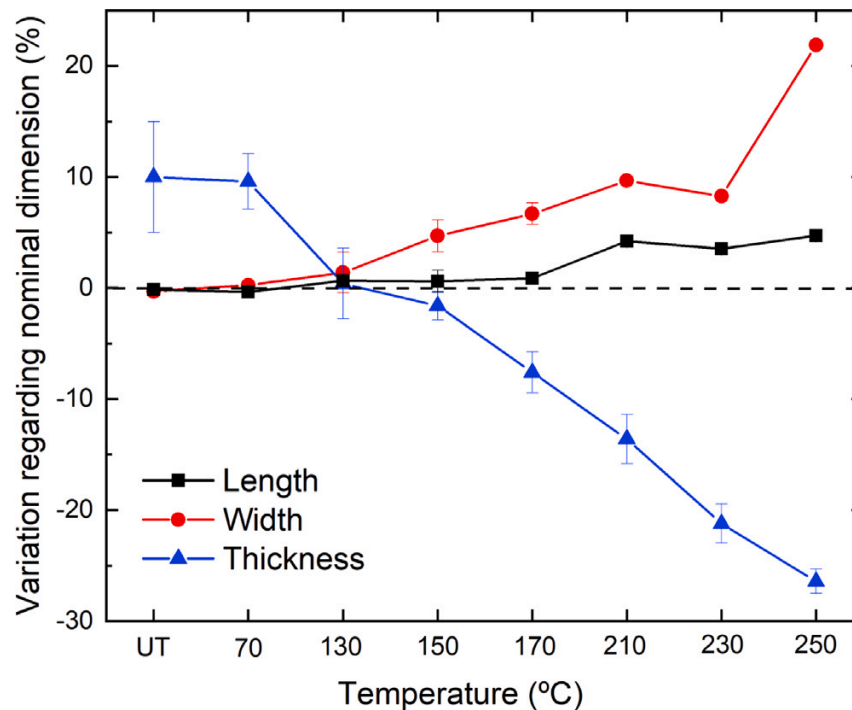


Figura 4.15: Distorsión geométrica a diferentes temperaturas. Fuente: Pascual-Gonzales et al. (2021).

4.2.3 Resultados de micrografías

Los resultados de reducción de porosidad obtenidos por análisis de microscopía óptica y procesamiento de imágenes en el software ImageJ se representan en la Tabla 4.5. Es posible observar que se encontraron dos tipos de porosidad, las cuales se clasificaron como porosidad de fibra y porosidad de matriz. La dispersión en la matriz se debe principalmente a la preparación de la muestra mediante el desprendimiento del refuerzo de fibra corta con lijado y posterior pulido. Lo anterior muestra una tasa de porosidad sin variación significativa en las muestras tratadas térmicamente y no tratadas térmicamente, respectivamente. Sin embargo, la porosidad de la fibra afecta directamente la resistencia interfacial porque interactúa con la interfaz fibra/matriz, y los vacíos se reducen significativamente con el tratamiento térmico (consulte la Figura 4.16). En base a los resultados obtenidos del tratamiento térmico, se deduce que la resistencia interfacial está fuertemente relacionada con la porosidad producida en la fibra durante el proceso de fabricación aditiva por el método de fabricación de filamentos fundidos (FFF).

Tabla 4.5: Porcentajes de vacíos calculados con el software ImageJ

Temperatura	Sin TT	100 °C	150 °C	175 °C
Porosidad en la matriz	10.73%	10.42%	9.62%	8.28%
Porosidad en la fibra	6.58	4.11	2.90	1.83
Porosidad total	17.31	14.53	12.52	10.11

La relación entre la temperatura y la reducción de la porosidad en la fibra se atribuye a la actividad molecular; por lo tanto, cuanto mayor es la temperatura, más intensa es la actividad molecular y más se reduce la porosidad al aumentar la difusión del enredo entre la fibra y la matriz. La Figura 4.16 muestra la morfología y el efecto del tratamiento térmico sobre la porosidad con un aumento de 200x. La Figura 4.16.a muestra la muestra 3O3F sin tratamiento térmico y con la porosidad característica en la fibra. A medida que se aumenta el tratamiento térmico se observa como el efecto de entrelazamiento cubre la porosidad. Para la temperatura de 100°C, se observa que la energía de activación molecular es baja, por lo que la porosidad no se cubre en su totalidad, resultando en un cambio insignificante en la resistencia interlaminar (ver Tabla 4.4). Por el contrario, para las muestras tratadas térmicamente a 150 °C y 175 °C, se observa un enredo completo y una reducción en el tamaño de la porosidad. El aumento de la resistencia interlaminar con la reducción del espesor obtenido en este estudio es consistente con los resultados obtenidos por Hart et al., validando así estos hallazgos. Los resultados de densidad indicaron que la densidad aumentó con un aumento en la temperatura del tratamiento térmico. Este aumento de densidad se atribuye a la reducción de la porosidad manteniendo el volumen constante, lo que se corresponde con los resultados de microscopía óptica observados en la Tabla 4.5 y la Figura 4.16.

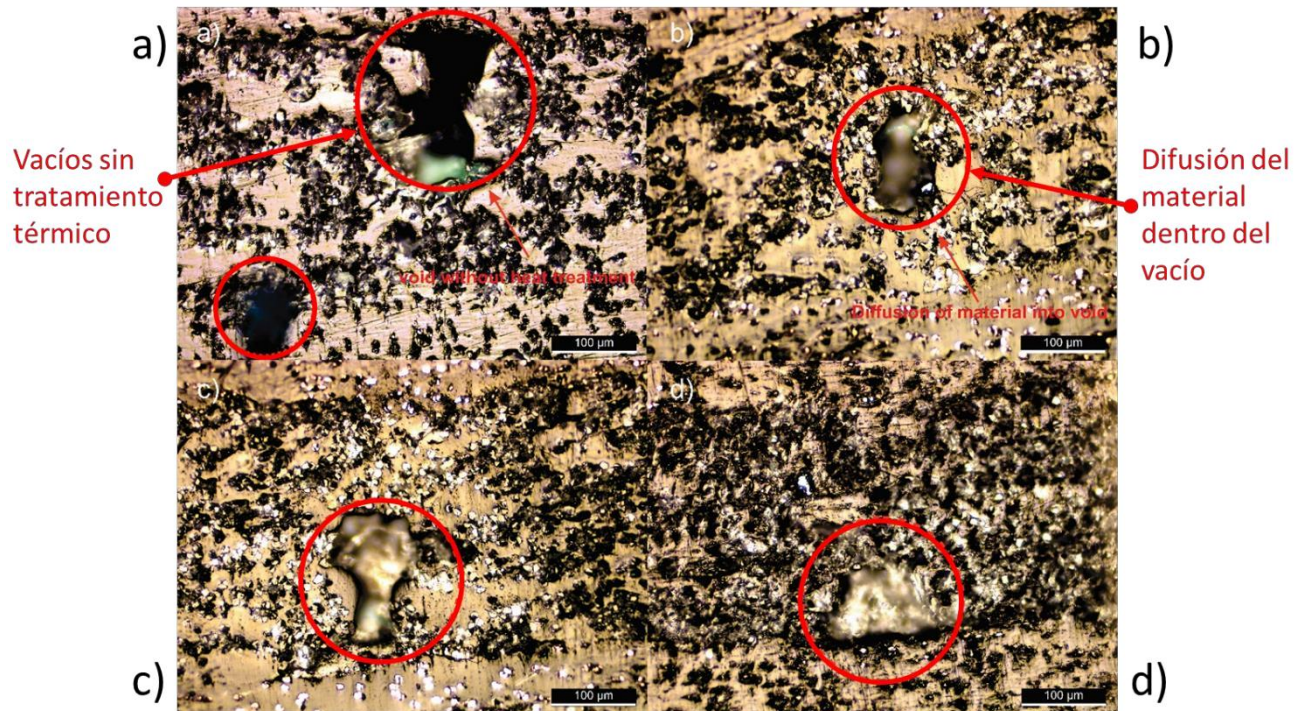


Figura 4.16: Porosidad en muestras 3O3F mecánicamente caracterizadas: a) sin TT; b) 100°C 6h; c) 150°C 6h; d) 175°C 6h.

CAPÍTULO 5: Conclusiones

Con respecto a los resultados comentados anteriormente se deducen las siguientes conclusiones:

5.1 Con respecto a la hipótesis

Recordando del capítulo 2, la hipótesis planteada es *“La adición de láminas de matriz entre láminas de fibra continua, junto con un tratamiento térmico de 150°C durante 8h mejora las propiedades interlaminares en un 150%”*.

Como se observa en los resultados mostrados, para el tratamiento de 150 °C, y para el laminado 3O3F, se obtiene una mejora del 109.80% con respecto al caso con laminado 1O1F sin tratamiento térmico, sin embargo, se obtiene una mejora del 145.10% para el tratamiento de 175°C con el laminado 3O3F, y esta mejora ocurre a las 6 horas, ya que a las 8 horas el valor de resistencia mecánica disminuye.

Por lo tanto, no se logra la mejora mecánica planteada en la hipótesis, y la mejora total, no se logra ni al tiempo ni a la temperatura esperada. El hecho de que se logre a las 6 horas se debe a que al estar las probetas expuestas durante mayor tiempo empieza a escurrir el Onyx, lo que afecta la adherencia interlaminar, generando que se disminuyan las propiedades mecánicas en vez de mejorar. Este hecho se observa de mejor manera para el caso de 200°C donde se deforma de gran manera el Onyx de las probetas.

5.2 Con respecto a los objetivos

[OE1]: Definir tipos de distribuciones de refuerzos de fibra a analizar.

Se definieron las distribuciones de refuerzo de fibra del tipo 1O1F, 2O2F, y 3O3F, esto debido a lo que señala la literatura relacionada con la variación de los vacíos al cambiar la distribución de la fibra, ya que se estipula que al aumentar las capas de Onyx entre láminas de refuerzo se disminuyen los vacíos, mejorando las propiedades mecánicas de las probetas, hecho demostrado de acuerdo con los resultados, obteniendo una mejora del 21.88%.

[OE2]: Realizar ensayos de tracción fuera del plano, compresión fuera del plano, y flexión de viga corta con las distribuciones de refuerzo de fibra definidas.

Se realizaron los ensayos mencionados de acuerdo con lo señalado por las normas existentes para cada ensayo, las cuales están hechas para materiales compuestos manufacturados por procesos de fabricación convencionales, y también con las recomendaciones de autores que han realizado estos ensayos. También se realizó un diseño iterativo de las probetas, por ejemplo, de las probetas del ensayo tracción fuera del plano, donde en primera instancia se utilizaron pestañas de PLA pegadas con un adhesivo epóxico, pero finalmente se utilizan pestañas impresas directamente con las probetas.

[OE3]: Seleccionar la distribución de refuerzos de fibra que genera mayor resistencia interlaminar.

De acuerdo con los resultados obtenidos por los ensayos de tracción fuera del plano, y flexión de viga corta, la distribución de refuerzos de fibra que genera mayor resistencia interlaminar es la configuración 3O3F, obteniendo mejores resultados en ambos ensayos. El ensayo de compresión fuera del plano no se utiliza como referencia para evaluar el comportamiento interlaminar, ya que el resultado de este ensayo depende del espesor de las láminas de Onyx, ya que éste falla antes que la interfaz entre Onyx y fibra de vidrio.

[OE4]: Precisar y llevar a cabo tratamientos térmicos a evaluar de acuerdo con la distribución de fibra seleccionada.

Se precisan los tratamientos térmicos a realizar de acuerdo con los trabajos de los autores Pascual-Gonzales et al. (2021), y Wang et al. (2021). Éstos corresponden a realizar tratamientos térmicos durante 1, 3, 6, y 8 horas, para las temperaturas de 100, 150, 175 y 200 °C.

[OE5]: Analizar las probetas tratadas térmicamente mediante ensayos mecánicos interlaminares y análisis micro mecánicos.

El tratamiento con mejores resultados corresponde a 175°C durante 6 horas, donde se obtuvo una mejora del 101.10% con respecto al mismo laminado sin tratamiento térmico, una mejora del 51.25% con respecto al caso de 100°C, y una mejora del 16.82% con respecto al caso de 150°C. Todos estos resultados en el ensayo de flexión de viga corta aplicados a las probetas. Para el caso de 200°C el Onyx de las probetas se deformó de gran manera, dejando a éstas inviables para ensayar. Con respecto a los cambios de masa se observa que las probetas pierden más masa a medida que aumenta la temperatura y las horas de tratamiento, generando pérdidas de masa de hasta el 3.35% en el caso de 175°C durante 8H. Este valor porcentual se considera despreciable en comparación con el peso total de la probeta.

Los cambios dimensionales son despreciables en todos los casos, lo cual es opuesto a lo obtenido por Pascual Gonzales et al. (2021). Ésta diferencia se debe a la presión de 1 MPa aplicada por los platos clientes que utilizan estos autores, a diferencia del procedimiento realizado en este estudio en donde se utiliza un horno tubular eléctrico a presión atmosférica. Se observa una reducción notable de los vacíos encontrados en las probetas, desde 18 % aproximadamente de vacíos en los casos sin tratamiento y de 100°C, hasta valores cercanos al 13% de vacíos en los casos de 150 °C y 175 °C. Se observan también visualmente las reducciones en los vacíos en las micrografías expuestas, donde en los bordes se generan grandes vacíos, que disminuyen al realizar los tratamientos.

5.3 Trabajos futuros

Para trabajos futuros relacionados con los materiales compuestos con fibra continua impresos en 3D, se recomienda el estudio de la humedad contenida en las probetas, ya que éste estudio podría explicar con más detalle la reducción de masa observada en los tratamientos térmicos, y también analizar la resistencia mecánica al exponer probetas a diferentes ambientes de humedad. También se podría analizar la viabilidad de fabricar objetos con estos materiales que puedan realizar funciones en diferentes condiciones de humedad. Por otro lado, el analizar este factor sirve como caracterización para este tipo de materiales, ya que prácticamente no existen trabajos científicos relacionados con las propiedades higroscópicas.

Referencias

- Abadi H. A., Thai H. T., Cole V. P., Patel V. I. (2018). Elastic properties con 3D printed fiber reinforced structures. *Composite Structures*, 193, 8-18.
- Araya et al. (2018). Evaluation of compressive and flexural properties of continuous fiber fabrication additive manufacturing technology. *Additive Manufacturing*, 22, 157–164.
- 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, 176–186.
- Caminero M.A., Chacón J.M., Moreno I.G., Reverte J.M. (2018) Interlaminar bonding performance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. *Polymer Testing*, 68, 415-423.
- Fernandes R. R., Tamijani A. Y., Al-Haik M. (2021). Mechanical characterization of additively manufactured fiber-reinforced composites. *Aerospace Science and Technology*, 113, 106653.
- Fleischer et al. (2018). Composite materials parts manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 67, 603–626.
- Goh G. D. et al. (2018). Characterization of mechanical properties and fracture mode of additively manufactured carbon fiber and glass fiber reinforced thermoplastics. *Materials and design*, 137, 79-89.
- Hsissou et al. (2021). Polymer composite materials: A comprehensive review. *Composite Structures*, 262, 113640.
- Iragi M. et al. (2019). Ply and interlaminar behaviours of 3D printed continuous carbon fibre-reinforced thermoplastic laminates; effects of processing conditions and microstructure. *Additive manufacturing*, 30,100884.
- Justo J., Távara L., García G. L., París F., (2018). Characterization of 3D printed long fibre reinforced composites. *Composite Structures*, 185, 537-548.
- 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. *Composites structures*, 232, 11476.
- Kim B. C. et al. (2010). Through-thickness compressive strength of a carbon/epoxy composite laminate. *Composite Structures*, 92, 480-487
- Klift et al. (2016). 3D Printing of Continuous Carbon Fibre Reinforced Thermo-Plastic (CFRTP) Tensile Test Specimens. *Open Journal of Composite Materials*, 6, 18-27.
- Rajak D. K., Pagar D. D., Kumar R., Pruncu C. I. (2019). Recent Progress of reinforcement materials: a comprehensive overview of composite materials. *J Mater Res Technol*, 8, 6354-6374.
- San Juan V. et al. (2016). Evaluation of the fill yarns effect on the out-of-plane compressive fatigue

- behavior for an unidirectional glass fiber reinforced epoxy composite. *Composite structures*, 138.
- Pascual et al. (2020). An approach to analyse the factors behind the micromechanical response of 3D-printed composites. *Composites Part B*, 186, 107820.
- Pascual et al. (2021). Post-processing effects on microstructure, interlaminar and thermal properties of 3D printed continuous carbon fibre composites. *Composites Part B*, 210, 108652.
- Pyl L., Kalteremidou K. A., Hemelrijck D. V. (2018). Exploration of specimen geometry and tab configuration for tensile testing exploiting the potential of 3D printing freeform shape continuous carbon fibre-reinforced nylon matrix composites. *Polymer Testin*, 71, 318–328.
- Wang et al. (2021). Heat-treatment effects on dimensional stability and mechanical properties of 3D printed continuous carbon fiber-reinforced composites. *Composites Part A*, 147, 106460.
- Yaragatti N., & Patnaik, A. (2020). A review on additive manufacturing of polymers composites. *Materials Today: Proceedings*.
- Yavas D., Zhang Z., Liu Q., Wu D. (2021). Interlaminar shear behavior of continuous and short fiber reinforced polymer composites fabricated by additive manufacturing. *Composites Part B*, 204, 108460.