

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE
MATERIALES**



**UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA**

**“Evaluación de las propiedades
mecánicas de refuerzos en base a
polímero reforzado con fibras de
carbono (CFRP) para vigas de
madera.”**

Proyecto de trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos y reglamentos requeridos para obtener el título de Ingeniero Civil Metalúrgico.

Profesor Guía DIMM	MsC. Manuel Cabrera
Profesor Guía CCTVal	PhD. Christian
	Romero
Profesor Co-referente	Ing. Richard Ramírez

DIEGO EDUARDO SILVA EZQUERRA

JUNIO 2024

DEDICATORIA

A mis padres, y familia, tanto de sangre como la construida en el camino.

AGRADECIMIENTOS

Eterno agradecimiento a mis padres que han estado para mí apoyándome en todo momento y preocupándose por mí y siendo pilares en mi vida. A mi hermana que ha estado presente en este proceso para darme su apoyo. Es mi núcleo familiar y espero poder devolver la mano de tanto esfuerzo que han puesto en mi avance. Gracias por aguantar todos estos años de estudio y sobre todo en pandemia.

A mi pareja Fabiola, quien ha estado para mí en los peores momentos, al ser mi pilar fundamental en los meses más difíciles de este trabajo. Ser quien me ha acompañado hasta tarde y ha hecho mis días más simples. Mis más eternos agradecimientos. Es quien me saca una sonrisa y me motiva a seguir adelante.

A mis amigos, Renzo, Toro, Akshay, Herman, Josefina, José, Mango quienes llevé gran parte de este camino, los momentos dentro y fuera de la universidad tanto de estudio como de no tanto. Grandes amigos que hice durante el camino. Grandes personas, muy inteligentes y con capacidades fuera de lo común (y no solo en los estudios).

A Don Galvarino, quien siempre tuvo un consejo y una visión distinta a la común, una persona que siempre tuvo soluciones para diversas situaciones de la vida. Compartiendo una anécdota en todo momento. A los apoyos de laboratorio, Linda Mella por siempre estar dispuesta a ayudarme, tanto en mi trabajo de memoria como en las ayudantías, siempre dispuesta y estresada para dar lo mejor de sí. También a Luis que, si bien es más calmado, es igual de atento. Agradecer también a Felipe quien también es una increíble persona en manufactura.

Agradecer también a la gente del CCTVal, Johana, Felipe y César, sin ellos este trabajo nunca hubiese avanzado. Siempre dispuestos a ayudarme y tener los requerimientos lo antes posibles para que pudiese avanzar.

A mis compañeros metalúrgicos con los que compartí en el camino, grandes personas y futuros profesionales (y aquellos que ya lo son también). A mis

ayudantes quienes me enseñaron y a mis ayudados de hacer el camino más grato.

Agradecer a mis profesores del DIMM que siempre tuvieron una buena palabra, una motivación y enseñanzas. Me quedo contento con la cercanía con los alumnos que siempre tuvieron. Agradezco en gran medida al profesor Sergio Estay, quien me enseñó y me entregó el gusto por la metalurgia de materiales, además, confió en mí durante años para ser su ayudante.

A la gente que conocí en el camino universitario, a quienes están y también a quienes ya no pero que dejaron algo de ellos en mí.

Finalmente agradecer a mi profesor guía don Manuel Cabrera, quien fue un excelente guía y me entregó muchísimo conocimiento. Estoy eternamente agradecido por todo lo que hizo y por lo mucho que entregó y el tiempo que invirtió. Por su paciencia y los consejos en tiempos difíciles, y también por su acercamiento a la industria.

This work has been supported by **ANID PIA/APOYO AFB230003**

RESUMEN

En el campo de materiales para el mejoramiento de materiales para la construcción y la activa búsqueda de nuevos implementos para mejorar esta área, es que existe la necesidad de complementar materiales utilizados desde hace mucho tiempo con materiales modernos. Es por esto que el reforzamiento de vigas de madera con fibra de carbono es un avance en el desarrollo de nuevas tecnologías para la construcción combinando altas resistencias con bajo peso. Pudiendo, en estructuras de segundos pisos, poder aumentar la separación entre vigas y/o la luz, como aumentar la carga permanente.

Por lo que un reforzamiento en la zona de máxima tensión significaría un cambio en los esfuerzos aplicados en una viga. Centrando las posibles fallas tanto en fractura del material matriz como es la madera, como de la delaminación.

Esta tesis se enfoca en evaluar las propiedades mecánicas de refuerzos de CFRP en vigas de madera (pino radiata), para así mejorar la rigidez del compuesto. Para esto, se realizaron ensayos de flexión en tres puntos, y de tensión para medir la resistencia en adhesividad del compuesto.

En el caso de la flexión, realizaron siete sets de ensayos, abordando variables como el número, longitud y direccionalidad de capas de CFRP. Con los resultados se estudiaron las mejoras en cuanto a la resistencia a la flexión y aumento de rigidez con una madera sin reforzar en comparación a las distintas configuraciones reforzadas, donde mostraron mejoras significativas en todas estas. Por lo que se demuestra que, para el punto máximo de tensión por aplicación de carga en flexión, se disminuye la deflexión para un mismo esfuerzo gracias al refuerzo de CFRP. Esto se logra gracias a la combinación de la rigidez de la fibra de carbono el cual permite cambiar la inercia del conjunto y obtener propiedades más homogéneas en cuanto a las propiedades de cada material por sí solo.

Para adhesión se comparó dos tipos de tratamiento con indentación de mallas de tamiz para minerales sobre la madera, siendo un tamiz de granulometría gruesa de 3/8 in, y uno más fino de No. 14 ASTM y se comparó con madera cepillada. En general, el aumentar rugosidad mejoró la resistencia de la adhesión sustancialmente, siendo la malla de mayor apertura (3/8 in) la más efectiva con una resistencia de 2212 [N], triplicando la resistencia a la cepillada con 611 [N], mientras que la con apertura más pequeña duplicó la resistencia 1697 [N].

Estos hallazgos respaldan la eficacia del CFRP en mejorar las propiedades mecánicas de las vigas de madera, donde se aumenta tanto los esfuerzos aplicados como la rigidez, sugiriendo así su viabilidad en aplicaciones estructurales de vigas de madera para segundos pisos y contribuyendo al avance del conocimiento en el campo de los materiales compuestos con madera en Chile.

ABSTRACT

In the field of materials for the improvement of construction materials and the active search for new implements to enhance this area, there is a need to complement materials used for a long time with modern materials. This is why the reinforcement of wooden beams with carbon fiber represents an advancement in the development of new construction technologies, combining high strength with low weight. In second-story structures, it may be possible to increase the spacing between beams and/or the span, as well as to increase the permanent load.

Thus, reinforcement in the area of maximum tension would mean a change in the stresses applied to a beam, focusing potential failures both on the fracture of the matrix material, such as wood, and on delamination.

This thesis focuses on evaluating the mechanical properties of CFRP reinforcements in wooden beams (Radiata pine) to improve the composite's stiffness. For this purpose, three-point bending tests and tension tests were conducted to measure the adhesive strength of the composite.

In the case of bending, seven sets of tests were conducted, addressing variables such as the number, length, and directionality of CFRP layers. The results were used to study improvements in bending strength and increased stiffness compared to unreinforced wood and various reinforced configurations, all of which showed significant improvements. It is demonstrated that, at the point of maximum tension due to applied bending load, deflection decreases for the same stress thanks to the CFRP reinforcement. This is achieved through the combination of the stiffness of carbon fiber, which allows changing the inertia of the assembly and obtaining more homogeneous properties compared to the properties of each material alone.

For adhesion, two types of treatments were compared using mesh indentation for minerals on the wood, with a coarse mesh of 3/8 in granulometry and a finer No. 14 ASTM mesh, compared to planed wood. Generally, increasing roughness

substantially improved adhesion strength, with the larger aperture mesh (3/8 in) being the most effective, achieving a resistance of 2212 [N], tripling the resistance of the planed wood at 611 [N], while the smaller aperture mesh doubled the resistance to 1697 [N].

These findings support the efficacy of CFRP in improving the mechanical properties of wooden beams, increasing both the applied stresses and stiffness, suggesting its viability in structural applications in wood-beams for second floor and contributing to the advancement of knowledge in the field of composite materials with wood in Chile.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL	14
1.1 CONTEXTUALIZACIÓN.....	14
1.2 HIPÓTESIS	16
1.3 OBJETIVO GENERAL.....	17
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	18
2.1 FIBRA DE CARBONO	18
2.2 MADERA.....	23
2.3 RESINAS POLIMÉRICAS	27
2.3.1 APLICACIONES.....	28
2.3.2 CURADO.....	29
2.3.3 COMPUESTOS FIBROSOS	30
2.3.4 MÓDULO DE ELASTICIDAD MATERIALES COMPUESTOS	31
2.4 PROPIEDADES MECÁNICAS	32
2.4.1 ENSAYO DE FLEXIÓN	34
2.4.2 ENSAYO DE ADHESIÓN	39
2.5 ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS	40
2.5.1 INTRODUCCIÓN	40
2.5.2 ANÁLISIS TEÓRICO.....	41
2.5.3 EXPERIMENTOS REALIZADOS.	42
2.5.4 RESULTADOS.	43
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	46
3.1 MATERIALES UTILIZADOS	46
3.2 EQUIPOS A UTILIZAR	47
3.3 EXPERIMENTOS PRELIMINARES	48
3.4 ENSAYOS A REALIZAR Y MATRIZ EXPERIMENTAL	50
3.5 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	54
3.5.1 MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN 3D EN ANSYS STRUCTURAL.	54
3.5.2 ENSAYOS FLEXIÓN.....	55
3.5.3 ENSAYOS ADHESIÓN.....	58

3.5.4	TRATAMIENTO DE RESULTADOS	61
3.5.5	ANÁLISIS TEÓRICO.....	62
3.6	RESULTADOS ESPERADOS	63
CAPÍTULO 4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	64
4.1	CARACTERIZACIÓN MADERA.....	64
4.1.1	ENSAYO DE COMPRESIÓN	64
4.1.2	RESULTADOS ENSAYOS TENSIÓN.....	67
4.1.3	RESULTADOS ENSAYOS FLEXIÓN MADERA SIN REFORZAR	68
4.2	ENSAYOS ACTIVIDADES FLEXIÓN MADERA REFORZADA	70
4.3	RESULTADOS OBJETIVO ADHESIÓN	80
CAPÍTULO 5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83
5.1	CONCLUSIONES.....	83
5.2	RECOMENDACIONES	84
CAPÍTULO 6.	ANEXOS	85
	ANEXO 1: PROCESO DE MANUFACTURA DE PROBETAS	85
	ANEXO 2: EFECTO DE LAS VETAS EN LA MADERA.....	85
	ANEXO 3: NORMAS UTILIZADAS	87
	ANEXO 4: RESULTADOS EXPERIMENTOS.....	88
4.2.1	CONFIGURACIÓN: 1 CAPA , URDIMBRE, LARGO 450 [MM].....	88
4.2.2	CONFIGURACIÓN: 2 CAPAS, URDIMBRE, LARGO 410 [MM]....	91
4.2.3	CONFIGURACIÓN: 3 CAPAS , URDIMBRE, LARGO 410 [MM] ...	93
4.2.4	CONFIGURACIÓN: 2 CAPAS, URDIMBRE, LARGO 350 [MM] ...	95
4.2.5	CONFIGURACIÓN: 2 CAPAS, URDIMBRE, LARGO 100 [MM] ...	97
4.2.6	CONFIGURACIÓN: 2 CAPAS, TRAMA , LARGO 410 [MM].....	99
4.2.7	CONFIGURACIÓN: 2 CAPAS, BIDIRECCIONAL , LARGO 410 [MM]	101
	ANEXO 5: CÁLCULO DE CURVA TEÓRICA	103
CAPÍTULO 7.	REFERENCIAS	105

Figura 1 Esquema separación entre vigas para madera sin reforzar vs reforzada	14
Figura 2 Puente Santa Mónica reparado con CFRP [1].....	15
Figura 3 Arreglo cristalino del grafito. [4]	19
Figura 4 Estructura PAN. a) Estructura molecular del PAN. b) Estructura rígida.	19
Figura 5 Proceso de manufactura para fibras de carbono a base de poliacrilonitrilo (PAN). [1]	20
Figura 6 Tipos de tejido. a) Plano. b) y c) Twill. d) Satin	21
Figura 7 Esquematización de rollo comercial de tela de fibra de carbono.	22
Figura 8 Orientación Fibra de carbono [3]	22
Figura 9 Zonas de un tronco y dirección de crecimiento	24
Figura 10 Selección de árboles para obtención de madera. a) Según su curvatura, b) Según bifurcaciones bajas	26
Figura 11 Anillo epóxico	27
Figura 12 DGEBA.....	28
Figura 13 Compuesto FRP de resina y fibra bidireccional en 0° y 90°	30
Figura 14 a) Alto módulo en dirección de la fibra, b) bajo módulo en dirección perpendicular a la fibra, c) Módulo quasi-isotropico.....	32
Figura 15 Diagrama Esfuerzo vs Deformación esquemático para Refuerzo, Compuesto y Matriz. [3].....	33
Figura 16 Esquema ensayo de flexión en tres puntos	34
Figura 17 Desplazamiento eje neutro	35
Figura 18 Momento flexor máximo para una viga en tres puntos. [17]	37
Figura 19 Comportamiento de una viga en sus zonas de tensión y compresión. [14].....	38
Figura 20 Esquema viga reforzada en zona de tensión.....	38
Figura 21 Efecto de la aplicación de esfuerzos en el adhesivo	39
Figura 22 Esquema ensayo de adhesión Madera-CFRP	40
Figura 23 Esfuerzo vs Deformación para un compuesto de CFRP en madera ..	42
Figura 24 Diagrama ilustrativo para un ensayo de flexión en cuatro puntos	43
Figura 25 Curvas Carga-Desplazamiento para T. Chinensis a) Madera sin reforzamiento, b) Madera con 1 capa de CFRP, c) Madera con 2 capas de CFRP, d) Madera con 3 capas de CFRP	45
Figura 26 Equipo de Ensayos Universales Zwick/Roell Z030 configurado para compresión	47
Figura 27 Mallas para indentación. a) 3/8 in b) No. 14	48
Figura 28 Primeras vigas de flexión para madera envuelta en CFRP	49
Figura 29 Vigas altas preliminares, laminadas en zona de tensión.	49
Figura 30 Probetas Caracterización madera. a) Probeta de Flexión, b) Probeta de Tracción, c) Probeta de Compresión	52
Figura 31 Esquema ensayo de Flexión en tres puntos.....	53

Figura 32 Matriz de Ensayos	54
Figura 33 Modelado 3D Viga de madera SpaceClaim (ANSYS Structural)	55
Figura 34 Esfuerzos máximos viga de madera. a) Zona inferior, b) Zona superior	55
Figura 35 Vigas reforzadas con CFRP. [1] por la urdimbre, [2] por la trama. [3] bidireccional.....	56
Figura 36 Viga reforzada con distintas longitudes de CFRP. 410[mm], 350[mm], 100[mm].....	57
Figura 37 Viga reforzada con distintos números de capas.	58
Figura 38 Probetas ensayo adhesión. a) Sin tratamiento superficial, b) Tratamiento superficial con Malla de 3/8 in. c) Tratamiento superficial con Malla No. 14.	60
Figura 39 Ensayo de adhesión	60
Figura 40 Ejemplo comportamiento elastoplástico para curva teórica y su ecuación cuadrática.	63
Figura 41 Maderas del Grupo 1 y Grupo 2 con 5 y 2 veta respectivamente.....	65
Figura 42 Carga vs Desplazamiento Compresión Madera. Curvas de 2 veta y 5 vetas	66
Figura 43 Curva Esfuerzo vs Deformación Compresión con 2 vetas y promedio	66
Figura 44 Curva Esfuerzo vs Deformación para madera en tracción.	68
Figura 45 Maderas flexión sin reforzar. a) vista transversal, b) vista inferior al punzón.....	69
Figura 46 Flexión madera Esfuerzo vs Deformación, Promedios de Madera 1 y 2.	70
Figura 47 Esfuerzo vs Deformación distintos N° de capas de CFRP, Orientado a la Urdimbre de largo 410 [mm]	72
Figura 48 Esfuerzo vs Deformación distintos N° de capas de CFRP, Orientado a la Urdimbre de largo 410 [mm], 3 capas con madera con 1 veta	73
Figura 49 Curva Teórica vs Promedio - 1 Capa CFRP	74
Figura 50 Curva Teórica vs Promedio - 2 Capas CFRP	75
Figura 51 Curva Teórica vs Promedio - 2 Capas CFRP	76
Figura 52 Esquema reforzamiento de vigas. LR = 410 [mm] Mecánico, LR = 350 y 100[mm] por resina.....	76
Figura 53 Esfuerzo vs Deformación distintos largos de CFRP, con dos capas orientadas a la Urdimbre	77
Figura 54 Esfuerzo vs Deformación distintas orientaciones del CFRP, 2 capas de largo 410 [mm].....	79
Figura 55 Direccionalidad de la fibra en el caso planar 3K.....	80
Figura 56 Resistencia a la adhesión según tratamiento superficial	81
Figura 57 Mallas para dar rugosidad. [1] Malla de 3/8 in, [2] Malla No 14.	82

Figura 58 Proceso manufactura vigas reforzadas con CFRP. a) Aplicación de resina, b) Aplicación de CFRP a viga, c) Proceso de impregnación y "secado al vacío", d) Vigas listas para ensayar.....	85
Figura 59 Concepto células de las vetas de la madera [20]	86
Figura 60 Esquema representativo de la formación celular de la madera	87
Figura 61 Esquema microestructural de un corte transversal de madera.....	87
Figura 62 Maderas reforzadas con 1 capa de FC	89
Figura 63 Curva Esfuerzo vs Deformación configuración 1 Capa - Urdimbre - 410[mm].....	90
Figura 64 Curva Promedio Madera 2 y 3 Configuración 1 capa de CFRP - Urdimbre - 410 [mm].....	91
Figura 65 Curva Esfuerzo vs Deformación configuración 2 Capas - Urdimbre - 410[mm].....	92
Figura 66 Curvas Promedio Configuración 2 capas de CFRP - Urdimbre - 410 [mm].....	93
Figura 67 Curva Esfuerzo vs Deformación configuración 3 Capas - Urdimbre - 410[mm].....	94
Figura 68 Curva Promedio Configuración 3 capas de CFRP - Urdimbre - 410 [mm]	95
Figura 69 Curva Esfuerzo vs Deformación configuración 2 Capas - Urdimbre - 350[mm].....	96
Figura 70 Curva Promedio Madera 2 y 3 Configuración 2 capas de CFRP - Urdimbre - 350 [mm].....	97
Figura 71 Curva Esfuerzo vs Deformación configuración 2 Capas - Urdimbre - 100[mm].....	98
Figura 72 Curva Promedio Madera 2 y 3 Configuración 2 capas de CFRP - Urdimbre - 100 [mm].....	99
Figura 73 Curva Esfuerzo vs Deformación configuración 2 Capas - Trama - 410[mm].....	100
Figura 74 Curva Promedio Madera 2 y 3 Configuración 2 capas de CFRP - Trama - 410 [mm]	101
Figura 75 Curva Esfuerzo vs Deformación configuración 2 Capas - Bidireccional - 410[mm].....	102
Figura 76 Curva Promedio Configuración 2 capas de CFRP - Bidireccional - 410 [mm].....	103

Tabla 1 Propiedades a la Tracción de algunos Materiales como la fibra de carbono. [4].....	23
Tabla 2 Carga máxima teórica y experimenta, porcentajes de incremento promedio de la carga máxima, y error absoluto para vigas T. chinensis reforzadas con CFRP.....	45

Tabla 3 Propiedades de la Fibra de Carbono utilizada	46
Tabla 4 Propiedades en Compresión Madera.....	67
Tabla 5 Propiedades en Tensión Madera.....	67
Tabla 6 Propiedades en Flexión Madera sin Reforzar	68
Tabla 7 Propiedades mecánicas Madera Reforzada - Distinto Número de Reforzamiento de CFRP. En paréntesis se encuentra el % de mejoramiento respecto a la madera sin reforzar.	72
Tabla 8 Propiedades mecánicas Madera Reforzada – Distinta longitud del reforzamiento. En paréntesis se encuentra el % de mejoramiento respecto a la madera sin reforzar.....	77
Tabla 9 Propiedades mecánicas Madera Reforzada – Distinta direccionalidad del reforzamiento. En paréntesis se encuentra el % de mejoramiento respecto a la madera sin reforzar.....	80
Tabla 10 Propiedades de Adhesión CFRP-Madera según apertura de malla para tratamiento.....	80
Tabla 11 Resultados Ensayos Flexión 1 Capa de reforzamiento	89
Tabla 12 Estadística resultados, 1 Capa – Urdimbre – 410 [mm]	90
Tabla 13 Resultados Ensayos Flexión 2 Capas de reforzamiento - Urdimbre - 410 [mm].....	92
Tabla 14 Estadística resultados 3 maderas, 2 Capas – Urdimbre – 410 [mm] ...	92
Tabla 15 Resultados Ensayos Flexión 3 Capas de reforzamiento - Urdimbre - 410 [mm].....	93
Tabla 16 Estadística resultados 3 maderas, 3 Capas – Urdimbre – 410 [mm] ...	94
Tabla 17 Resultados Ensayos Flexión 2 Capas de reforzamiento - Urdimbre - 350 [mm].....	96
Tabla 18 Estadística resultados 3 maderas, 2 Capas – Urdimbre – 350 [mm] ...	96
Tabla 19 Resultados Ensayos Flexión 2 Capas de reforzamiento - Urdimbre - 100 [mm].....	98
Tabla 20 Estadística resultados 3 maderas, 2 Capas – Urdimbre – 100 [mm] ...	98
Tabla 21 Resultados Ensayos Flexión 2 Capas de reforzamiento - Trama - 410 [mm].....	100
Tabla 22 Estadística resultados 3 maderas, 2 Capas – Trama – 410 [mm]	100
Tabla 23 Resultados Ensayos Flexión 2 Capas de reforzamiento - Bidireccional - 410 [mm].....	101
Tabla 24 Estadística resultados 3 maderas, 2 Capas – Bidireccional – 410 [mm]	102
Tabla 25 Propiedades de los materiales utilizados, con las fracciones volumétricas	104

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 CONTEXTUALIZACIÓN

El reforzamiento de elementos estructurales con materiales compuestos es una técnica utilizada para aumentar la resistencia de estos en base a una combinación de alguna fibra, una resina y el material base. En la actualidad, las construcciones de madera están en un auge por la facilidad de instalación, el bajo costo que refiere en materiales y su buena respuesta al medio ambiente. Es por esto que el estudio de la mejora en estructuras a lo que respecta a sus vigas, como podría ser el aumento de la luz (distancia entre apoyos o soportes), la disminución en el uso de estas y/o la disminución en la deflexión de una estructura, sin la disminución de la resistencia, es decir, aumentar la rigidez de de la estructura, es el foco de investigación. Donde el material tradicional que es la madera puede ser reforzada para así disminuir el número de vigas a utilizar, o en caso de mantener el número de vigas, poder tener un aumento en la carga permanente de la estructura. Tal como se puede ver en la Figura 1.

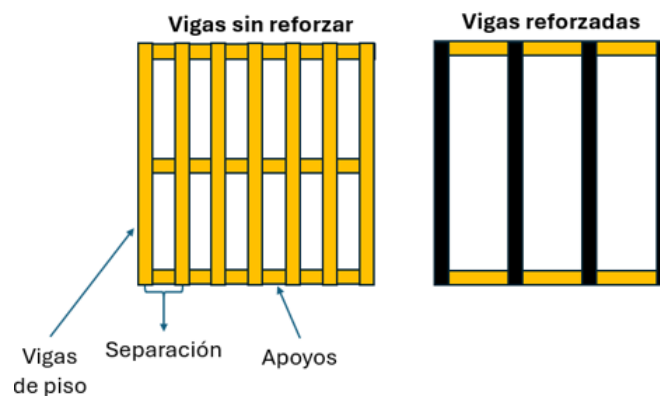


Figura 1 Esquema separación entre vigas para madera sin reforzar vs reforzada

Chile es un país sísmico, donde es debido mantener estructuras con alta resistencia para evitar fracturas o fallas recurrentes que pudiesen ocurrir. Es por esto que la idea de recubrir elementos estructurales con fibra de carbono es una opción viable a nivel país para aplicar en sus construcciones, de esta forma facilitar el manejo de estos tanto en transporte como instalación.

Un buen ejemplo de reforzamiento de elementos estructurales con un CFRP es la reparación del pilar de un puente en Santa Mónica, EE. UU. tras un terremoto ocurrido en 1979, donde este sufrió un agrietamiento significativo en su estructura. Aquí se aplicó una camisa de fibra de carbono con resina epoxi para mitigar los esfuerzos a los cuales está sometido, teniendo resultados positivos que duran hasta el día de hoy, este reforzamiento se puede ver en la Figura 2. [1]

El adaptar elementos estructurales con polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP) es una técnica empleada para mejorar el rendimiento mecánico de componentes estructurales sometidos a esfuerzos. Al aplicar el refuerzo de fibra de carbono, se logra una combinación entre las propiedades de la matriz y las del CFRP, lo que se traduce como una mejor resistencia mecánica, pudiendo aplicar una mayor carga y deflectando en menor grado la viga en comparación una viga sin un reforzamiento. Esta combinación comprende una adhesión que puede significar cambios según la rugosidad que tenga la superficie a adherir la fibra, siendo un parámetro para la resistencia en la adhesión entre la fibra y la matriz estructural y su rigidez como compuesto. [1] [2]



Figura 2 Puente Santa Mónica reparado con CFRP [1]

Las propiedades de resistencia, ductilidad y rigidez varían según el tipo de fibra de carbono que se esté utilizando, pues en el aspecto comercial se tienen distintas

configuraciones tanto de tejido como de grosor de cada uno de estos. Estas propiedades pueden variar también con la orientación en que se aplica la fibra que da como resultado una direccionalidad de esfuerzos en comportamientos anisotrópicos o quasi-isotrópico. Por otro lado, se estudiarán las dimensiones de las láminas aplicadas de reforzamiento por el efecto de la densidad de fibra resultante y la escalabilidad de este. [3]

Dada la positiva naturaleza mecánica que posee la fibra de carbono, al utilizarla como un reforzamiento mejora su resistencia en tensión, y consecuentemente su rendimiento mecánico en flexión. Un CFRP tiene un módulo de elasticidad que fluctúa entre los 45,5 y 215 [GPa] dependiendo de la orientación de la fibra. Estos valores se pueden contrastar con los de otros materiales compuestos que pueden utilizarse como reforzamiento, como por ejemplo la fibra de vidrio la cual posee un módulo de elasticidad de 36.9 [GPa]. También es comparable con otros elementos estructurales como es un Acero al carbono el cual posee un módulo de elasticidad de 210 [GPa]. Por lo tanto, se observa que el rendimiento mecánico de un reforzamiento con CFRP es una gran opción en la aplicación de elementos estructurales. [1]

1.2 HIPÓTESIS

El uso de CFRP (polímero reforzado con fibra de carbono) como refuerzo en elementos estructurales de madera, como son las vigas, puede aumentar su resistencia mecánica. Al aplicar el CFRP, que consiste en fibra de carbono en una matriz de resina epoxi, a la superficie de la madera, se forma un compuesto híbrido que aprovecha las propiedades de ambos materiales. La fibra de carbono aporta alta resistencia y rigidez, mientras que la madera proporciona la ductilidad propia del material. Juntos crean un material compuesto más resistente y rígido que la madera sola. **Este refuerzo con CFRP permite así mejorar el comportamiento estructural de elementos de madera, mejorando la luz (distancia entre soportes) o mejorando la carga permanente, significando una mejora en la flecha (o desplazamiento) y resistencia.**

1.3 OBJETIVO GENERAL

Buscando obtener una mejora en el desarrollo del proceso de manufactura de objetos de vigas para segundos pisos en viviendas, las cuales consisten en Madera reforzada con CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers), donde estos cumplan con un comportamiento mecánico adecuado para su implementación, es necesario diseñar y ensayar mecánicamente distintas orientaciones de la fibra, variar en la cantidad de capas de reforzamiento de CFRP y la longitud de estas, en las vigas de madera. Con lo cual, la presente propuesta de proyecto de memoria de pregrado aplicada tiene como objetivo general **“Mejorar la rigidez y comportamiento mecánico de vigas de segundos pisos para viviendas en base a madera reforzada con polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP).”**

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. **Analizar** el comportamiento mecánico en flexión en relación al número de capas, longitud del reforzamiento y orientación del refuerzo de CFRP utilizadas en madera.
2. **Comparar** el comportamiento de la adhesión para distintos tipos de tratamientos superficiales para probetas indentadas con distintas rugosidades.
3. **Recomendar** una óptima utilización de CFRP para reforzar vigas de madera que forman parte de estructuras habitacionales, en cuanto a su rendimiento mecánico y resistencia de adhesión.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 FIBRA DE CARBONO

Los componentes principales de los materiales compuestos reforzados con polímeros son las fibras poliméricas. Estos materiales son, en esencia, compuestos de fibra embebidos en una matriz de resina. Existe una amplia variedad de fibras, las cuales son seleccionadas según el uso que se requiera, esto depende de sus propiedades, tales como puede ser la densidad, la resistencia mecánica, conductividad eléctrica, costos, entre otros.

Las propiedades de las fibras se miden según la norma internacional ASTM D3379, la cual estandariza los resultados obtenidos para poder realizar una comparativa entre todas ellas. [4]

La fibra de carbono está hecha en base a una fibra acrílica, esta es el poliacrilonitrilo (PAN) la cual se le da una forma textil en filamentos. Esta fibra PAN tiene una baja densidad, y está compuesta por cadenas moleculares largas, por lo que en su totalidad constituye una baja relación masa-volumen, pero mantiene una alta resistencia mecánica. [1]

Estas cadenas largas contienen una combinación de carbono amorfo y carbono en forma de grafito. Las propiedades de esta fibra se deben al grafito que contiene, donde los átomos de carbono se ordenan de una forma hexagonal, teniendo distancias entre los átomos distinta entre planos cristalográficos, tal como se puede observar en la Figura 3. Los átomos de carbono presentes en un mismo plano tienen enlaces covalentes, mientras que los átomos entre planos tienen enlaces tipo van der Waals, los cuales son mucho más débiles. Dando como resultado una **anisotropía** en las propiedades físicas y mecánicas de estas fibras. [4]

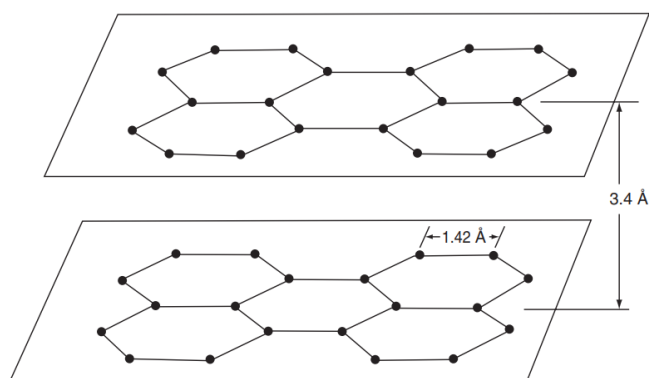


Figura 3 Arreglo cristalino del grafito. [4]

Las fibras del PAN en un comienzo son llevadas a temperaturas entre los 200°C y 300°C por unas horas, aquí los grupos de carbono polar se combinan para formar una estructura más rígida, esto se puede ver en la Figura 4. Posteriormente, son carburizadas entre 1000 y 1500°C en una atmósfera inerte con un contenido aproximado a 95% de carbono. En este proceso la fibra pierde gran parte de su diámetro a causa de la temperatura quedando más largas y con un alto contenido de carbono. [1] [4]

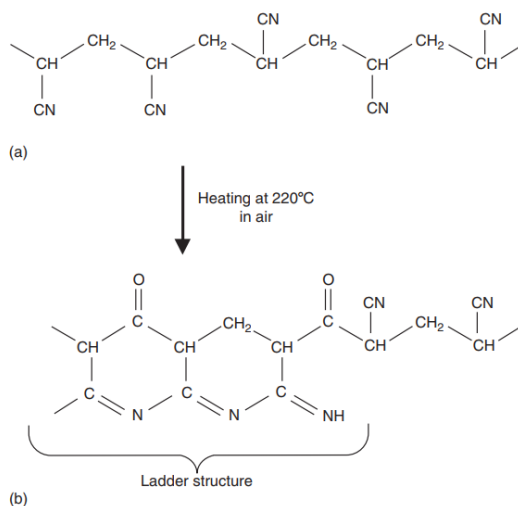


Figura 4 Estructura PAN. a) Estructura molecular del PAN. b) Estructura rígida.

Finalmente, se tiene un curado sobre los 2000°C para ordenar los átomos de carbono en los filamentos, de esta forma aumenta considerablemente el módulo

de tensión, en los cuales estos átomos desordenados quedan estructurados en forma de grafito. Este proceso se puede observar en la Figura 5. [4]

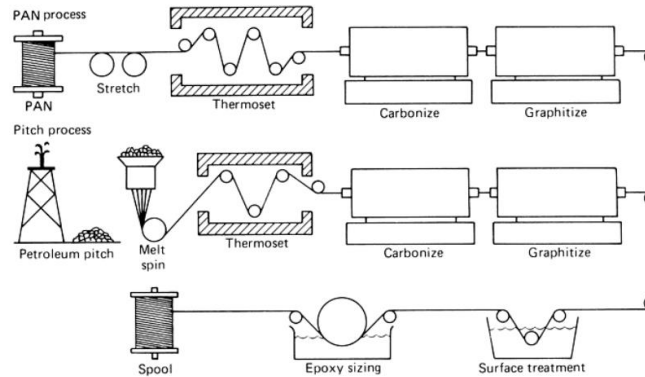


Figura 5 Proceso de manufactura para fibras de carbono a base de poliacrilonitrilo (PAN). [1]

Una vez obtenidas las fibras de carbono de forma de hebras, estas se pueden agrupar y formar un tejido el cual es aplicable como uso en molde o como reforzamiento y reparaciones. Estos tejidos se fabrican entrelazando las fibras en distintos ángulos entre sí, teniendo orientaciones de 0° y de 90° , siendo la urdimbre y trama respectivamente. Por un lado, se tiene tejidos comunes como son los lisos, como también tipo Twill y/o Satin, pudiendo observarse en la Figura 6. [5]

En el primer tipo de tejido se tiene un enlazado simétrico, pero que tiene problemas con la porosidad que deja en la superficie, teniendo así problemas de humedad en la aplicación de resina. Este tipo de tejido es preferencial para fabricaciones simples, o laminares, teniendo **propiedades ortotrópicas**. [5]

En el segundo tipo de tejido, el tipo Twill, el cual tiene una distribución de la resina en el tejido muy balanceada. Además, las fibras tienen menor ondulación en su paso, lo que se traduce en menores problemas de porosidades. [5]

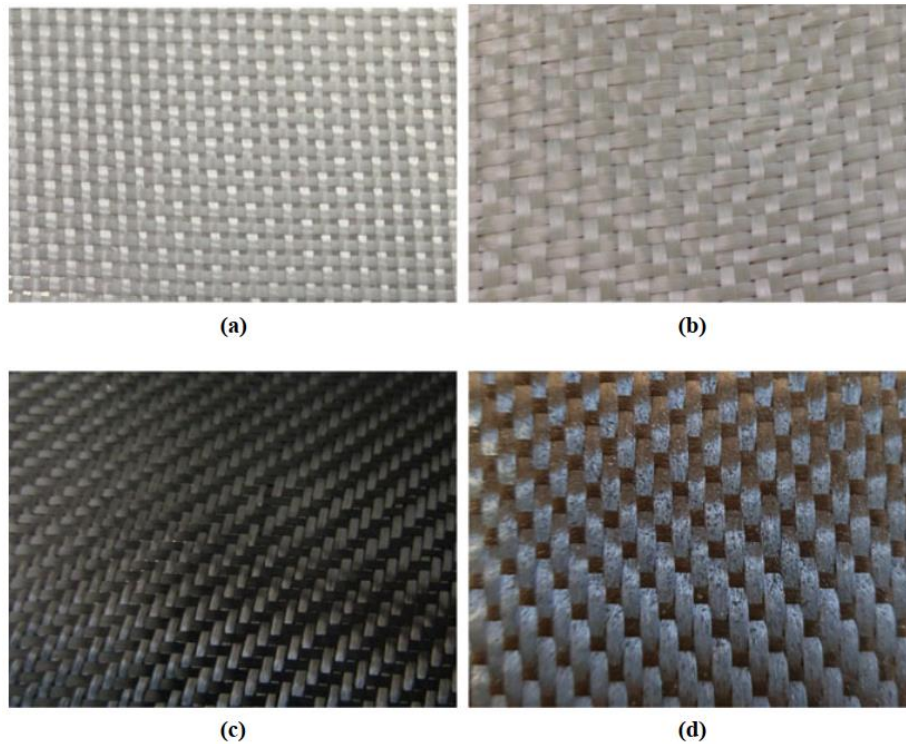


Figura 6 Tipos de tejido. a) Plano. b) y c) Twill. d) Satin

Finalmente, las fibras ordenadas en tipo Satin son las más inestables, sin embargo, tienen una gran distribución de humedad y la menor ondulación de la fibra. Usada en geometrías complejas. La inestabilidad del tejido que se tiene conlleva principalmente a problemas de anisotropía al momento de utilizar, pues predomina la orientación de la urdimbre. [5]

Por lo tanto, el tipo de tejido a utilizar de los entrelazados de hebras de fibra de carbono dependerá del uso específico que se le quiera dar a la fibra. Teniendo casos más estéticos, como otros casos donde la direccionalidad, problemas de humedad y ondulación de la fibra juegan un rol importante en su comportamiento mecánico.

En este sentido, también hay distinciones en la direccionalidad de la fibra, ya se mencionó anteriormente la Urdimbre y la Trama, esto, además, conlleva distintas propiedades mecánicas según se oriente la carga aplicada en una pieza o reforzamiento de CFRP pues la orientación de manufactura conlleva una

anisotropía en su comportamiento. La direccionalidad de la fibra se puede observar en la Figura 7.

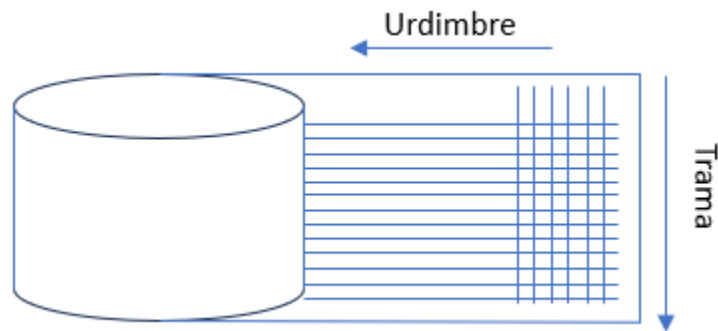


Figura 7 Esquematización de rollo comercial de tela de fibra de carbono.

Las propiedades mecánicas de un material compuesto dependen de variables como la orientación del CFRP, la densidad de fibra, la resina utilizada, y el medio de adhesión. [1]

Lo que refiere a la orientación de la fibra se puede observar en la Figura 8, aquí podemos ver las distintas disposiciones que puede tener la fibra y que, de esta forma, pueden afectar las propiedades mecánicas del compuesto.

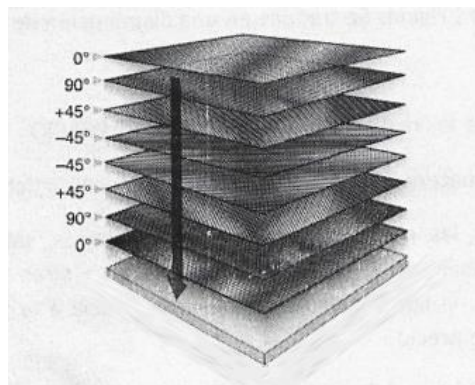


Figura 8 Orientación Fibra de carbono [3]

En cuanto a valores, la fibra de carbono tiene propiedades de módulo de elasticidad como de resistencia mecánica elevados, comparables con otros materiales como un acero al carbono estructural, como también con otros tipos de fibra. Esta rigidez se asocia al momento de inercia y al módulo de elasticidad del material, dando consigo, para la fibra de carbono, un módulo mayor para

menores espesores y por consiguiente peso a la hora de instalación. Esto se puede observar en la Tabla 1, donde el compuesto Fibra de Carbono con Resina epoxi alcanza los módulos de elasticidad más altos, dejando fuera el caso del compuesto quasi-isotrópico. Esta fibra tiene una relación entre el módulo de elasticidad y su densidad alta, lo que quiere decir que tiene una alta rigidez por unidad de peso. Dando así paso a la facilidad de su instalación y transporte. Como se mencionó en un comienzo, la obtención de estos resultados son normados con la ASTM D3379 y la norma D3039 para ensayos de tracción para materiales compuestos.

Tabla 1 Propiedades a la Tracción de algunos Materiales como la fibra de carbono. [4]

Material	Densidad [g/cm ²]	Módulo de Elasticidad [Gpa]	Esfuerzo Máximo [MPa]	Módulo Específico (10 ⁶ [m])
Acero SAE 1020 (trabajado en frío)	7.87	207	365	2.68
Fibra de Carbono - Epoxi de Alta resistencia (Unidireccional)	1.55	137.8	1550	9.06
Fibra de Carbono - Epoxi de Alto módulo (Unidireccional)	1.63	215	1240	13.44
Fibra de Carbono - Epoxi (quasi-isotrópico)	1.85	39.3	965	2.16
Fibra de Vidrio - Epoxi (Unidireccional)	1.38	75.8	1378	5.6
Fibra de Kevlar - Epoxi (Unidireccional)	1.55	45.5	579	2.99

2.2 MADERA

El uso de la madera como material de construcción se ha llevado a cabo durante miles de años, evolucionando a lo largo de la historia en cuanto a su forma de uso como en su adhesión. Ya sea con uniones mecánicas como puede ser el uso de clavos y tornillos, como con uniones química con el uso de pegamentos o resinas.

La madera en la industria ingenieril es utilizada de forma estructural, principalmente como perfiles, vigas, pisos, entre otros. Pues se tienen propiedades de interés en cuanto a su módulo de elasticidad, tenacidad, ductilidad y resistencia.

En los últimos años la madera ha sido dejada de lado para dar paso a materiales más resistentes como pueden ser el hormigón armado, metales, entre otros. Sin embargo, el transporte de estos últimos materiales hace difícil de aplicar en toda geografía, pues los costos que pueden implicar son altos.

La estructura de la madera se debe analizar a tres niveles, de forma macroscópica, de forma microscópica en sus fibras y en su crecimiento radial. En esta sintonía, la madera tiene un crecimiento radial en cuanto al crecimiento de sus anillos, lo cual puede ser diferente a lo largo del tiempo pues este crecimiento depende de las estaciones del año en que se desarrollen, por ejemplo, en primavera y verano crecen más rápido que en otoño e invierno. Por otro lado, los árboles crecen de mayor forma en la zona “cambium” que se puede observar en la Figura 9. [6] [7]

Luego de la zona “cambium” se puede considerar una madera más o menos muerta en cuanto al árbol pues es la zona que lo sostiene. Las celdas o células de la madera son principalmente huecas y alargadas, muy pegadas entre sí, las cuales se direccionan paralelas al eje de crecimiento del árbol. Lo que significa un comportamiento mecánico anisotrópico por estas formas de sus fibras. [7]

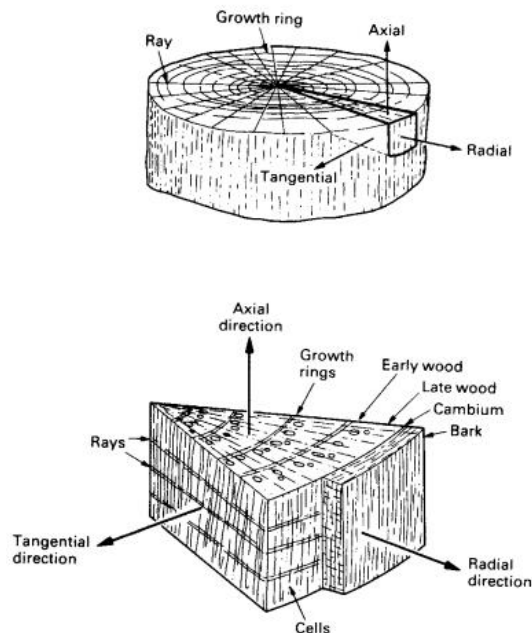


Figura 9 Zonas de un tronco y dirección de crecimiento

Las células a nivel molecular de la madera son muy parecidas a fibras poliméricas sintéticas como las de vidrio o carbono, formando compuestos cristalinos de celulosa el cual compone aproximadamente el 45%, además hay otro compuesto

abundante el cual es la glucosa la cual funciona como una matriz epóxica haciendo el símil con las fibras sintéticas, este compone cerca del 40%. El otro 10 a 15% es agua, aceites y sales que dan características como olores, colores y otras propiedades a la madera. [6]

Los troncos y maderas pueden diferenciarse notoriamente entre sí, ya sea por su color, altura u olores, sin embargo, la estructura y composición de sus células no cambia en nada. Pero pueden cambiar la densidad de estas, afectando así sus propiedades mecánicas y su comportamiento a distintos ambientes. [7]

Finalmente, se puede decir que la madera es un compuesto de fibras, las cuales son direccionadas de forma axial al crecimiento de un tronco de árbol significando un **comportamiento anisotrópico** resistiendo más a esfuerzos radiales al tronco. Más detalles de la formación de las vetas y su influencia en los ANEXOS 2. [6]

La selección de los árboles es una etapa importante para su procesamiento y posterior uso que se le quiera dar a la madera obtenida. Es por esto por lo que hay criterios de selección para no tener una dispersión en cuanto a las propiedades y calidad que tenga la sección a utilizar. Dentro de estos criterios, tenemos que el tronco en cuestión sea lo más cilíndrico posible, los anillos de crecimiento del tronco sean lo más uniformes posibles, una baja cantidad de nudos o que sean lo más pequeños posibles, no presente desperfectos físicos o por ataques de insectos. Además, se tienen otros criterios de selección los cuales se pueden observar en la Figura 10 en donde se descartan árboles con curvaturas o con bifurcaciones en la zona baja de los troncos.

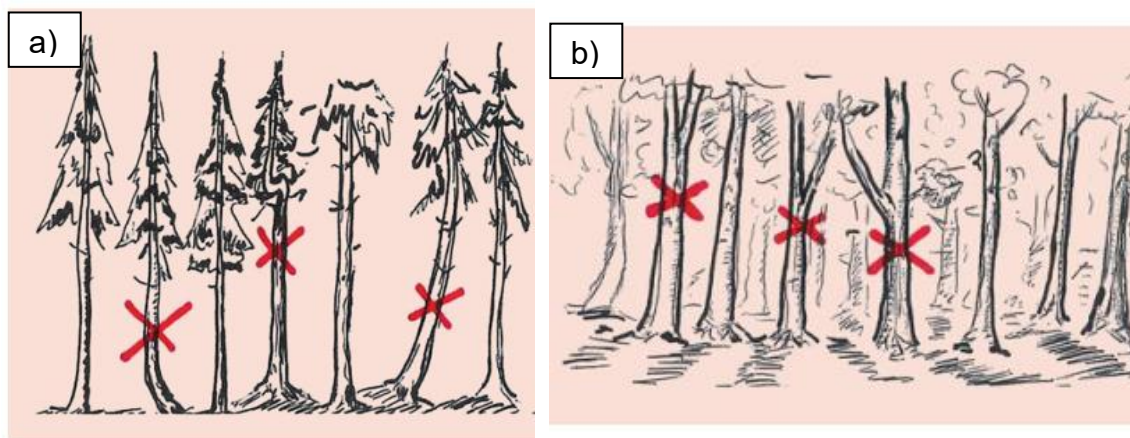


Figura 10 Selección de árboles para obtención de madera. a) Según su curvatura, b) Según bifurcaciones bajas

Algunos de estos parámetros de calidad, como el diámetro de los anillos de crecimiento o los nudos, se pueden predecir con las dimensiones de la corona de los árboles, la cual es la parte alta de estos.

Por lo general cuando se tiene una gran biomasa de la corona del un árbol, quiere decir que tiene una mayor cantidad de crecimiento de anillos con un tronco más firme. De todas formas, existe una relación entre las características de crecimiento de los árboles y la calidad de la madera que producen, la cual no es igual para todos los tipos de árboles. [8]

Por ejemplo, estos se pueden clasificar en coníferas (como los pinos) y en árboles de hoja caduca (como los robles). Donde la manera en que la velocidad y características de su crecimiento afectan a su madera de forma diferenciada. [7]

Además, se pueden separar por madera joven y tardía, en la cual la primera se forma en los primeros años de vida que tiene un árbol, mientras que la segunda se forma en una etapa más avanzada. [7]

También se puede detallar en la tasa anual de crecimiento de anillos, que es el crecimiento que tiene el árbol cada año. En coníferas, cuando los anillos son anchos, la madera que resulta es menos densa. Lo que contrasta con lo que sucede en los árboles de hoja caduca, pues los anillos anchos significan una madera más densa. [7]

Esto nos da varios factores a tener en consideración para la obtención de una madera representativa y de calidad para el uso que se le quiera dar, cuantificando en medidas silvícolas y sus técnicas para la aplicación de distintas técnicas para las especies de árboles y las características que se le quiera dar a la madera a utilizar. [7]

Una de las técnicas más utilizadas para controlar la calidad de la madera, es el concepto de Calificación/Dimensionamiento, que fue desarrollado por G. J. Wilhelm. El cual consiste en dar enfoque a grupos de árboles más que en árboles individuales, donde los grupos de calidad cubren un cierto porcentaje del bosque a forestar mientras que el resto del bosque se deja crecer de forma natural. Dentro del grupo de calidad se seleccionan árboles que prometen buenas características para producir madera de calidad. [9]

Estos árboles prometedores se les da un cuidado distinto, podando ramas bajas para evitar formación de nudos, se cuida el radio de crecimiento, para que de esta forma se pueda obtener la madera de mayor calidad posible. [9]

2.3 RESINAS POLIMÉRICAS

Son de uso amplio y existen muchos productos con este nombre, esto se debe a un anillo epóxico que consiste en dos átomos de carbono con enlaces simples unidos a un átomo de carbono, esto como se muestra en la Figura 11.

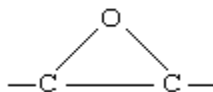


Figura 11 Anillo epóxico

Existen dos tipos de epóxicos, aquellos que se hacen reaccionar con epiclorhidrina formando glicidilo aromáticos. Los fenoles epóxicos son, comercialmente, las resinas más importantes, particularmente los bifenoles epóxicos A (BPA), conocidos también como diglicidilo ether de bisfenol A (DGEBA) que se muestra en la Figura 12. Esta resina muestra un excelente balance entre

sus características físicas, químicas y eléctricas cuando tiene aplicaciones de compuestos.

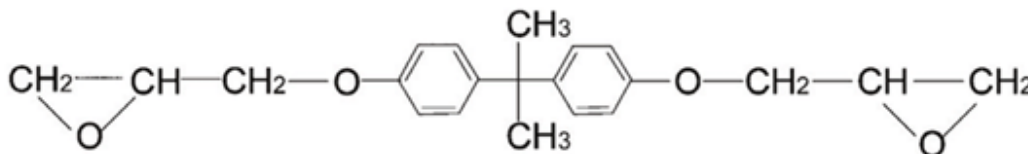


Figura 12 DGEBA

Las resinas epóxicas siempre son usadas con agentes co-reactantes o de curado (endurecedor), por lo tanto, su comportamiento es influenciado por este co-reactante. Estos incluyen aminas, anhídridos, ácidos, fenoles, entre otros, dando así una amplia gama de posibilidades. Estos suelen ser seleccionados para optimizar su comportamiento físico final.

Por otro lado, encontramos los alcoholes epóxicos. Los cuales son usados típicamente en combinación con resinas DGEBA para darles un mejor procesamiento. Estos compuestos al tener baja viscosidad son muy usados como diluyentes. Estos pueden mejorar flexibilidad y tenacidad, a expensas de su resistencia químicas y térmicas.

La mayoría de epóxicos son usados como sistemas termoestables, y solo algunas aplicaciones de DGEBA son usados como termoplásticos. Esto se debe a que los epóxicos son grupos terminales.

2.3.1 APLICACIONES

Los compuestos epóxicos se clasifican principalmente en tres áreas: aplicación aeroespacial de alto rendimiento, usos generales, y eléctricos.

En los propósitos generales, los más utilizados son los DGEBA. Donde los agentes co-reactantes incluyen animas aromáticas y alifáticas o anhídridas, pues tienen un buen balance de rendimiento y costos.

Para las aplicaciones necesarias y el uso que se les quiera dar en cuanto a sus propiedades y curado, dependen en su totalidad del agente co-reactante

2.3.2 CURADO

Existen principalmente tres tipos de curado para las resinas epóxicas:

- A temperatura ambiente, el cual es comúnmente usado de forma comercial para mejorar algunas propiedades de otros productos o como reparación.
- 120°C, el cual es usado para aviación de menor tamaño.
- 175°C, el cual es usado para aviones de alto rendimiento.

El curado a temperatura ambiente demora poco en actuar, aproximadamente dos horas, y debe ser aplicado con presión de manera preferente para asegurar una buena adhesión.

Para la optimización de estos procesos, se requiere combinar calor y presión, ya sea en vacío como en algún sistema autoclave.

Para las resinas epóxicas, el curado hace referencia a la reacción química del componente epóxico en un compuesto de resina en una matriz. Esta reacción es de naturaleza exotérmica y da como resultado un aumento en el peso molecular de la matriz. Como la resina y el endurecedor reaccionan, se crean cadenas moleculares más largas, aumentando considerablemente la viscosidad.

La resina epóxica cambia de líquido a un estado gomoso y eventualmente a un estado sólido en su punto de gelificación. Durante el ciclo de curado se deben realizar los siguientes procesos:

- Eliminación de vacíos: Durante el proceso de aplicación pueden quedar atrapadas partículas de aire, dejando espacios vacíos para la introducción de humedad, pudiendo atrapar agua en estos espacios y que durante el proceso de curado este hierva. Por lo que es importante un buen proceso de eliminación de vacíos con la aplicación de presión.
- Remoción de solventes: En la aplicación de fibras, algunas resinas son disueltas en solventes previamente. Estos solventes pueden crear microvacíos y afectar el rendimiento final del compuesto. Por suerte, estos solventes tienen bajo punto de ebullición y se evaporan durante el curado.

- Fibra sin cubrir: Para alcanzar los mejores rendimientos de un compuesto, es importante que la resina cubra toda la fibra. Una baja viscosidad de la resina ayuda a evitar que la fibra quede sin mojar o cubrir y disminuye la porosidad alcanzada.
- Remoción de Resina: Típicamente, hay de un 10 a un 20% de exceso de resina en el material, el cual puede ser removida una vez que se alcance una menor viscosidad en el proceso de curado.

Estos cuatro puntos y el entendimiento de que hay una consolidación de la resina cuando se cura, disminuyendo el espesor de esta, ayuda a enfatizar en lo importante del entendimiento de las propiedades reológicas de la resina.

2.3.3 COMPUESTOS FIBROSOS

En la Figura 13 se puede observar de forma esquemática un compuesto de FRP (polímero reforzado con fibra) bidireccional con fibra en 0° y 90° .

Cuando la fibra de un compuesto es alineada a lo largo de la dirección de carga, su rigidez y resistencia pueden considerarse como un promedio de la matriz con la fibra, ponderadas con sus fracciones volumétricas. Sin embargo, no todas las propiedades de los compuestos son una combinación lineal de sus componentes.

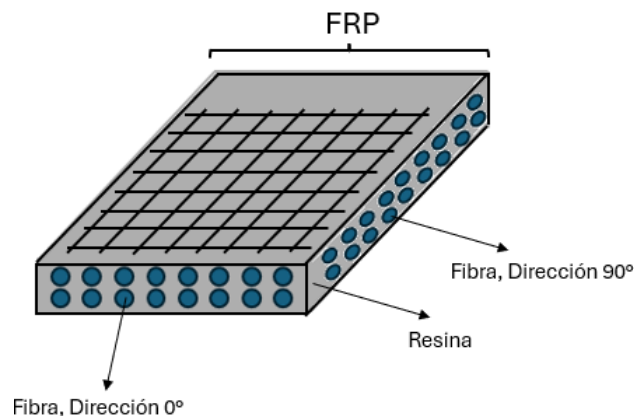


Figura 13 Compuesto FRP de resina y fibra bidireccional en 0° y 90°

Un ejemplo de esto es la tenacidad, pues si en un compuesto de CFRP crece una grieta, uno espera que la tenacidad promedio entre la fibra de vidrio y la resina

epóxica sea baja (pues la de cada material es baja por si sola), pero, no es lo que pasa, esto debido a que las fibras se desprenden de la matriz epoxy, y es en este desprendimiento en donde el trabajo de delaminado (o despeque de la resina de la fibra) contribuye a la tenacidad del compuesto, dando así una mucho mayor tenacidad.

2.3.4 MÓDULO DE ELASTICIDAD MATERIALES COMPUESTOS

Cuando dos materiales linealmente elásticos son combinados, la combinación de estos también es lineal [1]. Esto comprobado por Whitney y Riley [10]. El módulo del compuesto fibroso cuando se carga en dirección de la fibra como se puede observar en la Figura 14, viene dado por la Ec. 1, también llamada regla de las mezclas.

$$E_{c||} = V_f * E_f + (1 - V_f) * E_m \quad \text{Ec. 1}$$

Donde E_f es el módulo de la fibra, E_m es el módulo de la matriz, V_f es la fracción volumétrica de la fibra. En cuanto al módulo cuando es cargado en la dirección perpendicular de la fibra, tenemos la Ec. 2.

$$E_{c\perp} = \left(\frac{V_f}{E_f} + \frac{(1 - V_f)}{E_m} \right)^{-1} \quad \text{Ec. 2}$$

Con esto podemos ver el comportamiento anisotrópico que tienen los compuestos fibrosos. De todas formas, como se puede ver en la Figura 14 c), el módulo en 0° y 90° puede ser igual, pero aquellos que están en 45° siguen siendo bastante bajos. [11]

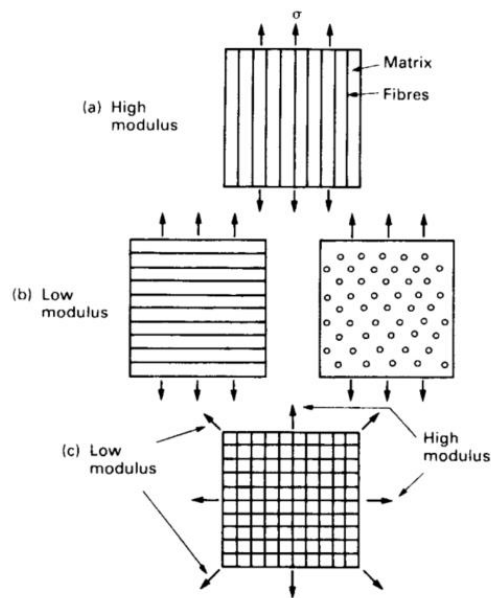


Figura 14 a) Alto módulo en dirección de la fibra, b) bajo módulo en dirección perpendicular a la fibra, c) Módulo quasi-isotropico

2.4 PROPIEDADES MECÁNICAS

Los materiales están constantemente sometidos a distintos esfuerzos, los cuales deben resistirlos para poder darles una aplicación dentro de la industria en cada caso. Para esto, es necesario poder caracterizar los materiales de forma medible, de esta forma nos aseguramos de que la deformación que pueda sufrir o los esfuerzos que sean aplicados al material puedan ser soportados y que no sea excesiva para que ocurra una fractura. Dentro de las propiedades mecánicas más comunes tenemos la resistencia mecánica, la ductilidad, la rigidez, la tenacidad, la resiliencia, entre otros. [12]

El rendimiento de las propiedades mecánicas debe ser medido por ensayos de laboratorio de acuerdo con normas y procedimientos estandarizados para poder obtener resultados comparables y medibles acuerdo a la aplicación que se requiera en cada material. Estos ensayos pueden ser aplicando esfuerzos de Tracción, Compresión, Flexión, entre muchos otros. [12]

Dentro de las propiedades mecánicas más relevantes se encuentra la resistencia mecánica la cual es el esfuerzo que puede resistir un material hasta un cierto punto límite. Por otro lado, tenemos la ductilidad que es la capacidad de un material para deformarse. Estas propiedades son graficadas en un diagrama esfuerzo versus deformación como el que se puede observar en la Figura 15. Donde en el eje de las abscisas se tiene la deformación y en de las ordenadas el esfuerzo, donde, además, se pueden diferenciar zonas de comportamiento elástico y elasto-plástico. [13]

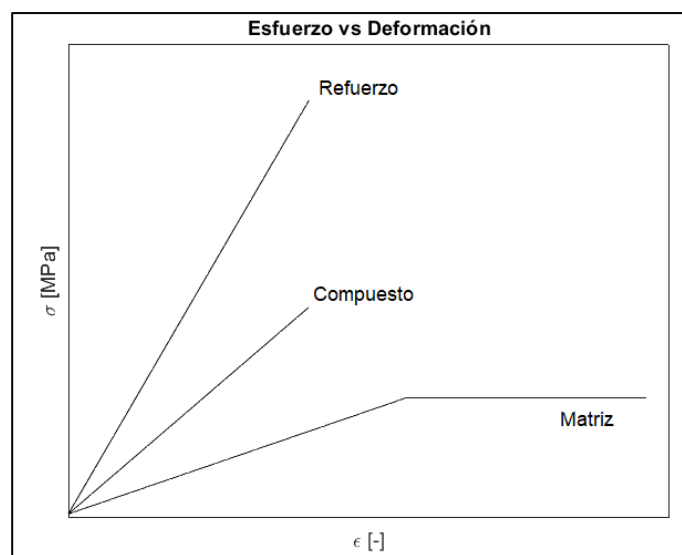


Figura 15 Diagrama Esfuerzo vs Deformación esquemático para Refuerzo, Compuesto y Matriz. [3]

De estos diagramas se pueden obtener otras propiedades, una de estas es el módulo de elasticidad, el cual viene dado por la pendiente en el rango elástico de las rectas, y este refiere a la rigidez que tiene un material en cuanto al comportamiento de sus enlaces atómicos. También podemos tener la resiliencia que vendría siendo el área bajo la curva del rango elástico que refiere a la capacidad del material de absorber energía elásticamente, y la tenacidad que es el área bajo toda la curva que significa la capacidad del material de absorber energía en toda su deformación. [12]

2.4.1 ENSAYO DE FLEXIÓN

Los ensayos de flexión es un ensayo mecánico para medir resistencias, rigidez y ductilidad para un material sometido a cargas de flectoras. Estos ensayos se rigen por diversas normas dependiendo del material y el país de referencia. Por otro lado, estos consisten en aplicar una carga gradual creciente sobre un material con dimensiones basadas en su respectiva norma, este ensayo tiene la duración correspondiente a un grado de curvatura o hasta la fractura del material.

- Las propiedades que uno puede determinar con el ensayo de flexión y basados en la norma ASTM D198 para tres puntos como se ve en la Figura 16 son las siguientes [14]:

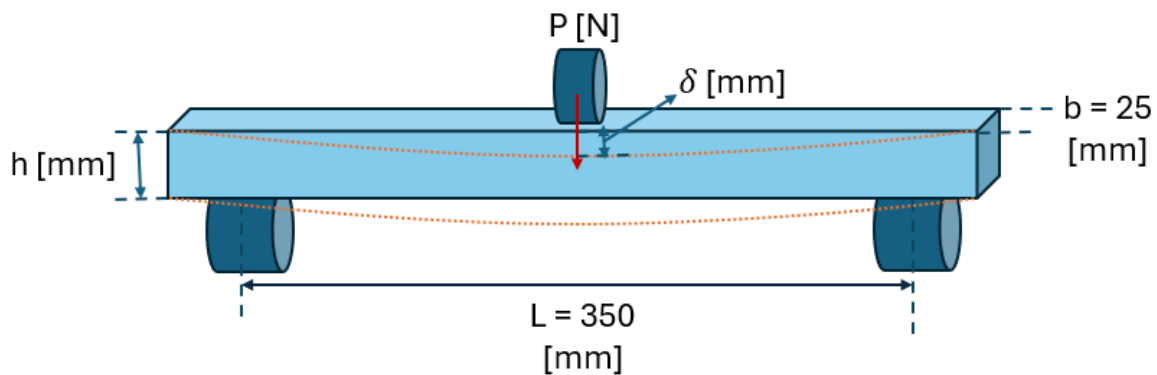


Figura 16 Esquema ensayo de flexión en tres puntos

- Esfuerzo aplicado, σ . Esta propiedad refiere al valor de Esfuerzo aplicado en función del momento de flector para una viga sometida a carga en tres puntos, el momento de inercia y el eje neutro. [14]

$$\sigma = \frac{M * Y_N}{I_z} \quad \text{Ec. 3}$$

En este caso, no podemos usar las ecuaciones de flexión convencionales para el cálculo del “eje neutro” (Y_N), ni el momento de inercia, pues la rigidez que ofrece cada parte del material compuesto juega un rol importante en su comportamiento ante esfuerzos flexores. Es por esto que el eje neutro es desplazado en función del módulo de elasticidad de cada

material, su aporte volumétrico (o área transversal) y la distancia al eje neutro de referencia inicial, como se puede observar en la Figura 17. [15]
[16]

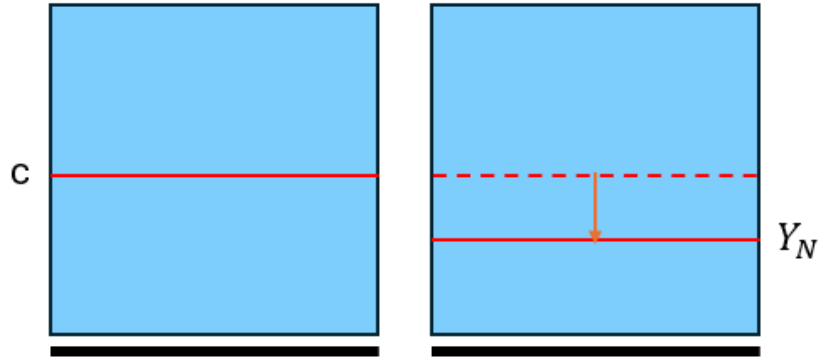


Figura 17 Desplazamiento eje neutro

$$Y_N = \frac{E_M * A_{T_M} * Y_M + E_F * A_{T_F} * Y_F}{E_M * A_{T_M} + E_F * A_{T_F}} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde E_M y E_F son los módulos de elasticidad de la madera y la fibra respectivamente. A_{T_M} y A_{T_F} son las áreas transversales para cada caso y, finalmente, Y_M y Y_F son la distancia del eje neutro referencial inicial (el borde inferior de la viga) y el eje neutro de cada material por sí solo.

Por otro lado, el momento de inercia del compuesto también va ponderado por cada módulo de elasticidad y el aporte de este al compuesto y normalizado, siendo la Ec. 5.

$$I_Z = \frac{(E_M * (I_M + A_{T_M} * (Y_M - c)^2) + E_F * (I_F + A_{T_F} * (Y_F - c)^2))}{(E_M + E_F)} \quad \text{Ec. 5}$$

Mientras que el momento flector se utiliza la ecuación tradicional, siendo esta la Ec. 6 [14]

$$M = \frac{P * L}{4} \quad \text{Ec. 6}$$

De esta forma, al tener obtener estos valores, se indica que para una misma carga se tienen menores esfuerzos aplicados en la zona de tracción.

Módulo de elasticidad aparente, E_{app} . Esta propiedad entrega el valor de la rigidez de un material bajo una carga de flexión, sin considerar los esfuerzos de corte. Esta es dimensionada en [MPa] el cual viene dado por la Ec. 7.

$$E_{app} = \frac{M * Y_N}{I_z} * \frac{L^2}{6 * h * \delta} \quad \text{Ec. 7}$$

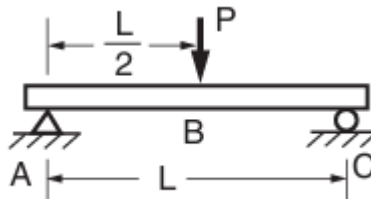
Donde δ es el desplazamiento del punzón (o flecha) y h el espesor total de la viga. Esto en función del esfuerzo y deformación queda en la Ec. 8.

$$E_{app} = \frac{d\sigma}{d\epsilon} \quad \text{Ec. 8}$$

De aquí ϵ viene de la Ec. 9.

$$\epsilon = \frac{6 * h * \delta}{L^2} \quad \text{Ec. 9}$$

Estas propiedades se rigen por el momento flector de una viga cargada en tres puntos, donde el momento máximo se encuentra en el centro como se puede ver en la Figura 18, siendo este el punto analizado pues es donde ocurren las fallas y los fenómenos a analizar. Si se quiere realizar un análisis estructural, se recomienda utilizar matrices estructurales con análisis matriciales más complejos.



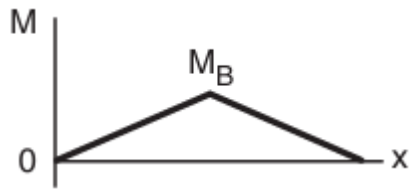


Figura 18 Momento flexor máximo para una viga en tres puntos. [17]

Las normas que rigen estos ensayos para madera son principalmente las normas ASTM D198 y la norma ASTM D143. Por otro lado, está la norma chilena NCh 978 la cual se basa en la norma internacional ASTM D143. En la presente investigación se utilizó la norma chilena como base para los ensayos de flexión tanto para madera sola en su caracterización como para la madera reforzada. La principal diferenciación entre la norma ASTM D198 y la norma ASTM D143 radica en las dimensiones de los cupones a ensayar como también el tipo de cabezal flexor que se utiliza, pues en el primero es un ensayo en cuatro puntos, mientras que el segundo el cual ocupa probetas de menores dimensiones es ensayado en tres puntos, donde, además, se utilizará el método secundario, similar a lo que realizó Gonzalo Hernández y Juan Pinilla midiendo propiedades básicas de madera de Acacio. [18]

Por otro lado, se tiene que el comportamiento en flexión en la zona superior es compresivo, mientras que en la zona inferior es de tensión. Además, para probetas de sección cuadrada, se tiene que el esfuerzo aplicado en la zona superior es igual al sufrido en la zona inferior, sin embargo, dependiendo de la naturaleza del material aplicado, la falla comienza en donde el material tenga una menor resistencia a los esfuerzos. Esto se puede explicar con la Figura 19, donde la zona de tensión tiene una menor resistencia en la cual comienza la fractura.

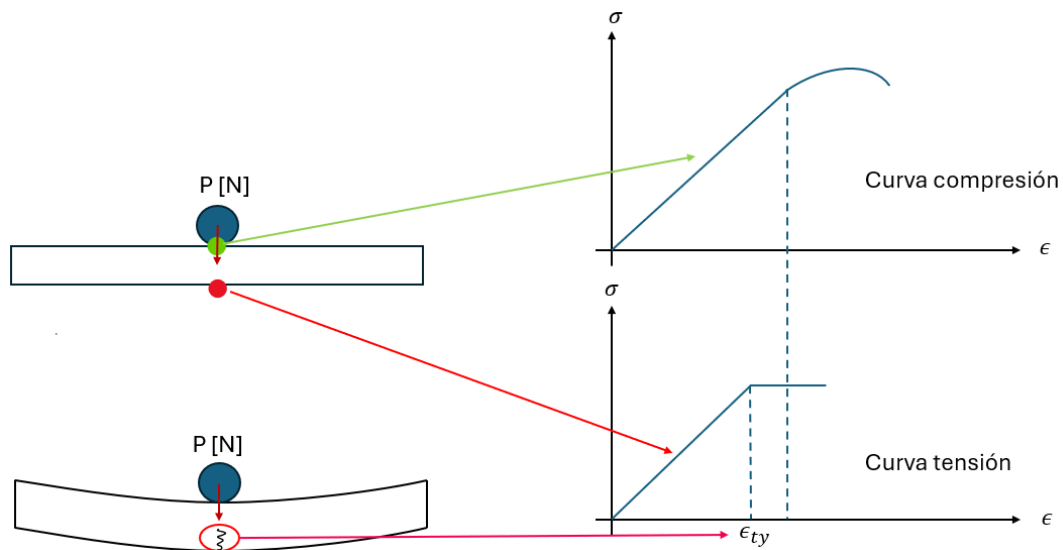


Figura 19 Comportamiento de una viga en sus zonas de tensión y compresión. [14]

Por lo tanto, al aplicar un reforzamiento en la zona inferior de CFRP, donde se tiene una combinación en la rigidez, se tiene que para una misma deformación en donde comienza el agrietamiento el compuesto tiene una mucho mayor resistencia. Esto se puede esquematizar en la Figura 20.

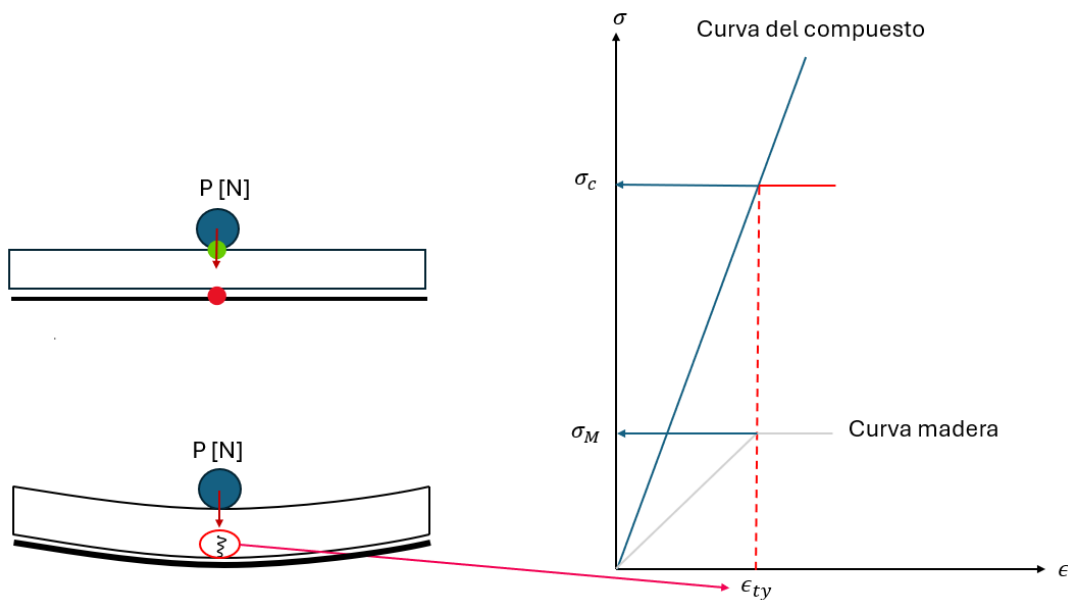


Figura 20 Esquema viga reforzada en zona de tensión.

2.4.2 ENSAYO DE ADHESIÓN

Un adhesivo es una sustancia que es capaz de mantener dos sustratos o superficies unidas de manera funcional. Esta refiere a una adhesividad que puede alcanzar, la cual no es una propiedad intrínseca del material, sino que es una respuesta a una deformación y puede variar según la afinidad del adhesivo al material base.

El delaminado es una variable importante en la aplicación de un reforzamiento con FRP, pues es momento o fenómeno en donde las superficies previamente adheridas se separan de forma definitiva tras una deformación provocada por la aplicación de esfuerzos continuos. Esto se puede esquematizar en la Figura 21, donde si bien no se ve delaminación, si se ve como el adhesivo se deforma.

Este tipo de ensayo mide la resistencia a esfuerzos de corte o cizalladura para la unión adherida entre dos materiales. Este método es aplicable para cualquier FRP, que en este caso fue con CFRP y en cualquier orientación de la fibra que se utilice.

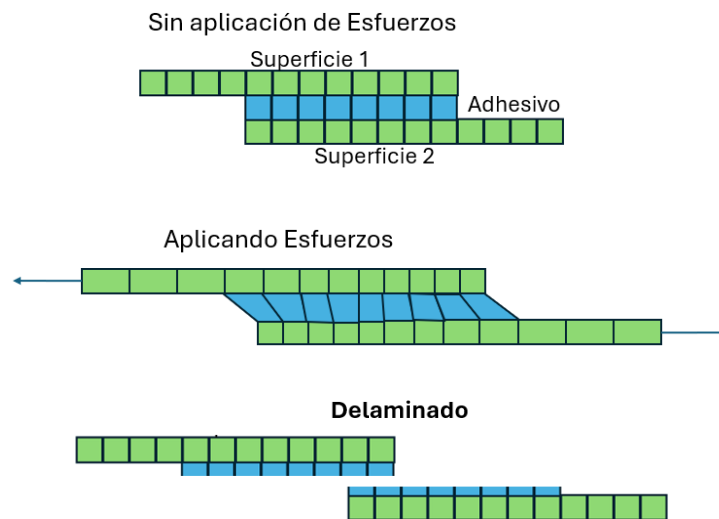


Figura 21 Efecto de la aplicación de esfuerzos en el adhesivo

Este método de ensayo, además, puede hacer comparativa entre tratamientos superficiales de los materiales a adherir para comprobar su resistencia previa al

delaminado que pueden sufrir los materiales en casos de unión química que da como resultado la aplicación de resina.

Este ensayo es regido por diversas normas, en este caso, se basó en la norma internacional ASTM D5868, donde el valor final de resistencia se entrega en [MPa]. Finalmente se puede observar en la Figura 22 de forma ilustrativa el mecanismo aplicado para ensayar la adhesión de Madera-CFRP.

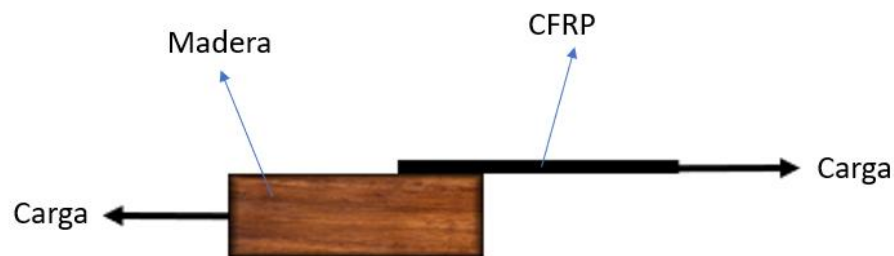


Figura 22 Esquema ensayo de adhesión Madera-CFRP

2.5 ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

2.5.1 INTRODUCCIÓN

Para esto se analizó el caso de Yeou-Fong Li et al. donde se habla acerca del mejoramiento del rendimiento a flexión de vigas de madera reacondicionadas con láminas de CFRP. Los experimentos realizados para la formulación de este artículo fueron ensayos de flexión en cuatro puntos. Luego, para evaluar el rendimiento del compuesto, se investigaron las propiedades mecánicas de su resistencia a la flexión y el desplazamiento vertical de la flecha. [19]

Para esto se analizó las relaciones de esfuerzo - deformación para la combinación madera con CFRP, considerando que este tiene un comportamiento lineal tanto en tracción como en compresión dentro de su límite proporcional, mientras que tiene un comportamiento no lineal cuando se supera este límite mencionado, adoptando un comportamiento no lineal de serie de potencias. Esto se observa en la Figura 23 . Sin embargo, el CFRP es un material especialmente utilizado en tracción, teniendo así un comportamiento principalmente lineal como modelo.

2.5.2 ANÁLISIS TEÓRICO

En una primera instancia se debió realizar un análisis teórico de la situación, aplicando análisis numérico para simular matemáticamente el comportamiento mecánico que debiese tener el compuesto. Esto se debió a que el equipo utilizado en los ensayos del artículo está controlado por la carga aplicada, por lo que está sujeto a errores. De esta forma se realiza una comparativa entre la curva teórica obtenida y las experimentales, calculando finalmente un error asociado.

Kollman y Kuenzi [8] mencionan que la madera tiene un comportamiento lineal en tracción y compresión dentro del límite proporcional, para luego tener un comportamiento horizontal y polinómico respectivamente, esto se observó en la Figura 23, donde las relaciones de esfuerzo vs deformación de la madera en tracción pueden representarse con las Ec. 10 y Ec. 11.

$$\sigma_{sw} = E_{tw} * \epsilon_{sw}, \text{ cuando } 0 \leq \epsilon_{sw} < \epsilon_{sw0} \quad \text{Ec. 10}$$

$$\sigma_{sw} = \sigma_{swy}, \text{ cuando } \epsilon_{sw0} \leq \epsilon_{sw} < \epsilon_{swu} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde σ_{sw} , ϵ_{sw} y E_{tw} son el esfuerzo de tracción, la deformación en tracción y el módulo de elasticidad de la madera dentro del límite proporcional respectivamente. Por otro lado, σ_{swy} , σ_{swu} y ϵ_{swu} son el esfuerzo de fluencia, el esfuerzo y la deformación máximos en tracción para la madera respectivamente.

Mientras que, para el análisis en compresión, se tienen las Ec. 12 y Ec. 13.

$$\sigma_{cw} = E_{cw} * \epsilon_{cw}, \text{ cuando } 0 \leq \epsilon_{cw} < \epsilon_{cw0} \quad \text{Ec. 12}$$

$$\sigma_{top} = A * \epsilon^2 + B * \epsilon + C, \text{ cuando } \epsilon_{cw0} \leq \epsilon_{cw} < \epsilon_{cwu} \quad \text{Ec. 13}$$

Además, se estudió la relación de la tensión vs deformación para un material compuesto de CFRP la cual es lineal, esto se puede observar en la Figura 23, en donde ϵ_{sfu} , σ_{sfu} y E_{sf} son la deformación máxima, el esfuerzo máximo y el módulo elástico del material compuesto con CFRP respectivamente. Estas se pueden expresar con las Ec. 14 y Ec. 15.

$$\sigma_{sf} = E_{sf} * \epsilon_{sf}, \text{ cuando } 0 \leq \epsilon_{sf} < \epsilon_{sfu} \quad \text{Ec. 14}$$

$$\sigma_{sf} = 0, \quad \text{cuando } \epsilon_{sf} \geq \epsilon_{sfu}$$

Ec. 15

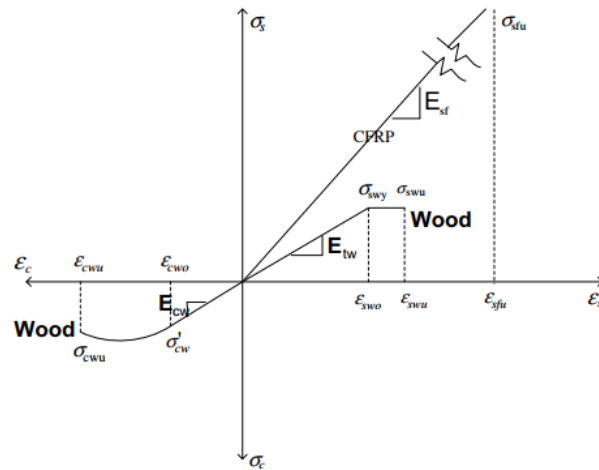


Figura 23 Esfuerzo vs Deformación para un compuesto de CFRP en madera

Aquí se utilizó la relación clásica de carga - desplazamiento.

(1) deslizamiento entre las láminas de CFRP y la superficie de la madera.

2.5.3 EXPERIMENTOS REALIZADOS.

Los materiales que se utilizaron fueron maderas tipo *Cunninghamia lanceolata* con una densidad media de 0.41 [g/cm³] y con una humedad del 15%.

Mientras que el CFRP consiste en dos partes: la matriz de fibra de carbono y la resina epoxi. La fibra de carbono es el material de reforzamiento que otorga al CFRP alta resistencia y módulo de elasticidad.

Para el diseño de las vigas de madera se utilizó la norma ASTM D198, de esta forma se asegura que la viga efectivamente mostrara fallos de flexión. Las vigas de madera tenían longitudes de 110 [cm] en longitud x 6.5 [cm] de ancho x 6.5 [cm] de alto. De forma ilustrativa se puede observar en la Figura 24 como es el ensayo de flexión en cuatro puntos para la configuración realizada en el artículo. Se hicieron ocho grupos de especímenes, los cuales cada uno contaba con tres vigas. El grupo A son vigas de madera *T. Chinensis* puras; los grupos B, C y D son vigas de madera *T. Chinensis* con 1, 2 y 3 capas de CFRP respectivamente.

De esta misma forma, el grupo E son vigas de madera del tipo Cumming lanceolata puras; mientras que los grupos F, G y H son vigas de madera Cumming lanceolata con 1, 2 y 3 capas de CFRP respectivamente. Para este artículo, la cantidad óptima de resina epoxi para las vigas de madera reforzadas con CFRP es de alrededor 250 [g/m²].

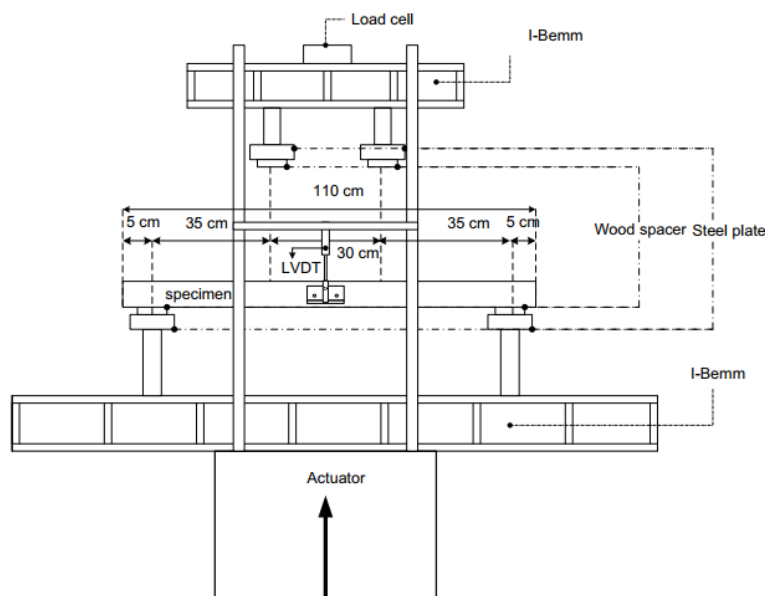


Figura 24 Diagrama ilustrativo para un ensayo de flexión en cuatro puntos

Las láminas de CFRP fueron adheridas al lado de que sufre tensión en las vigas, las cuales son la zona inferior de estas. El criterio para determinar el rendimiento del método de reforzamiento toma en consideración los efectos de la resistencia y el desplazamiento vertical de los punzones de flexión.

2.5.4 RESULTADOS.

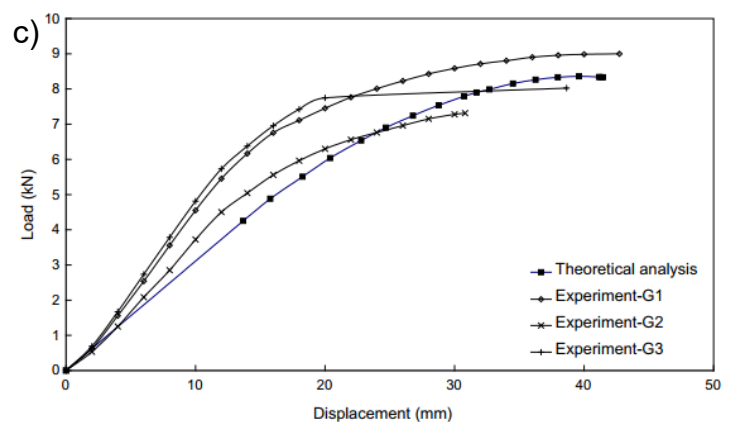
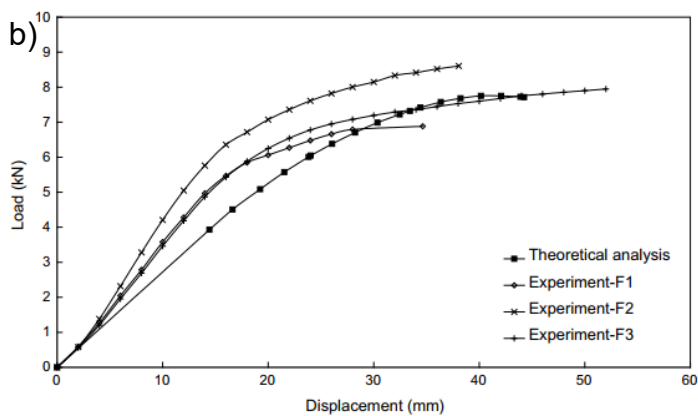
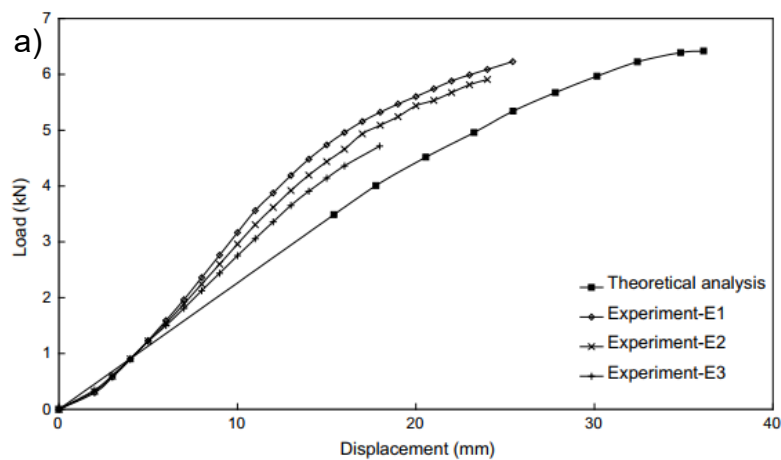
El análisis teórico y experimentales de la carga - desplazamiento de las vigas de madera de *T. chinensis* sin reforzamiento se muestran en la Figura 25 a), mientras que las reforzadas con 1, 2 y 3 capas de láminas de CFRP se muestran en b), c) y d) respectivamente.

En todas las Figuras de los diagramas de carga vs desplazamiento indican que los valores teóricos obtenidos mediante análisis numérico y experimentales de

cargas máximas son muy cercanos. También comparando las vigas sin reforzamiento con las con reforzamiento se puede ver una tendencia incremental en la resistencia a la flexión.

La Tabla 2 muestra los porcentajes de incremento de la carga máxima media experimental para las vigas de madera *T. chinensis* reforzadas con 1, 2 y 3 capas de CFRP, los cuales son 44%, 55% y 58% respectivamente.

En cuanto a la comparación entre los valores experimentales y los teóricos, el porcentaje de error absoluto de la carga máxima fue calculada según la Ecuación (5). Donde los valores para la *T. chinensis* fue entre 6.50 y 11.38% (que en promedio fue de 8.65%).



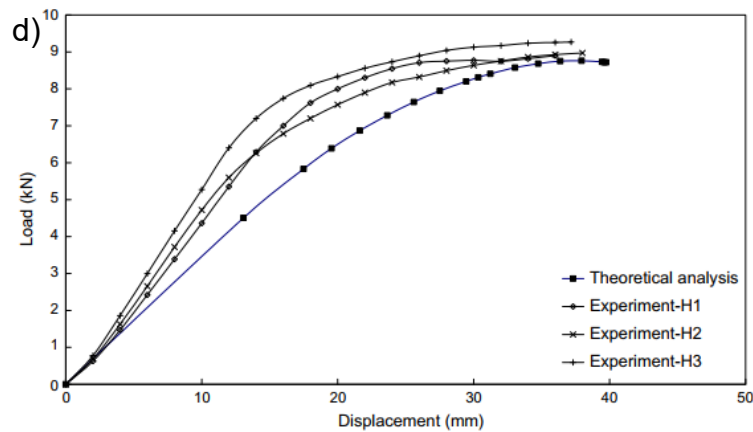


Figura 25 Curvas Carga-Desplazamiento para T. Chinensis a) Madera sin reforzamiento, b) Madera con 1 capa de CFRP, c) Madera con 2 capas de CFRP, d) Madera con 3 capas de CFRP

Tabla 2 Carga máxima teórica y experimenta, porcentajes de incremento promedio de la carga máxima, y error absoluto para vigas T. chinensis reforzadas con CFRP.

Espécimen	Carga máxima teórica (kN)	Carga máxima experimental promedio (kN)	Porcentaje incrementado (%)	Error absoluto de la carga máxima (%)
Grupo A (sin reforzamiento)	6.46	6.04 (8.92%)	-	6.50
Grupo B (reforzada con 1 capa)	7.82	8.71 (5.07%)	44	11.38
Grupo C (reforzada con 2 capas)	8.49	9.35 (9.74%)	55	10.13
Grupo D (reforzada con 3 capas)	8.96	9.55 (0.97%)	58	6.59

Como conclusiones del trabajo que se realizó, se tuvieron:

- (1) La resistencia a la flexión aumenta en los compuestos reforzados con CFRP, sin embargo, el desplazamiento de la flecha disminuye.
- (2) El desplazamiento vertical se veía reducido a medida que aumentaban las capas de láminas de CFRP.
- (3) Se encuentran errores absolutos para la carga máxima entre los valores teóricos y experimentales para las vigas con madera T. chinensis de 8.65%, por lo que toman los resultados como válidos
- (4) La carga máxima en flexión para las vigas reforzadas con T. chinensis aumentaron 44%, 55% y 58% para 1, 2 y 3 capas de láminas de CFRP respectivamente.

Por lo tanto, se tiene que el reforzamiento de vigas de madera con CFRP para las maderas del tipo T. chinensis es factible y buena forma de mejoramiento estructural.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 MATERIALES UTILIZADOS

Para realizar los ensayos, se tendrán vigas de madera de pino radiata chilensis, con una humedad inferior al 12% en su manufactura y aproximado en ensayos. Las dimensiones fueron dadas por la norma chilena de ensayos de madera NCh987, la cual viene dada específicamente para ensayos de flexión y homologa la norma ASTM D143. Para más detalles ver ANEXOS 3.

En cuanto a la fibra de carbono, se tendrá una PAN (base de poliacrilonitrilo) con tejido tipo Plain de 3k tanto en urdimbre como en trama, para la cual, además, se hará el curado y adhesión a las vigas de madera con resina epóxica Mepox. Teniendo las propiedades en la Tabla 3. Datos obtenidos por el proveedor.

Tabla 3 Propiedades de la Fibra de Carbono utilizada

Resistencia a la tensión, MPa	Módulo de tensión, GPa	Elongación a rotura, %
3800	280	1.6

Para la manufactura del material compuesto de madera con CFRP, se utilizarán bombas de vacío, para poder realizar una buena adhesión del reforzamiento al momento de su curado, de esta forma se alcanzan las mejores propiedades mecánicas para su uso.

Los materiales para los ensayos de adhesión fueron los mismos, pero con distintas dimensiones, los cuales fueron basados en la norma ASTM D5868 para el caso del CFRP, mientras que para la madera se mantuvo las dimensiones de largo y ancho, pero de espesor variaron para adecuarse a los equipos de corte y garantizar un buen agarre en el equipo de ensayos universales.

3.2 EQUIPOS A UTILIZAR

Para la adhesión del CFRP a las vigas de madera se utilizarán brochas y rodillos especiales para evitar atrapamiento de burbujas. Además, se contará con bombas de vacío para una mejor distribución de resina y adhesión a la viga de madera.

Para la caracterización de la madera se utilizará el equipo de ensayos universales Zwick/Roell Z030 del departamento de Ingeniería Civil Metalúrgica, Minas y Materiales, con los cabezales específicos para tensión, compresión y flexión. El cual se observa en la Figura 26.



Figura 26 Equipo de Ensayos Universales Zwick/Roell Z030 configurado para compresión

Para los ensayos de flexión, se utilizará el equipo de ensayos universales Zwick/Roell Z030 ubicado en la planta baja del departamento de Ingeniería Civil Metalúrgica, Minas y Materiales, con la configuración de flexión en tres puntos.

Para las pruebas de adhesión, se utilizará el equipo de ensayos universales Zwick/Roell Z030 del departamento de Ingeniería Civil Metalúrgica, Minas y Materiales, con los cabezales específicos para tensión.

Para las indentaciones del CFRP para los ensayos de adhesión se utilizarán mallas de acero inoxidable para tamiz de mineral de 3/8 in y No. 14 (Número ASTM) de abertura, como se muestran en la Figura 27.

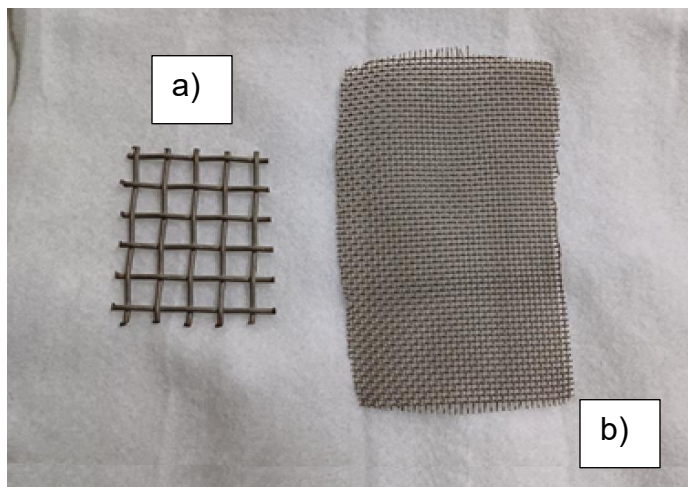


Figura 27 Mallas para indentación. a) 3/8 in b) No. 14

3.3 EXPERIMENTOS PRELIMINARES

Se realizaron experimentos preliminares para definir las directrices de los ensayos y los parámetros a considerar para poder mejorar y tener en consideración las variables que pueden afectar el comportamiento mecánico del compuesto CFRP-Madera.

Realizando así diversos ensayos de flexión en tres puntos con probetas de distintas dimensiones y laminadas de diversos métodos hasta encontrar un punto y una norma que se adecúe a los equipos disponibles en la Universidad.

En la Figura 28 se observa los primeros reforzamientos utilizados para realizar los ensayos de flexión, con vigas sin estandarización y con un envoltorio de reforzamiento.

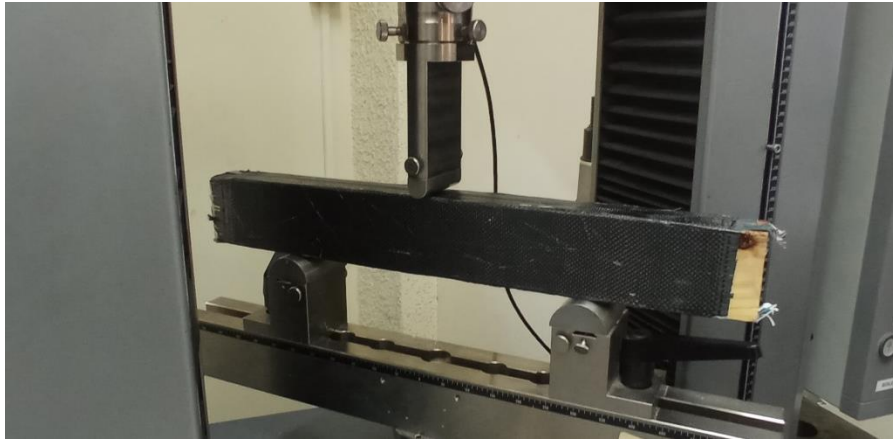


Figura 28 Primeras vigas de flexión para madera envuelta en CFRP

En la Figura 29 se observa la situación previa a la utilizada de forma final, donde se tienen vigas de sección rectangular laminadas solo por la zona de tensión. Sin embargo, esta configuración debido a su alta relación de altura-espesor tiene un gran momento de inercia, provocando que el punzón de flexión en tres puntos provoque una hendidura en la madera, motivando así a los esfuerzos de cortes sobre los de flexión y métodos de fractura inadecuados para las conclusiones esperadas.

Además, en los ANEXOS 1 se ve de forma más detallada en imágenes el proceso de manufactura.

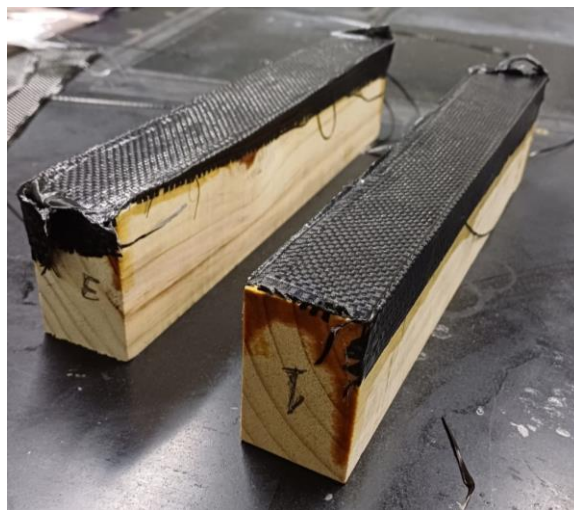


Figura 29 Vigas altas preliminares, laminadas en zona de tensión.

Con todo lo anterior, se decidió registrarse bajo la norma ASTM D143 para la estandarización de los experimentos y su correcta realización, además, de la laminación en la zona de tensión para un uso óptimo del CFRP.

3.4 ENSAYOS A REALIZAR Y MATRIZ EXPERIMENTAL

En una primera instancia se necesita conocer los materiales a trabajar, de esta forma el análisis del compuesto final será mucho más fácil de comprender y tendrá una mejor precisión en las conclusiones. Por lo que se deberá conocer el comportamiento de la madera en tracción, en compresión, y en flexión realizando ambos ensayos bajo la norma ASTM D143, con el fin de tener las resistencias en cada caso considerando el comportamiento ortotrópico de la madera. Se realizó por modelamiento el diseño de cada una de las piezas para la caracterización de la madera, estas se pueden observar en la Figura 30.

Posteriormente, cuando se tenga caracterizado los materiales a utilizar, se realizarán ensayos de flexión y adhesividad al compuesto Madera-CFRP donde se cumplirán los distintos objetivos propuestos. Los ensayos de flexión por su parte estarán regidos por la norma NCh978 con modificaciones a la norma internacional de madera ASTM D143. Mientras que los ensayos de adhesividad se realizarán bajo la norma ASTM D5868.

El reporte de los resultados será en esfuerzo - deformación, de forma de estandarizar los datos obtenidos para cualquier dimensión, donde se realizará flexión en tres puntos como se esquematiza en la Figura 31.

Dentro de lo que son las variables que se analizaron están:

1. Número de Capas.
2. Dirección de la Fibra.
3. Longitud del reforzamiento de CFRP.

Para el número de capas se tiene la variable de la rigidez que aporta cada una de estas, además, pues cada una de estas aporta en la resistencia a la flexión. Esta

variable cuenta con el análisis del reforzamiento de 1, 2 y 3 capas, y cuanto aporta cada una de estas.

En el segundo punto, variar en la dirección de la fibra puede resultar favorable para ciertas propiedades mecánicas, al ser el CFRP un compuesto anisotrópico, tiene distintos comportamientos mecánicos según por donde se apliquen los esfuerzos.

Dentro de los ensayos de flexión, finalmente, se analizará la variable de la longitud del refuerzo, si es que fue necesario reforzar toda la viga o basta con reforzar una sección de esta.

El ensayo de adhesividad consta de una placa de madera y una placa de CFRP. El CFRP es adherido a 3,5 [cm] de uno de los bordes de la madera para luego ser afirmado por cada uno de los materiales. En la zona inferior para el cabezal fijo sostuvo la placa de madera, mientras que el cabezal movable sostuvo el CFRP. El ensayo se realizó a una velocidad de 13 [mm/min] según lo que recomienda la norma.

Este ensayo se realizó en tres condiciones para comparar tratamientos superficiales de la madera, el primero sin tratamiento superficial, es decir con la madera cepillada totalmente lisa, el segundo con un tratamiento de mallado grueso, donde se indentó la madera con una malla de 3/8 in con un equipo compresivo a 2500 [N], mientras que el tercer caso consistía en una indentación con una malla No. 14 con el mismo equipo compresivo y la misma fuerza.

Para la caracterización del material se realizarán un total de 14 ensayos, entre tracción, compresión y flexión para madera en triplicado.

En cuanto a los ensayos para el cumplimiento de las actividades son un total de 30 ensayos, teniendo 21 ensayos de flexión y 9 para la adhesividad.

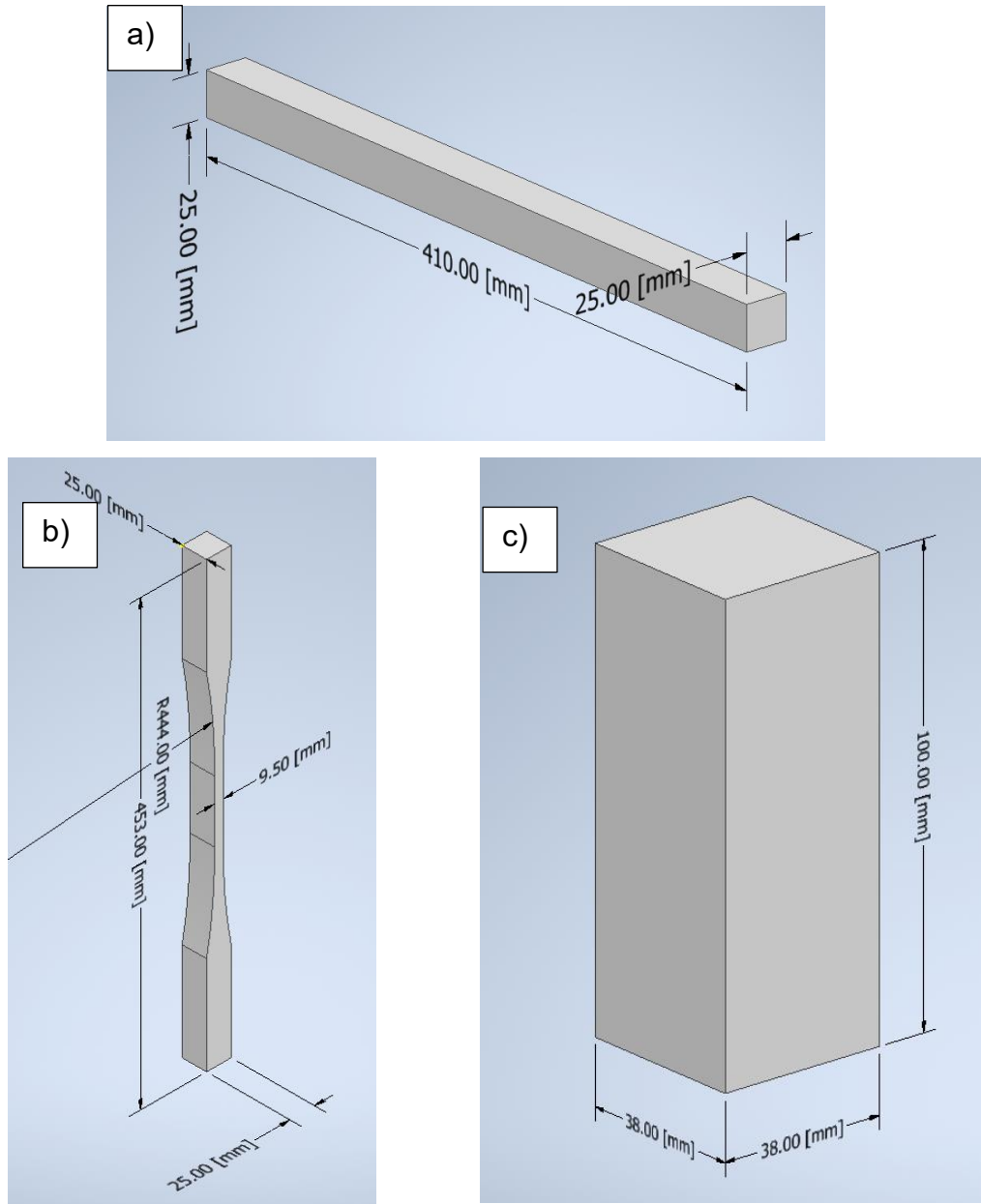


Figura 30 Probetas Caracterización madera. a) Probeta de Flexión, b) Probeta de Tracción, c) Probeta de Compresión

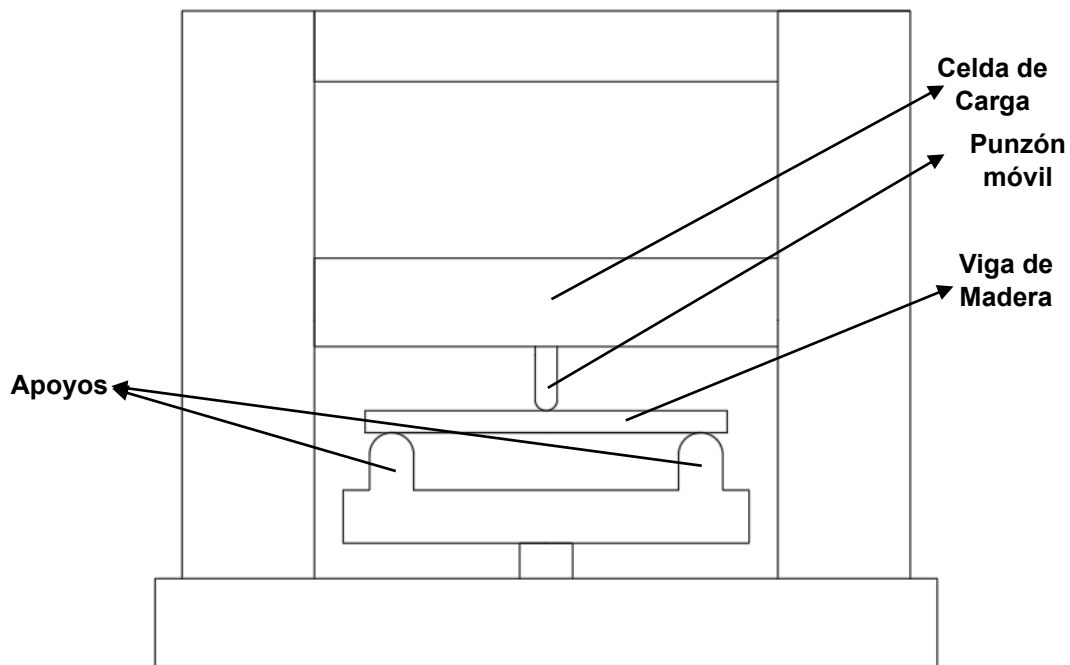


Figura 31 Esquema ensayo de Flexión en tres puntos

El criterio para comparar el rendimiento en flexión de cada variable es la carga máxima, el recorrido de la flecha y el módulo de elasticidad. Además, se analizó el porcentaje de mejora en comparación con una viga de madera sin reforzar y el peso inicial y final para analizar el % de mejora en función de la adición de masa al compuesto. También se analizó el método de fractura en cada caso de flexión y el número de vetas en cada viga.

La matriz de ensayos se expuso en la Figura 32, en donde se puede observar cada objetivo específico y la variable asociada al cumplimiento de este, donde también, en la tercera columna, se ve el tipo de ensayo necesario para llevarlo a cabo. Finalmente se muestra un esquema de lo que refiera cada variable.

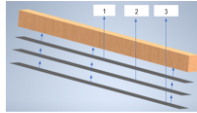
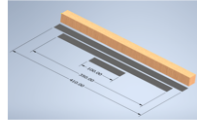
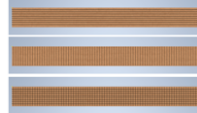
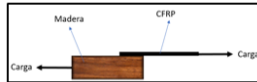
	Variable			Ensayo	Configuración
Actividad 1	Número de capas de CFRP			Flexión NCh 987	
	1	2	3		
Actividad 2	Longitud del Reforzamiento de CFRP [mm]			Flexión NCh 987	
	410	350	100		
Actividad 3	Direccionalidad del Reforzamiento de CFRP			Flexión NCh 987	
	Urdimbre	Trama	Bidireccional		
Actividad 4	Tratamiento Superficial (rugosidad)			Adhesión ASTM D5868	
	Cepillada	Malla 3/8 in	Malla No. 14		

Figura 32 Matriz de Ensayos

3.5 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.5.1 MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN 3D EN ANSYS STRUCTURAL.

El primer paso del procedimiento experimental fue realizar una simulación en ANSYS Structural de la situación de flexión en tres puntos para conocer donde se encuentran los esfuerzos máximos de una viga de madera. De esta forma se tendrá conocimiento del lugar específico para aplicar el reforzamiento de CFRP.

Para esto se utilizó el software incluido en ANSYS Structural para el modelamiento en 3D SpaceClaim. Para luego por método de elementos finitos con Mechanical que es un software nativo de ANSYS.

En SpaceClaim se modeló en 3D la viga de madera sin reforzamiento, donde, además, se aplicó la metodología emulando un ensayo de flexión, tal como se puede observar en la Figura 33.

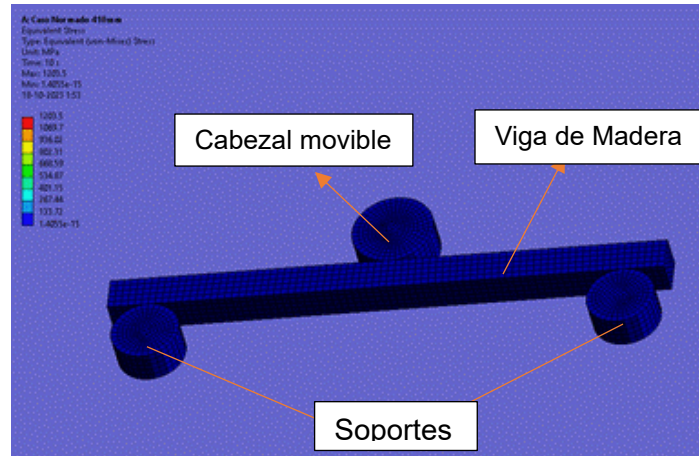


Figura 33 Modelado 3D Viga de madera SpaceClaim (ANSYS Structural)

Para finalizar la simulación, en Mechanical se obtuvo los resultados de la Figura 34, donde en a) se tiene la vista inferior de la viga, mientras que en b) la zona superior. Como se observó en la figura, se tiene que la coloración roja indica los mayores esfuerzos, lo que los ubica tanto en la zona inferior como superior se encuentran los esfuerzos máximos, sin embargo, la zona superior de la viga solo sufre esfuerzos de compresión, mientras que la zona inferior de esta sufre los esfuerzos de tensión. Y como ya se discutió previamente, el CFRP es un material compuesto que funciona en tensión, por lo que la zona a reforzar es la inferior.

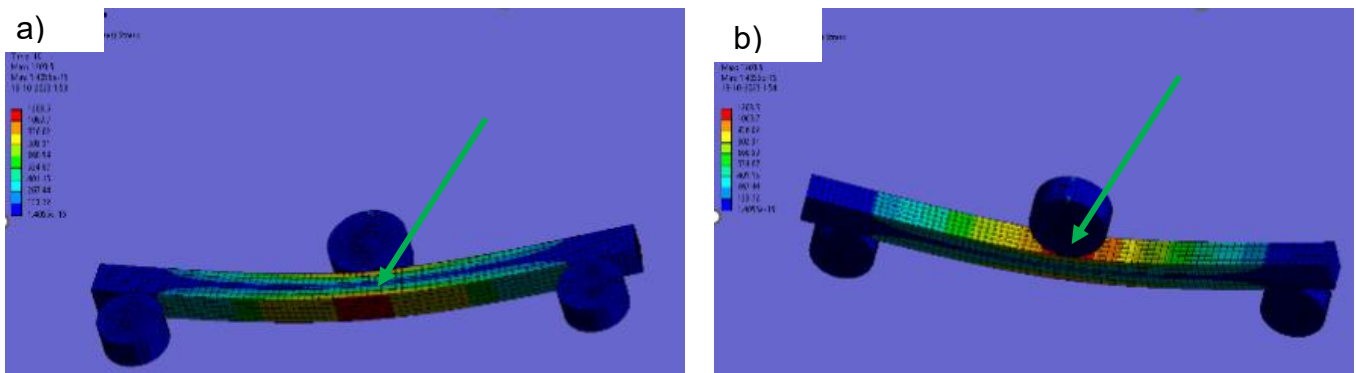


Figura 34 Esfuerzos máximos viga de madera. a) Zona inferior, b) Zona superior

3.5.2 ENSAYOS FLEXIÓN

Una de las variables que se consideró, es la orientación de la fibra, esto debido a que como se mencionó en un comienzo, no existe un mismo comportamiento para

la disposición de la fibra en su urdimbre como en la trama, o en forma bidireccional. Al ser otra variable de estudio, se tendrá en la matriz de ensayos las pruebas en los tres casos y en triplicado. La dirección de la urdimbre es por 0° en la dirección del rollo de tela de la fibra de carbono. Mientras que en la trama es a 90° de la dirección del rollo de tela de fibra. De forma bidireccional se considera una capa en un sentido, y la otra capa en la otra. Esto se puede observar en la Figura 35, donde en a) tenemos la fibra direccionada hacia su urdimbre, en b) hacia la trama mientras que en c) es de forma bidireccional.

Para cada caso de reforzamiento con el sentido de las capas se utilizó 2 capas, ya sea 2 capas por la urdimbre, 2 capas por la trama, o una capa hacia la urdimbre y otra a la trama correspondiente a cada caso. Además, se utilizaron un largo de 410 [mm] x 25 [mm] el cual cubría toda la viga de forma longitudinal.

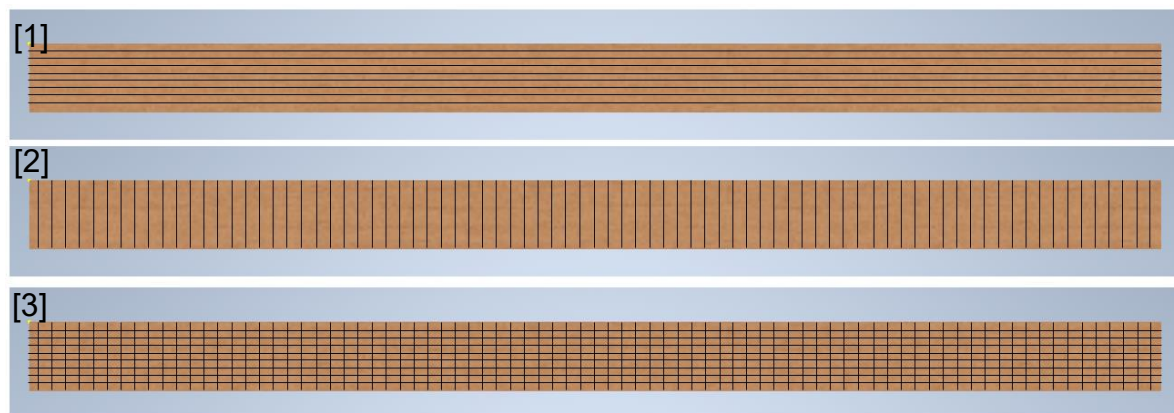


Figura 35 Vigas reforzadas con CFRP. [1] por la urdimbre, [2] por la trama. [3] bidireccional

Por otro lado, la segunda variable es la longitud del reforzamiento, donde para el caso a estudiar se tendrán 3 dimensiones distintas, siendo estas de 410 [mm], 350 [mm] y 100 [mm]. La primera considera todo el largo de la viga, la segunda considera una sección entre los cabecales, y la tercera una pequeña porción de la viga. De esta forma se podrá observar la rigidez del compuesto y la influencia de la cantidad de sección a reforzar. Esto se esquematiza en la Figura 36, donde se observan los distintos reforzamientos y sus longitudes.

Para este caso, también se utilizaron 2 capas de reforzamiento sea cual sea su longitud, además, se utilizaron en la dirección de la urdimbre y con el respectivo ancho de la viga de 25 [mm].

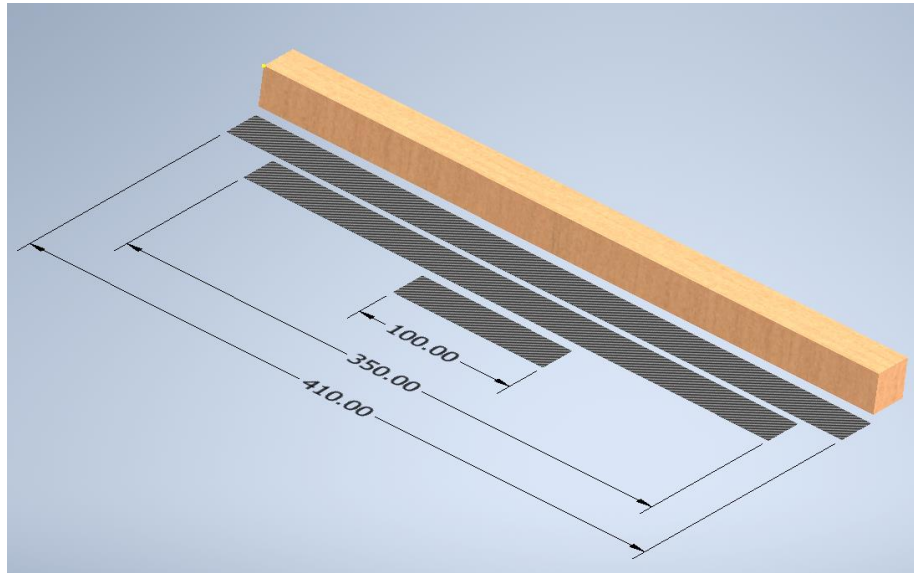


Figura 36 Viga reforzada con distintas longitudes de CFRP. 410[mm], 350[mm], 100[mm]

Posteriormente definidas las dimensiones y la direccionalidad del refuerzo, se procede a fabricar este refuerzo, teniendo en cuenta que serán 1, 2 y 3 capas como parte de la matriz de experimentos, se tendrán que hacer varias capas de CFRP para poder ser adheridas a las vigas de madera. Esto con el sentido de comparar la resistencia y rigidez que entrega cada una de las capas adheridas.

Para este caso, se utilizaron reforzamientos del largo de la viga, es decir, 410 [mm], además, todos direccionados hacia la urdimbre y del ancho de la viga. En la Figura 37 se puede observar el esquema del número de capas de reforzamiento.

Luego, se deberán preparar los materiales a utilizar, tales como la madera, la resina, y los materiales necesarios para el curado de la resina en el compuesto final. Donde se deberán dimensionar bajo las especificaciones que se adecúen a las normas utilizadas y lo que se haya definido en los pasos anteriores.

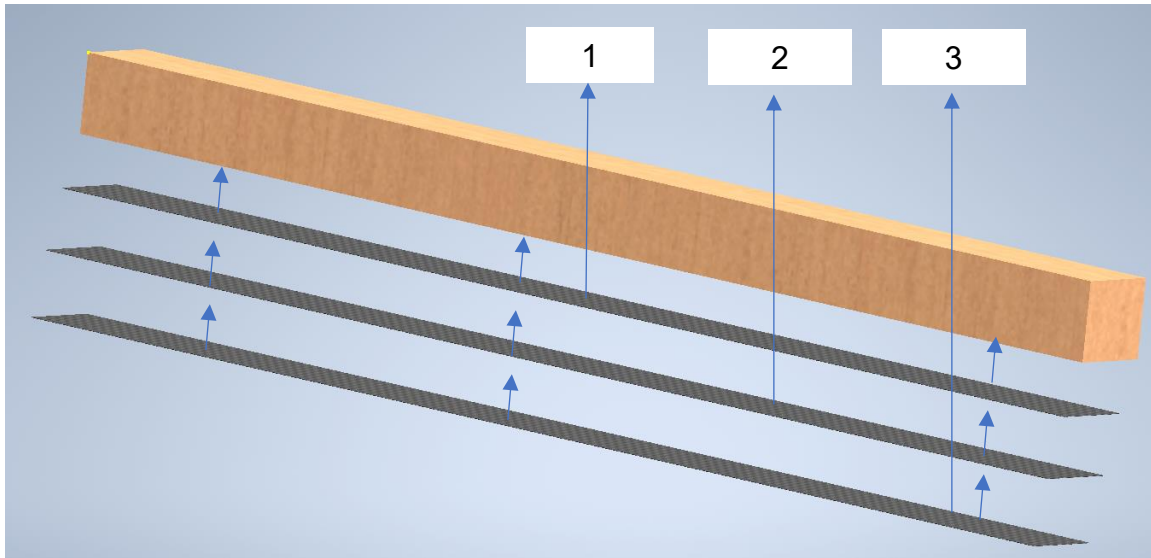


Figura 37 Viga reforzada con distintos números de capas.

Finalmente se colocan las láminas de CFRP con resina epoxi en las vigas de madera en el lugar definido en un comienzo, teniendo que aplicarse con rodillos para evitar el atrapamiento de burbujas y poder afectar en los resultados finales.

Luego, se recubre con Peel-Ply el cual es una tela de poliéster para poder mejorar la definición final del recubrimiento, donde, además, mejora la distribución de la resina epoxi. Posteriormente se coloca una manta absorbente para quitar los excesos de resina. Para que, finalizado los pasos previos, se deje en una bolsa de vacío y quede curando, esto para asegurar una mejor adhesión y calidad de curado.

El curado con la resina utilizada consiste en aplicación a temperatura ambiente por 24 horas en la bolsa de vacío, pasado este tiempo, se debe retirar la viga de la bolsa de vacío, y se introduce a un horno por 4 horas a 50°C para posteriormente elevar la temperatura y dejarlo por dos horas más a 60°C. Finalizado este tiempo, se debe dejar la viga secando por una semana para poder ser sometidas a cargas y poder ser ensayadas bajo la norma chilena NCh978

3.5.3 ENSAYOS ADHESIÓN.

Para los ensayos de adhesión, se realizará la manufactura y ensayo bajo la norma ASTM D5868 para ensayos de adhesividad con algunas modificaciones en el

sistema utilizado. Para los materiales a utilizar, se necesitará madera, CFRP y mallas metálicas con las cuales realizar un patrón a la madera, y así comparar la calidad y resistencia de la adhesión. Con los materiales, se va a “indentar” la madera bajo presión con el equipo de ensayos universales Zwick/Roell Z030 con una carga de 2500 [N]. Se realizarán tres situaciones, la primera es la madera sin alterar su superficie (cepillada), la segunda es con una Malla para tamiz de mineral de 3/8 in, mientras que la tercera es con una Malla para tamiz de mineral No. 14. Una vez alteradas las superficies, se procederá a adherir la fibra con la madera con resina epoxi con dos capas a una distancia de 3,5 [cm] del borde de la madera. Para finalmente dejar curando los cupones manufacturados. Esto se puede observar de forma esquemática en la Figura 38, donde a) es la superficie sin alterar, b) tiene un tratamiento grueso con la Malla de 3/8 in y c) es el tratamiento superficial fino con una Malla No. 14.

Posterior al curado, se ensayarán las probetas en el equipo de ensayos universales Zwick/Roell Z030 con una configuración de tensión, donde la parte superior estará agarrada del CFRP y la inferior a la madera.

En la Figura 39 se puede observar cómo se realizó el ensayo de adhesión para la madera con CFRP. Donde el cabezal inferior sostiene la parte de madera, mientras que el cabezal superior móvil sostiene el CFRP y ejerce la carga hacia

arriba, provocando así un esfuerzo de corte en la zona de adhesión promoviendo la delaminación.

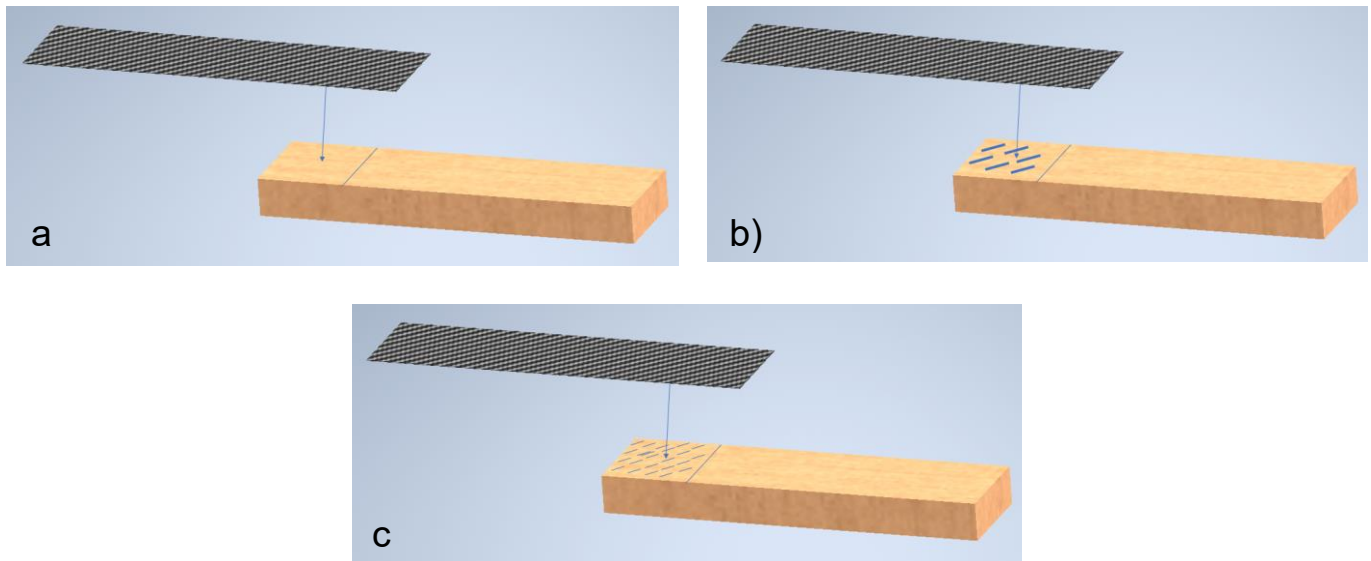


Figura 38 Probetas ensayo adhesión. a) Sin tratamiento superficial, b) Tratamiento superficial con Malla de 3/8 in. c) Tratamiento superficial con Malla No. 14.



Figura 39 Ensayo de adhesión

Se tuvieron las siguientes consideraciones para el trabajo de resultados en el caso de los ensayos de adhesión.

1. No se consideró la descomposición de fuerzas a causa de la inexacta verticalidad del ensayo.
2. El desplazamiento considerado fue el del equipo.
3. En los resultados se consideró una desviación estándar menor al 10%, pues los resultados fueron concluyentes.

3.5.4 TRATAMIENTO DE RESULTADOS

Una vez realizados los experimentos, se utilizó como criterio, como se mencionó en un comienzo, la comparativa del esfuerzo máximo y en fluencia, la deformación y el módulo de elasticidad. Además, se analizó el número de vetas de cada probeta, como también el método de fractura ocurrido. Ya sea puramente flexión, delaminación y/o fractura del CFRP.

Por otro lado, para realizar una comparación entre cada caso más ajustada, debido a que se trabajó cada experiencia en triplicado, se utilizó el promedio de los resultados, sin embargo, si la desviación estándar sobrepasa el 7% no se considerará el resultado.

Para los ensayos de flexión, se trabajarán los datos inicialmente en Excel, mostrando curvas de cada ensayo del triplicado, para luego mostrar la curva promedio con su respectiva desviación estándar. Posteriormente se hizo la comparativa de cada variable para el cumplimiento de los objetivos y se realizó la comparativa con la madera en su estado sin reforzamiento, de esta forma tenemos un porcentaje de mejoramiento visible. Por otro lado, se realizaron curvas teóricas con el comportamiento de la madera sin reforzar y el CFRP como una mezcla de dos compuestos. Así, en la zona de tensión de una viga tenemos tres componentes trabajando: tensión de la madera, compresión de la madera y tensión del CFRP, teniendo estos datos podemos simular la parte lineal de la curva mientras que, sabiendo que el CFRP y la zona de tensión de la madera es lineal, la zona elasto-plástica del ensayo es puramente en compresión de la madera. Así se puede concluir la validez del trabajo realizado en la comparación de las curvas. En el caso de los ensayos de adhesión, se trabajó en excel los resultados para obtener un gráfico de barras de los promedios de carga máxima para cada

variable, y así compararlos con sus respectivas desviaciones estándar. Para estos casos no se tuvo consideración de las vetas de la madera pues no tienen influencia en los resultados.

3.5.5 ANÁLISIS TEÓRICO.

Se realizará un análisis teórico para observar la desviación de la curva en cuanto a su resultado, con esto validar los resultados obtenidos y poder hacer un análisis extra en cuanto a lo ocurrido y la posible falla que se obtuvo de los resultados.

Para esto se realizaron experimentos para caracterizar la madera, y de esta forma tener las propiedades para tensión y flexión de esta. Esto con las dimensiones y normas señaladas en el punto 3.1 MATERIALES UTILIZADOS.

Luego de esto, se considerará una primera parte de la curva como perfectamente elástica utilizando la regla de las mezclas de la Ec. 1, teniendo la componente en flexión de la madera y de tensión del CFRP con sus respectivas fracciones volumétricas para cada capa aplicada, considerando un espesor por capa de 0,17 [mm] medidos. De esta forma la parte perfectamente elástica de la curva viene dada por la ecuación:

$$\sigma = E_c * \delta$$

El punto de fluencia utilizado será puesto de forma arbitraria, pero siguiendo la lógica de los resultados obtenidos para la madera en flexión sin reforzar.

Para la zona elastoplástica fue tomado solo el comportamiento de la curva para compresión de la madera, pues es la única parte del material que tiene este comportamiento. Aproximándola a una ecuación cuadrática, quedando de la siguiente forma, y ejemplificando con la Figura 40:

$$\sigma = A * \delta^2 + B * \delta + C$$

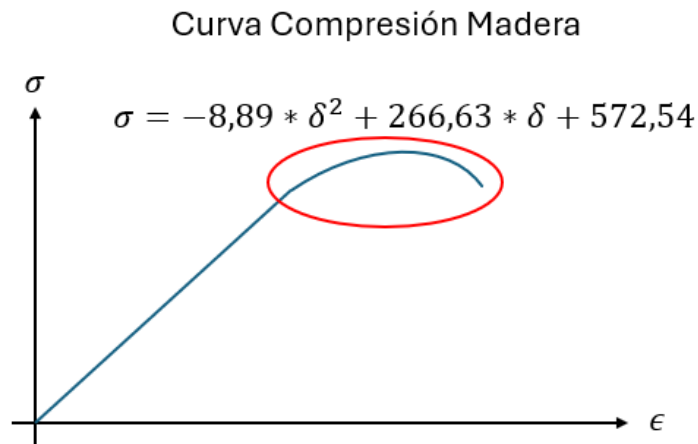


Figura 40 Ejemplo comportamiento elastoplástico para curva teórica y su ecuación cuadrática.

3.6 RESULTADOS ESPERADOS

Dentro de los resultados esperado, como se vio en el trabajo de Yeou-Fong Li et al. es que a una mayor cantidad de capas de reforzamiento de CFRP en una viga de madera se obtienen mejores resultados en la carga máxima que puede aguantar una viga, además, a una misma carga obtener un menor desplazamiento, es decir, aumenta su rigidez. Por otro lado, variando la orientación del CFRP, se obtiene que al trabajar en la urdimbre los resultados son de resistencia en flexión son más altos que orientado hacia la trama, pero reduciendo su rigidez, mientras que las trabajadas de forma bidireccional se obtiene un punto medio de rigidez y resistencia máxima. [19]

En cuanto a la longitud del refuerzo del CFRP, se obtendría que al reforzar la viga completa se obtiene una mayor rigidez del compuesto, mientras que, a menores medidas, su rigidez va disminuyendo. Siendo así que la reforzada 410 [mm] obtiene los mayores resultados, mientras que a medida que disminuye su longitud, estos van disminuyendo.

Finalmente, para el ensayo de adhesión, se espera que el tratamiento superficial más fino, es decir con la malla de 3/8 in sea el que mayor resistencia tenga en comparación a los otros dos, ya que al tener mayor área superficial de donde adherirse habrá mayor área efectiva en el uso de resina. Por otro lado, se esperó

que la superficie sin tratar tenga un rendimiento bastante menor a las otras dos contrapartes.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se muestran y analizan los resultados obtenidos en los ensayos llevados a cabo. Estos resultados acompañan la resolución de los objetivos específicos y por consiguiente el objetivo general del proyecto. Los resultados obtenidos van en base a la caracterización del material matriz que es la madera finalizando con los compuestos realizados.

En un comienzo se analizaron los resultados de los ensayos de caracterización de la madera, se evaluaron también nuevas variables que interfieren en los resultados y cómo afectan al análisis final.

Posteriormente, para analizar los ensayos de flexión, el criterio utilizado fueron los esfuerzos de fluencia y máximos alcanzados, como la deformación total, y la rigidez obtenida. Con esto se podrá concluir el tipo de reforzamiento óptimo para reforzar vigas de madera con un análisis teórico y experimental. Donde el teórico acompañará a la validez de los resultados obtenidos.

Por otro lado, el criterio para los ensayos de adhesión fueron la resistencia máxima alcanzada en cada caso de tratamiento superficial, esto en función del radio del alambre de la malla y la separación de esta. Esto debido a que la profundidad de la indentación tiene influencia en los resultados.

4.1 CARACTERIZACIÓN MADERA

4.1.1 ENSAYO DE COMPRESIÓN

Se realizaron un total de 6 ensayos de compresión a una madera del tipo pino radiata chilensis. De estas seis mediciones se tuvieron dos grupos, donde el primer grupo tenían 5 vetas paralelas al eje de compresión del ensayo, mientras que el segundo tenía tan solo dos vetas en la dirección, estas se pueden apreciar en la Figura 41.



Figura 41 Maderas del Grupo 1 y Grupo 2 con 5 y 2 veta respectivamente.

En el primer grupo los ensayos no llegaron a la fractura pues el equipo de compresión del departamento de Ingeniería Civil Metalúrgica llega hasta los 30kN y esta los sobrepasaba, mientras que en el segundo grupo hubo fractura de las probetas. En la Figura 42 se observa el comportamiento de cada una en función del número de vetas. Quedando en evidencia que tanto la rigidez como la resistencia se ve influida por las vetas en dirección paralela al eje de la carga.

Por otro lado, en la Figura 43 se muestra el comportamiento de las maderas utilizadas y, además, de una curva promedio para la madera con 2 vetas que fue la utilizada finalmente. En este caso se tiene la curva de esfuerzo vs deformación para la estandarización de resultados y la obtención de propiedades importantes en cuanto a los cálculos.

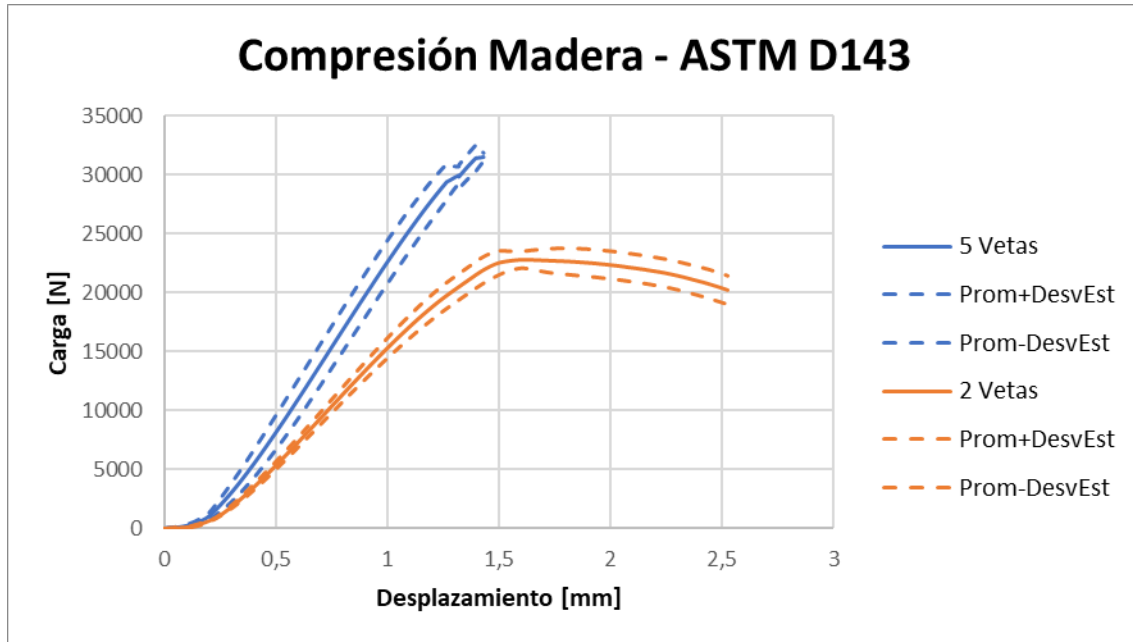


Figura 42 Carga vs Desplazamiento Compresión Madera. Curvas de 2 veta y 5 vetas

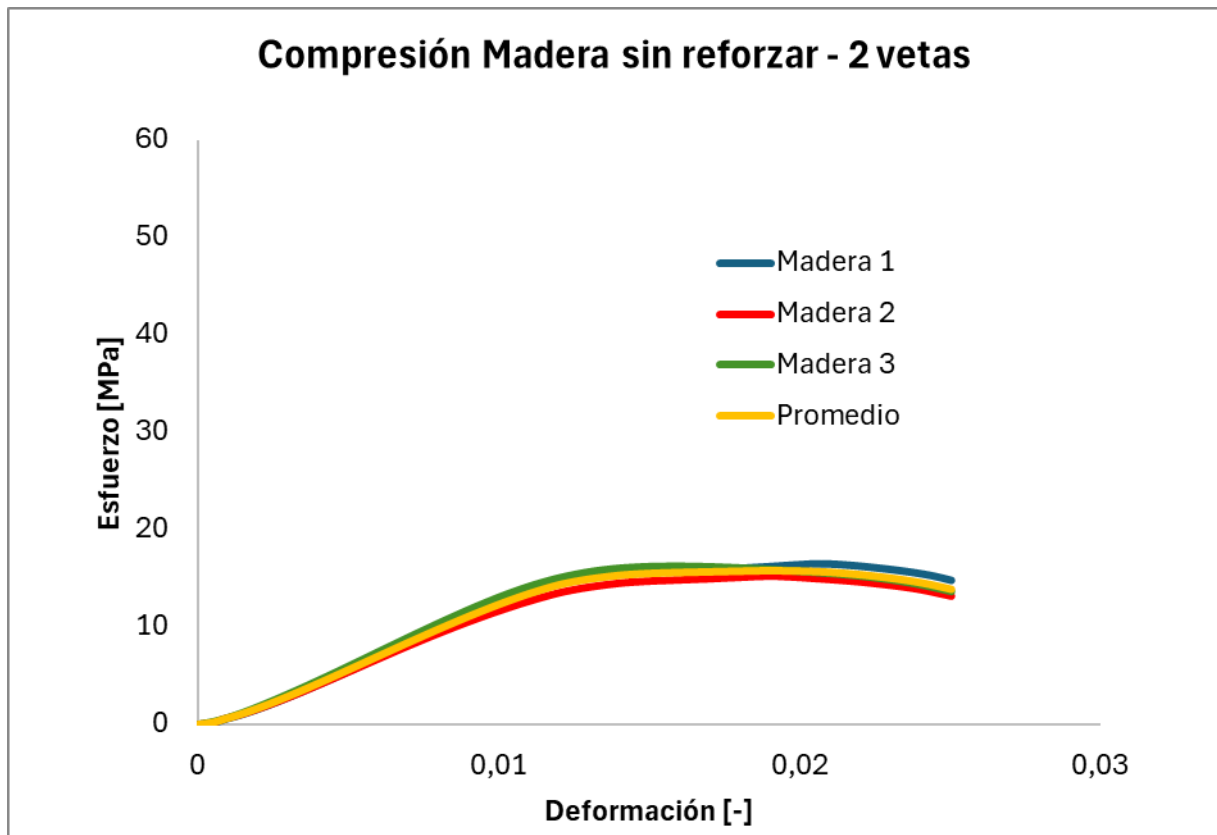


Figura 43 Curva Esfuerzo vs Deformación Compresión con 2 vetas y promedio

Donde los resultados para la madera de 2 vetas están expuestos en la Tabla 4, de aquí es importante resaltar el esfuerzo proporcional promedio, el cual es el punto donde la madera comienza a tener un comportamiento elastoplástico. En una viga, sea cual sea el material, en este punto solo hay esfuerzos de compresión en la zona superior de esta, y, por otro lado, los esfuerzos de tensión dejan de tener efecto. Esto es importante debido a que la curva teórica, en la zona elastoplástica se basó en el comportamiento en compresión de la madera.

Tabla 4 Propiedades en Compresión Madera

Propiedad Mecánica promedio	Madera
Esfuerzo proporcional, MPa	14.93
Deformación proporcional, %	0.013
Módulo Elástico en Compresión, MPa	1350

4.1.2 RESULTADOS ENSAYOS TENSIÓN

Para los ensayos de tensión o tracción, se realizaron tres ensayos, las vetas fueron dos paralelas al esfuerzo en todos los casos. En la Tabla 5 se pueden observar las propiedades de la madera obtenidas con los ensayos realizados en triplicado.

Tabla 5 Propiedades en Tensión Madera

Propiedad Mecánica promedio	Madera
Esfuerzo proporcional, MPa	17.8
Deformación proporcional, %	0.081
Módulo de Elástico en Tensión, MPa	2467

Por otro lado, en la Figura 44 se observa una curva promedio de tensión para la madera, con los experimentos realizados. La curva de la madera dos alcanza tanto esfuerzos superiores como una deformación total mayor, sin embargo, la rigidez de ambas es igual, por lo que se tomará el promedio de las curvas para poder trabajar y también la deformación de la curva de la Madera 1 como método de seguridad en el trabajo de los datos.

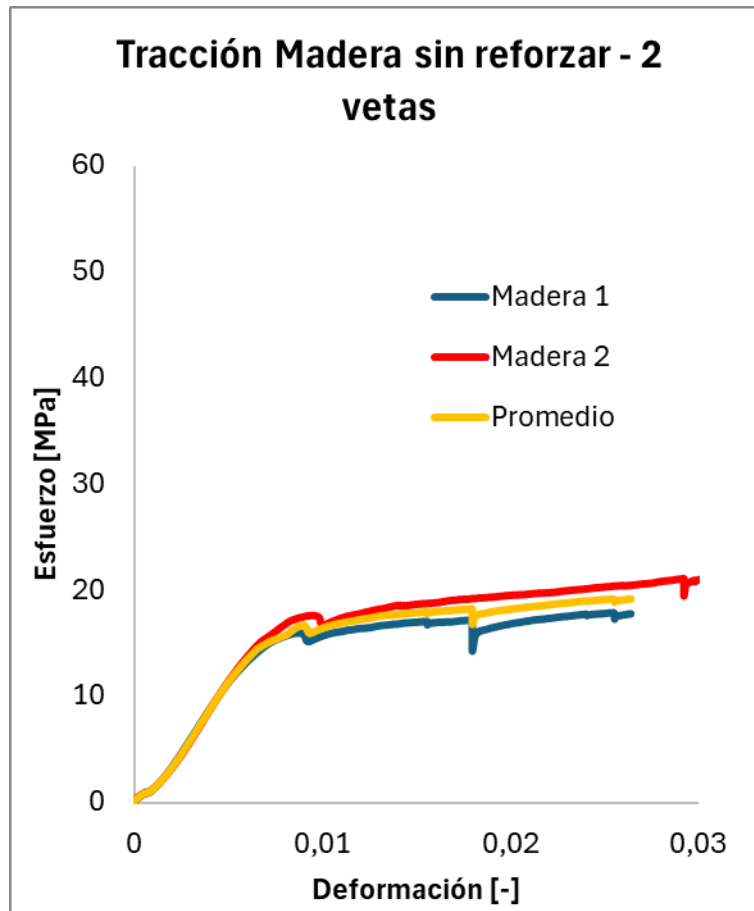


Figura 44 Curva Esfuerzo vs Deformación para madera en tracción.

4.1.3 RESULTADOS ENSAYOS FLEXIÓN MADERA SIN REFORZAR

Para flexión se realizaron 3 ensayos donde la disposición de las vetas es similar, tal como se puede ver en la Figura 45 a), por lo que se esperaba obtener resultados similares en cuanto a su comportamiento mecánico.

En la Figura 45 b) se observa que los mecanismos de fractura fueron los correctos siendo puramente flexivos sin observar fallas por corte o cizalladura.

Tabla 6 Propiedades en Flexión Madera sin Reforzar

Propiedad Mecánica promedio	Madera
Esfuerzo proporcional, MPa	47.61
Deformación proporcional, %	0.011
Módulo de Elástico en Tensión, MPa	4495

En la Tabla 6 podemos observar los resultados obtenidos del ensayo en promedio. Para estos resultados se tomaron los resultados de la Madera 2 y 3 y la Madera 1 fue descartada, esto por la desviación en los resultados obtenidos, los cuales se pueden ver por completo en los ANEXOS 4.1. En la Figura 46 podemos observar la curva de Fuerza vs Desplazamiento, donde en amarillo se tiene el promedio de la Madera 2 y 3 y las otras curvas. De aquí se puede tener indicios de la desviación encontrada con los resultados de la Madera 1. Sin embargo, la rigidez de las tres vigas fue muy similares.



Figura 45 Maderas flexión sin reforzar. a) vista transversal, b) vista inferior al punzón.

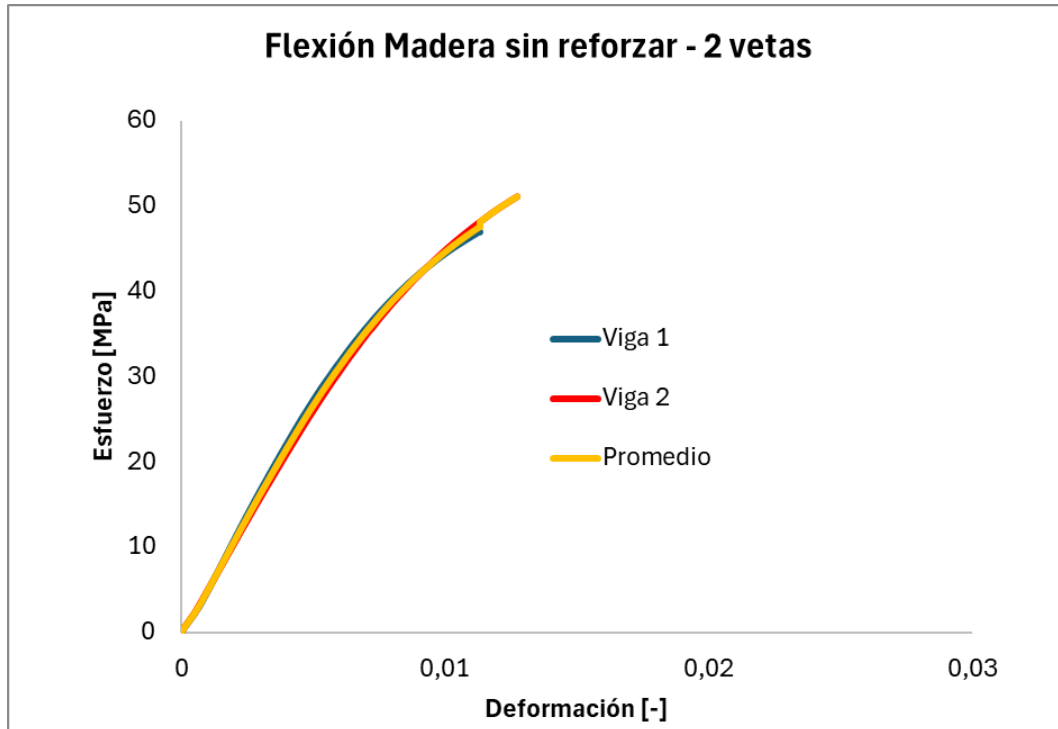


Figura 46 Flexión madera Esfuerzo vs Deformación, Promedios de Madera 1 y 2.

4.2 ENSAYOS ACTIVIDADES FLEXIÓN MADERA REFORZADA

En los ensayos realizados para la flexión de madera reforzada, se realizaron triplicados y luego se aplicó un promedio de los resultados. Por otro lado, se calculó la desviación estándar media para el promedio de los resultados, donde si esta era mayor a 7% se descartaba el set de datos más desviado. Los resultados individuales de cada ensayo y los estadísticos se pueden observar en los ANEXOS 4. En la presente sección se analizarán los promedios de cada ensayo para dar facilidad en los análisis.

Para la actividad número uno, se analizó el comportamiento del compuesto con distinto número de capas. En la Figura 47 se observa las curvas de una madera sin reforzamiento en amarillo, en azul se observa la curva promedio para una madera con una capa de reforzamiento de CFRP, en rojo con 2 capas de reforzamiento.

La curva de 3 capas de reforzamiento no se muestra por la desviación esperada en los resultados, ya que se espera que al aumentar el número de capas vaya en aumento también la resistencia máxima y la rigidez del conjunto.

Se obtuvo que la rigidez alcanzada por la configuración de 1 y 3 capas de CFRP viene siendo muy similar, mientras que el esfuerzo de fluencia, el esfuerzo máximo, las deformaciones y la rigidez son mejores en la configuración de dos capas de reforzamiento. Esto puede tener un efecto extra del número de vetas encontrados en cada uno, pues para la configuración de dos capas, se tuvieron 2 vetas, mientras que para el caso de tres capas se tiene tan solo una veta en cada viga reforzada. Los resultados de cada caso se observan en la Tabla 7, donde, además, en paréntesis se tiene la mejora respecto a una viga sin reforzar.

Sin embargo, en los tres casos el comportamiento del reforzamiento aumenta la rigidez del compuesto y obtiene mejores significativas en comparación de la viga sin reforzar. Esto se observa en la pendiente de la zona elástica o “constante” de las curvas. Teniendo un mejoramiento mecánico en el reforzamiento en cuanto al número de capas.

Por otro lado, se puede observar en la Figura 48 el comportamiento de las tres vigas reforzadas y se tiene en evidencia la influencia de las vetas en la madera, donde a mayor número de vetas, acompaña a la mejora de la resistencia mecánica y rigidez.

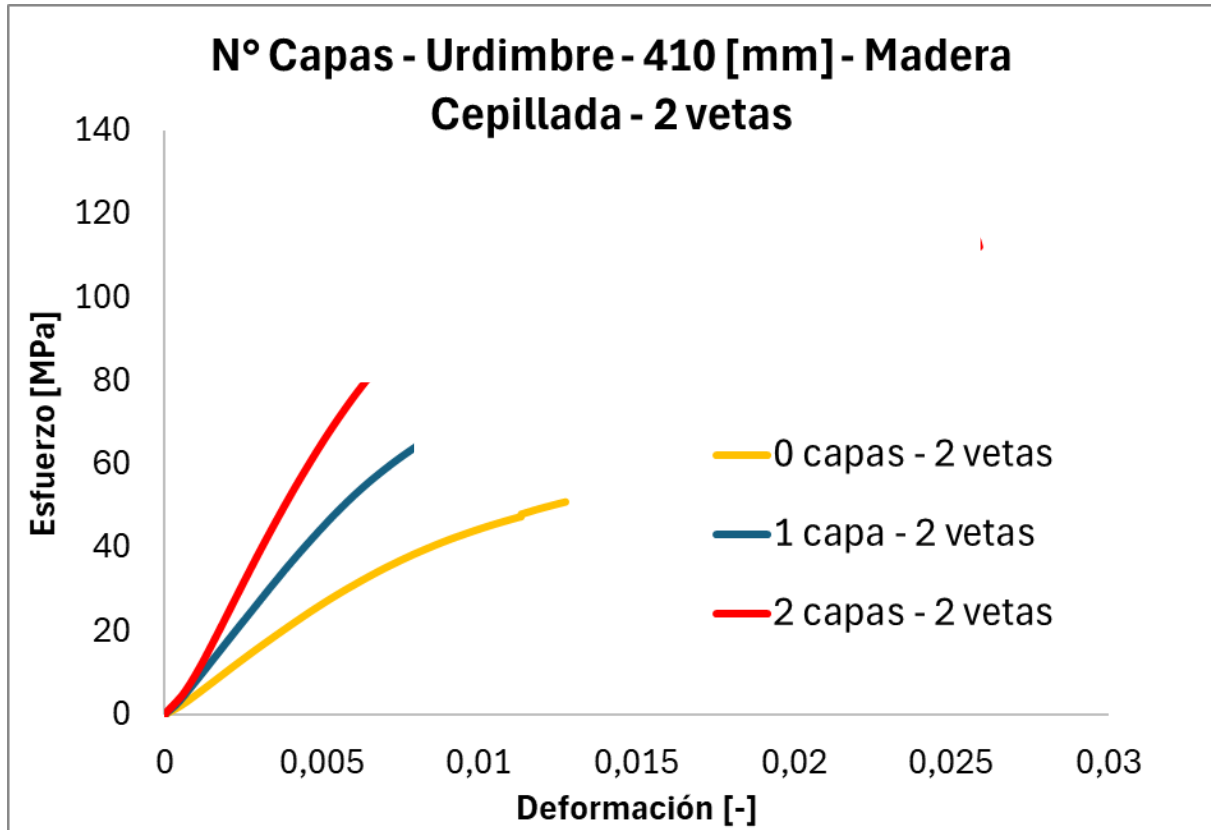


Figura 47 Esfuerzo vs Deformación distintos N° de capas de CFRP, Orientado a la Urdimbre de largo 410 [mm]

Tabla 7 Propiedades mecánicas Madera Reforzada - Distinto Número de Reforzamiento de CFRP. En paréntesis se encuentra el % de mejoramiento respecto a la madera sin reforzar.

Propiedad promedio	Mecánica	Madera S/R	1 capa CFRP	2 capas CFRP	3 capas CFRP
Esfuerzo MPa	proporcional,	47.1	67.6(43%)	99.7(111%)	98.5(109%)
Deformación proporcional, %		0.01	0.0096	0.0091	0.0127
Módulo de Elástico en Tensión, MPa		4507	8957(99%)	14170(214%)	12695(182%)

Para acompañar los resultados, se realizó un análisis teórico de las curvas para presentar la validez en cuanto a comparativa de curvas en cada set de ensayos para las variables de número de capas. El sentido de esta comparativa es el comportamiento de la curva y lo distante que puede ser el módulo de elasticidad

obtenido por los ensayos con la combinatoria obtenida por el comportamiento de la madera y la entregada por los proveedores de la tela de fibra de carbono.

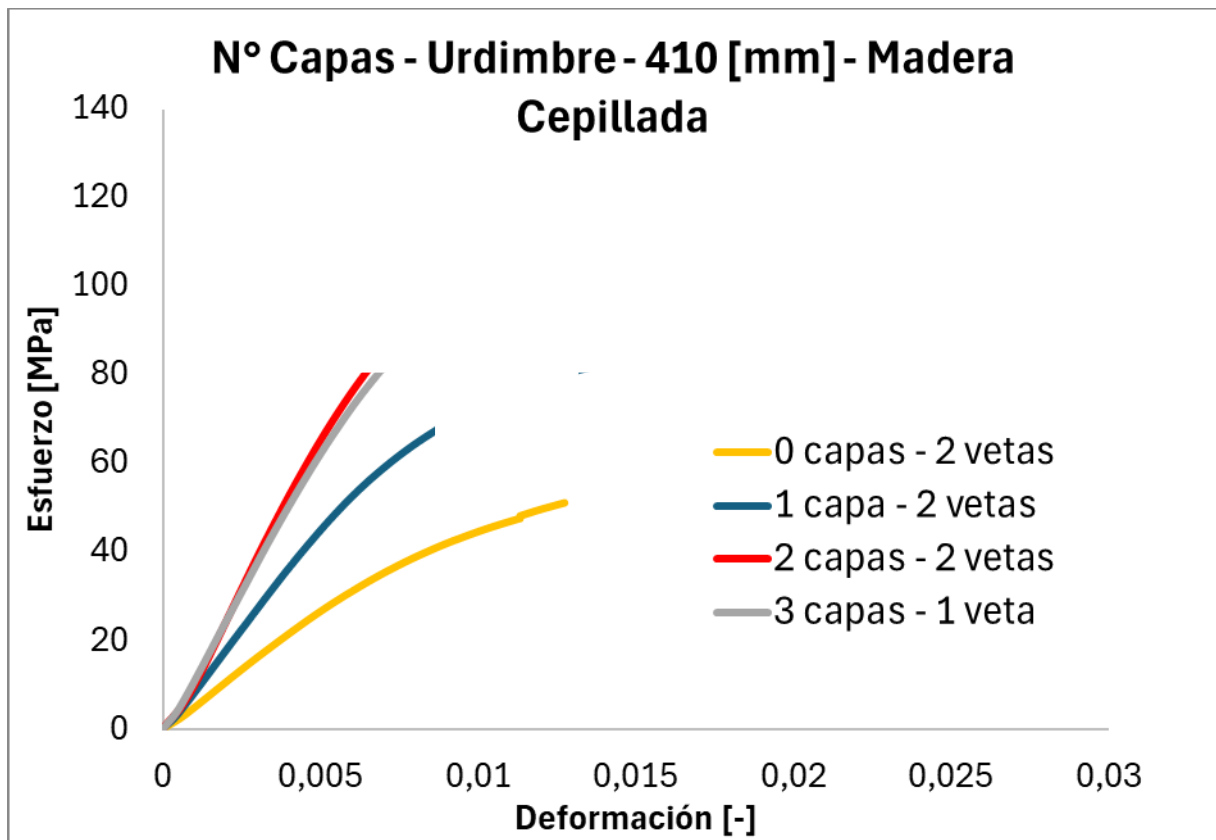


Figura 48 Esfuerzo vs Deformación distintos N° de capas de CFRP, Orientado a la Urdimbre de largo 410 [mm], 3 capas con madera con 1 veta

En una primera instancia se tiene el módulo de elasticidad de la madera en cuanto a su comportamiento en tracción y compresión. Utilizando los criterios y metodología de la Figura 15 y la Ec. 1 para cada caso se construyeron las curvas y se compararon con los promedios.

Estas comparativas se observan en las Figura 49, Figura 50 y Figura 51. Donde se observa que para la curva de tres capas de reforzamiento los resultados fueron muy inferiores a los esperados por la teoría. Esto puede deberse principalmente a las vetas en la madera, las cuales influyeron en gran medida al comportamiento de la madera, también posibles nudos en la madera y este tipo de fallas que se suelen encontrar. Esto se detalla en mayor profundidad en los ANEXOS 2 para

los efectos de las vetas en la madera y como estas influyen en el comportamiento mecánico de la madera.

Finalmente, para el análisis de las tres capas de reforzamiento no se tiene la certeza del comportamiento del compuesto, por lo que los resultados no definen nada.

Para el segundo objetivo, se tiene la comparativa y análisis del comportamiento del compuesto madera – CFRP variando la longitud del reforzamiento en la sección de la viga. Las longitudes utilizadas fueron del total de la viga con 410 [mm], una longitud entre los cabezales de apoyo de 350 [mm] y una sección pequeña de la viga de 100 [mm]. Los colores utilizados en el gráfico de la Figura 53 fueron azul, rojo y gris respectivamente, mientras que para la madera sin reforzar se mantuvo en amarillo.

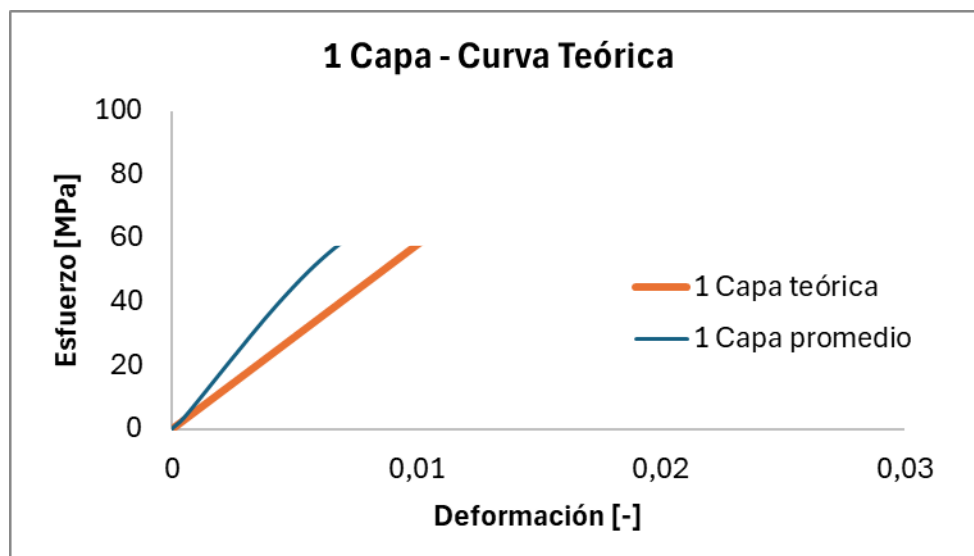


Figura 49 Curva Teórica vs Promedio - 1 Capa CFRP

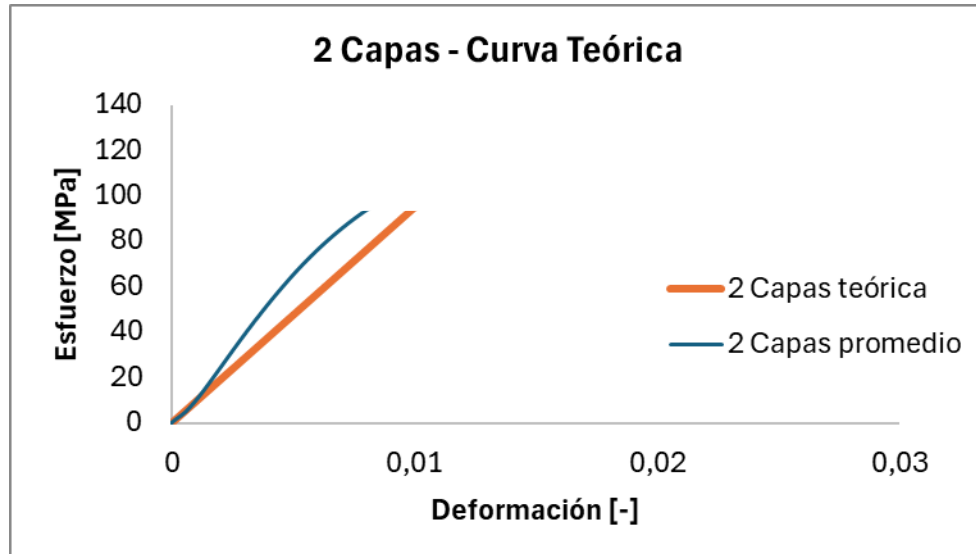


Figura 50 Curva Teórica vs Promedio - 2 Capas CFRP

Del gráfico se puede concluir la importancia de la longitud del reforzamiento, pues un pequeño refuerzo ya significa mejor rigidez y resistencia en la madera como se observa en la curva gris del refuerzo de 100 [mm]. Las curvas para la madera reforzada con CFRP de 100 [mm] y 350 [mm] alcanzan un valor de rigidez muy similares como se observa en las pendientes iniciales, siendo estos, refuerzos entre los apoyos del ensayo y que se dan totalmente de la adhesión del compuesto Madera/Resina/Fibra de carbono, mientras que para la madera reforzada totalmente alcanza una rigidez superior, esto puede deberse principalmente a dos factores, el primero pues hay un agarre entre las orillas de la madera en las caras de 25x25 [mm], y lo otro es el agarre mecánico que dan los apoyos de la probeta mientras que se está ejerciendo la carga, significando más una adhesión mecánica entre el Apoyos/Fibra de Carbono/Madera que uno donde influya la resina como es el caso de los refuerzos entre apoyos, esto se ilustra en el esquema de la Figura 52.

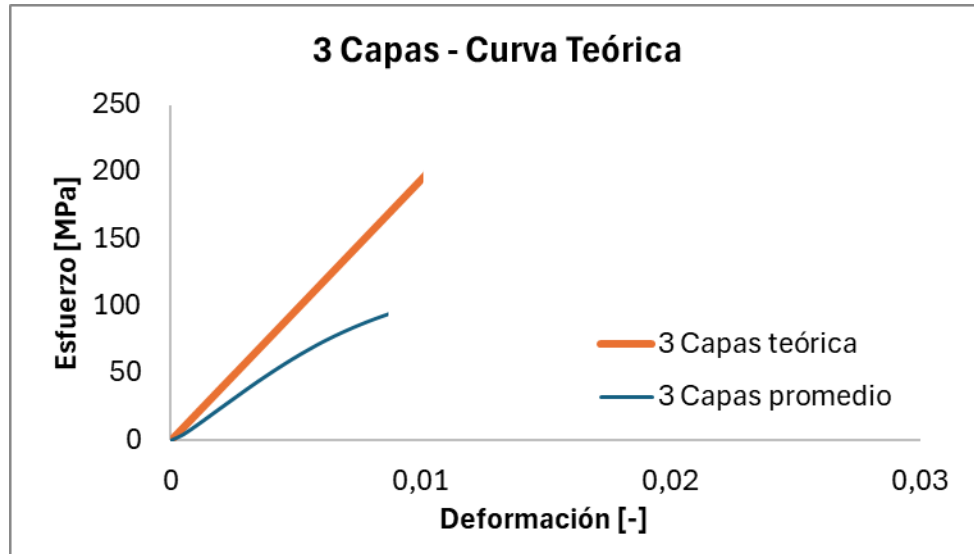


Figura 51 Curva Teórica vs Promedio - 2 Capas CFRP

En todas las longitudes de reforzamiento se puede ver un mejoramiento en la resistencia máxima alcanzada, como también en la deformación cuando se comparan con la madera sin reforzar, como también de forma secuencial en el aumento de longitud del reforzamiento.

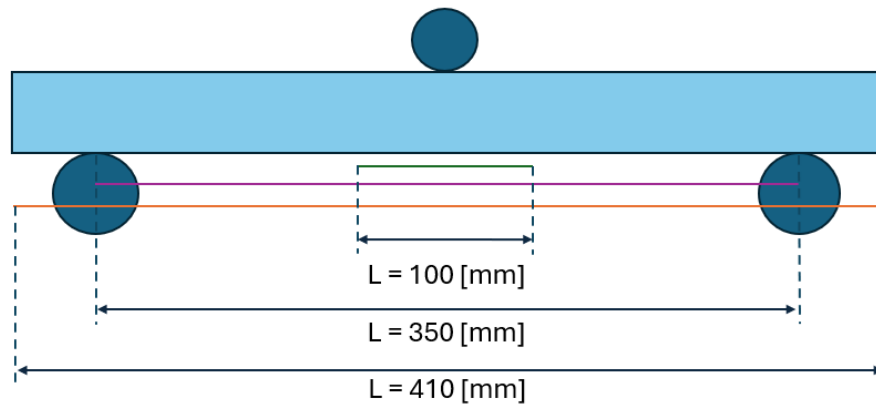


Figura 52 Esquema reforzamiento de vigas. LR = 410 [mm] Mecánico, LR = 350 y 100[mm] por resina.

En la Tabla 8 se aprecian los resultados de este caso. Dando resultados muy similares entre el reforzamiento de 100 [mm] con el de 350 [mm]. Lo que indica que la unión por adhesión del compuesto tiene un comportamiento muy similar en cuanto a su longitud, y para esfuerzos puramente flexivos, es decir con fractura

en el centro de la viga, es importante reforzar justo este punto. Caso distinto sería para esfuerzos que consideren corte y distribuciones de cargas.

Tabla 8 Propiedades mecánicas Madera Reforzada – Distinta longitud del reforzamiento. En paréntesis se encuentra el % de mejoramiento respecto a la madera sin reforzar.

Propiedad Mecánica	Madera S/R	100 [mm]	350 [mm]	410 [mm]
Esfuerzo proporcional, MPa	47.1	90.2(91%)	80.1(70%)	99.7(111%)
Deformación proporcional, %	0.01	0.0087	0.0088	0.0091
Módulo de Elástico en Tensión, MPa	4507	11061(154%)	12849(185%)	14170(214%)

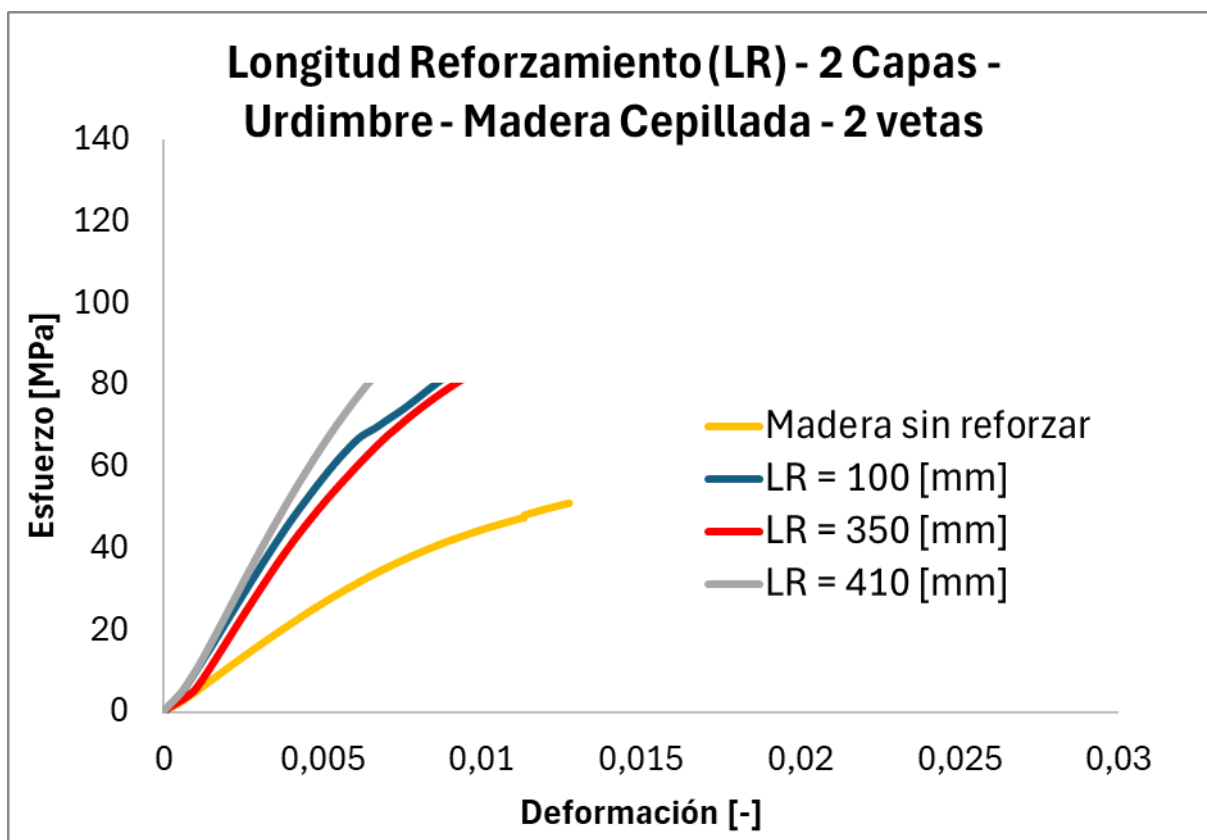


Figura 53 Esfuerzo vs Deformación distintos largos de CFRP, con dos capas orientadas a la Urdimbre

Finalmente, para los objetivos realizados en flexión, se analizó la influencia en la direccionalidad de la fibra para el compuesto madera – CFRP. Teniendo tres configuraciones, la Urdimbre (0°), la Trama (90°) y la Bidireccional (1 capa en 0°

y otra en 90°) que en la Figura 54 se observan de color azul, rojo y gris respectivamente, mientras que la madera sin reforzar se mantiene de color amarillo. Para este caso, como se mencionó anteriormente, se aplicaron dos capas de CFRP variando la direccionalidad y cubriendo por completo la viga en su zona de tensión. Los números entre paréntesis de corchetes luego del tipo de reforzamiento refieren a la Figura 35.

En la figura se observa que la rigidez del compuesto reforzado no varía y el esfuerzo tanto de fluencia como máximo tampoco. La deformación varía en el caso del a orientación hacia la urdimbre, pero puede deberse a la aleatoriedad de los datos y del comportamiento de la madera. Por lo que la direccionalidad de la fibra de carbono para el tejido utilizado (Planar 3K) no es un factor influyente en el comportamiento del compuesto. Pero, se reafirma que dos capas de reforzamiento mejoran sustancialmente el comportamiento de la madera sin reforzar. Esto se debe a que la tela y el tejido tipo planar tiene un comportamiento ortotrópico, donde hay dos direcciones preferenciales de resistencias a esfuerzos y de comportamiento mecánico, teniendo la urdimbre y trama la misma densidad de fibra en su composición telar. Una variable de interés para futuros estudios es la direccionalidad en 45° para buscar distintas configuraciones posibles. De todas formas, la limitancia en la exactitud de los ángulos generados en el curado es difícil de obtener.

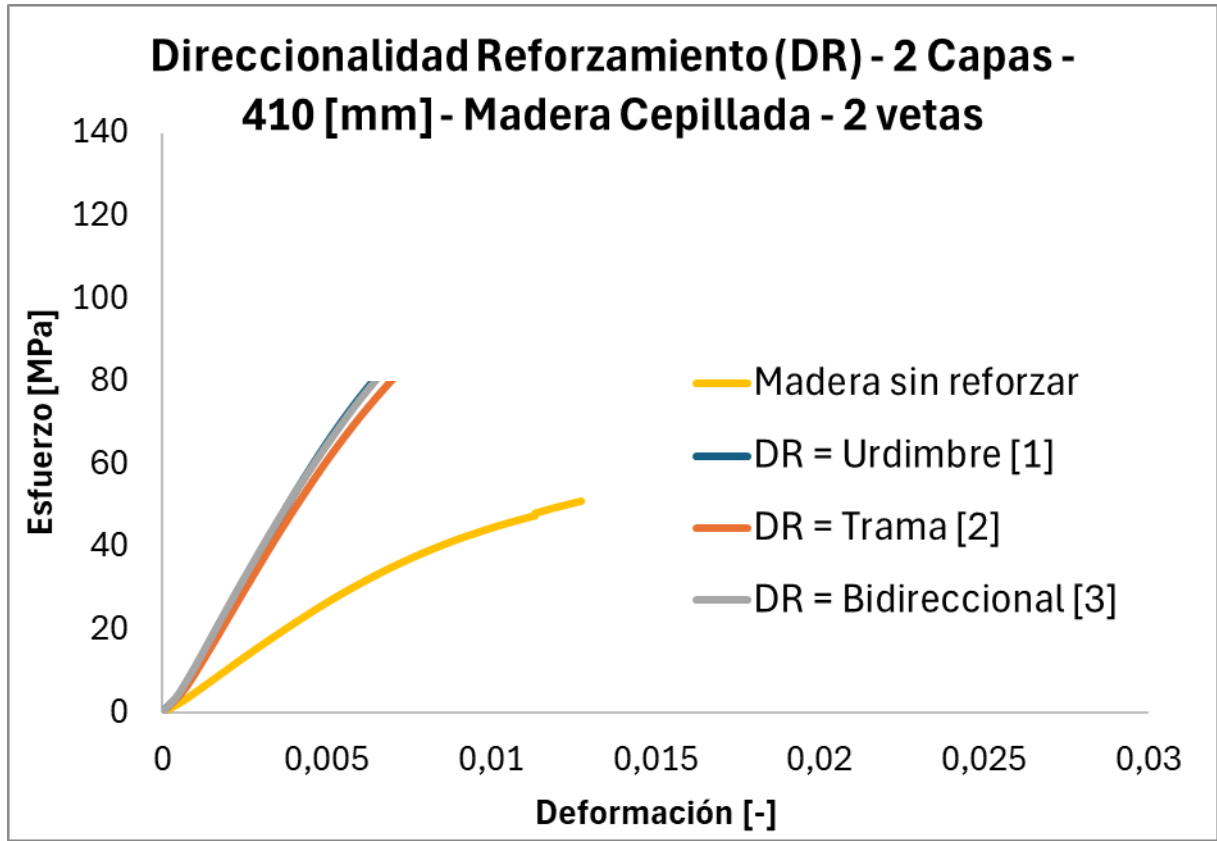


Figura 54 Esfuerzo vs Deformación distintas orientaciones del CFRP, 2 capas de largo 410 [mm]

Además, en la Tabla 9 se observan los resultados obtenidos en cuanto a fluencia, carga y deformación máxima, como también el módulo de elasticidad. Con esto se observa que los resultados obtenidos variando la direccionalidad del refuerzo no influye en el comportamiento del compuesto, esto se puede afirmar en el caso tratado, con las dimensiones utilizadas y el tipo de fibra que se empleó, pues como se puede ver en la Figura 55, sin importar la direccionalidad de la tela, hay una misma cantidad de hebras para una dirección rotada en 90°.

Tabla 9 Propiedades mecánicas Madera Reforzada – Distinta direccionalidad del reforzamiento. En paréntesis se encuentra el % de mejoramiento respecto a la madera sin reforzar.

Propiedad Mecánica promedio	Madera S/R	Urdimbre	Trama	Bidireccional
Esfuerzo proporcional, MPa	47.1	99.7(111%)	101.2(115%)	100.2(113%)
Deformación proporcional, %	0.0101	0.0091	0.0100	0.0099
Módulo de Elástico en Tensión, MPa	4507	14170(214%)	13061(190%)	13487(199%)

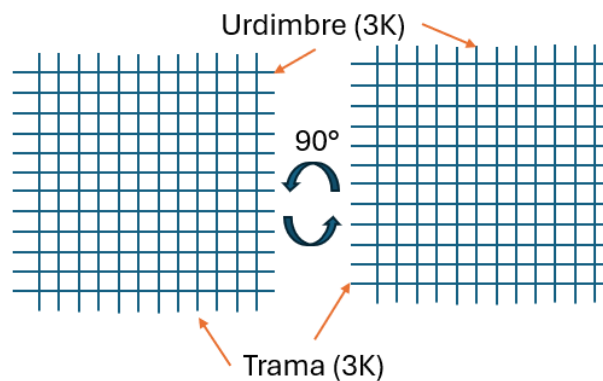


Figura 55 Direccionalidad de la fibra en el caso planar 3K

4.3 RESULTADOS OBJETIVO ADHESIÓN

En cuanto a los ensayos de adhesividad, estos se realizaron en base a la norma ASTM D5968. Donde los resultados fueron los mostrados en la Tabla 10, como además se puede observar una comparativa más clara en la Figura 56 con las respectivas desviaciones estándar. De aquí se denota la importancia del tratamiento superficial para la adhesión del CFRP a la madera. Donde una hendidura más gruesa tiene una resistencia adhesiva superior a la lisa y la fina, pudiendo definir un tratamiento obligatorio previo al reforzamiento de un elemento estructural.

Tabla 10 Propiedades de Adhesión CFRP-Madera según apertura de malla para tratamiento

	Cepillada	Malla 3/8 in	Malla No. 14
Carga Máxima, N	611.63	2212.48	1697.51

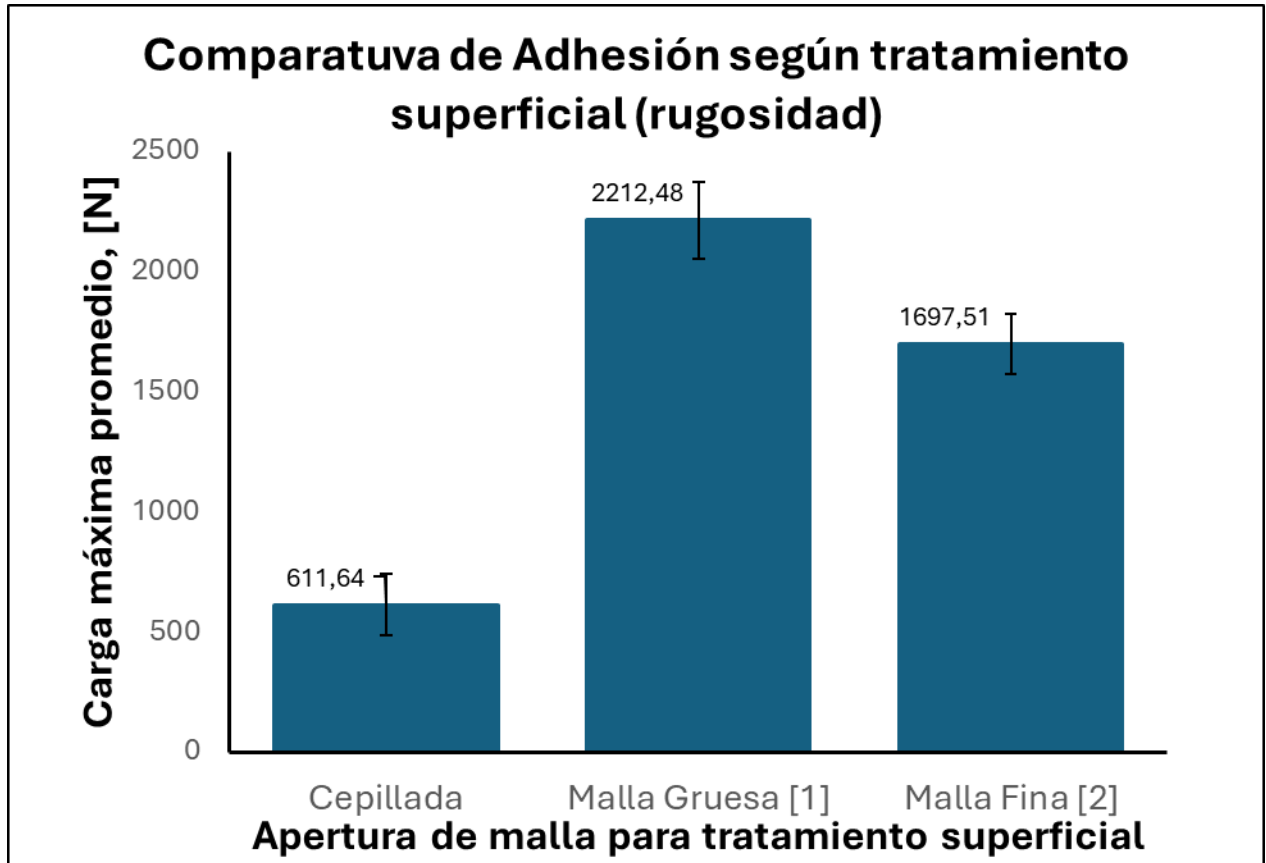


Figura 56 Resistencia a la adhesión según tratamiento superficial

Esto es lo que se esperaba, pues a una menor apertura de malla se va acercando más a un tratamiento liso, donde no habría rugosidad. Cabe destacar que, además, hay una diferencia en la profundidad de la indentación de la malla de cada caso, pues para la Malla de 3/8 in se tenía que el alambre tenía un diámetro de 0.24 [mm] mientras que para la Malla No. 14 se tenía un alambre de 0.071 [mm]. En la Figura 57 se observan las mallas utilizadas para dar rugosidad a la madera. En [1] tenemos la malla con la apertura más grande de 3/8 in mientras que en [2] tenemos la apertura más fina No. 14. Viendo la imagen y la malla [2] es que se puede predecir que cada vez que la malla se va haciendo más fina, nos vamos acercando a una malla más cerrada y por tanto una malla más cercana a un objeto plano y sin rugosidad.

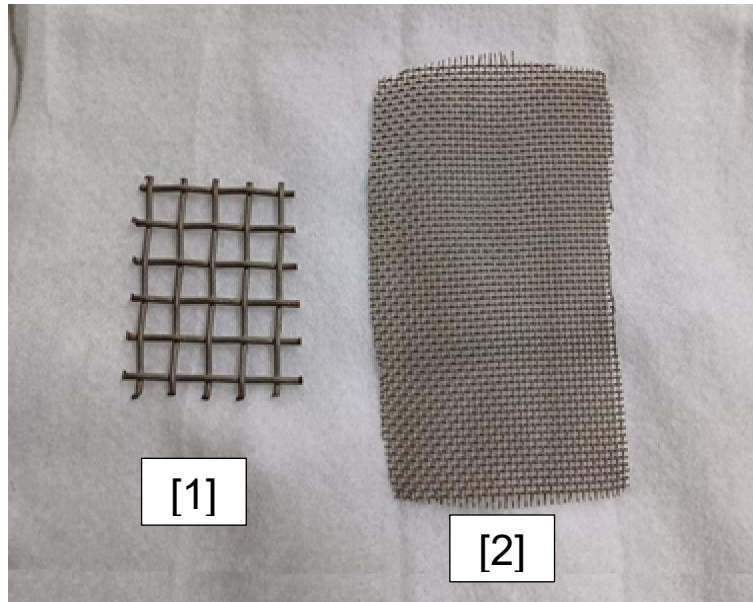


Figura 57 Mallas para dar rugosidad. [1] Malla de 3/8 in, [2] Malla No 14.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

En base a lo experimentado y analizado con los resultados obtenidos en los capítulos anteriores es que se tuvieron las siguientes conclusiones:

1. Utilizar la norma ASTM D143 para la realización de los ensayos dio un resultado positivo en cuanto al mecanismo de fractura del compuesto madera – CFRP, pues fueron puramente flexivos en su totalidad.
2. El tipo de adhesión del CFRP a la madera es importante pues puede afectar en el comportamiento mecánico obtenido. Tal como pasó con el refuerzo de 410 [mm] el cual simula una adhesión mecánica mientras que los reforzamientos de 350 y 100 [mm] son dados por la resina aplicada. Sin embargo, para las dos maderas con la adhesión por la resina se obtuvo rigidez similar más no las resistencias máximas.
3. Para la tela planar utilizada, la cual es homogénea de densidad 3K, para la dirección de Urdimbre y Trama no es relevante la direccionalidad de aplicación de la tela en el reforzamiento pues obtiene los mismos resultados mecánicos en ambas direcciones, variar estas en ángulos de 45° si puede afectar.
4. Al reforzar madera con CFRP mejora hasta un 100% mejores en cuanto a su esfuerzo de máximo útil y un 200% su módulo de elasticidad.
5. Hubo un mejoramiento en la rigidez del reforzamiento de la madera con CFRP, donde para una misma deformación hay un aumento significativo de esfuerzo. Por lo tanto, para una misma flecha hay mayor carga.
6. El tratamiento superficial de una viga para dar rugosidad a la madera es sumamente importante para mejorar la adhesión del CFRP, pues el tratamiento con un mallado fino semejante a un planar aumenta 3 veces la resistencia en adhesión, teniendo que para situaciones donde se requiera trabajar con adhesión del tipo química sea fundamental este tratamiento.

7. El uso de CFRP para reforzar vigas de madera, las cuales pueden tener una aplicación habitacional, es factible y mejora en gran medida el rendimiento mecánico de estas. Dando así la posibilidad tanto de aumentar la luz de las vigas, como la separación entre estas, o, en caso de mantener constante ambas, poder aumentar la carga permanente de la estructura.

5.2 RECOMENDACIONES

1. Preferentemente al ensayar utilizar norma ASTM D198 y sus dimensiones, de esta forma se evita la gran influencia y variabilidad que significan el número de vetas.
2. Utilizar maderas de sección rectangular, las cuales son las normalmente utilizadas en el envigado de estructuras de madera.
3. Variar la direccionalidad de la fibra en 0° y 45° para tener resultados distintos, aunque predecibles.
4. Ensayar vigas previamente tratadas superficialmente la hora de ensayar.
5. Utilizar algún tipo de deflectómetro o sistema de medición en la zona inferior de la viga para obtener resultados con mayor precisión.

CAPÍTULO 6. ANEXOS

ANEXO 1: PROCESO DE MANUFACTURA DE PROBETAS

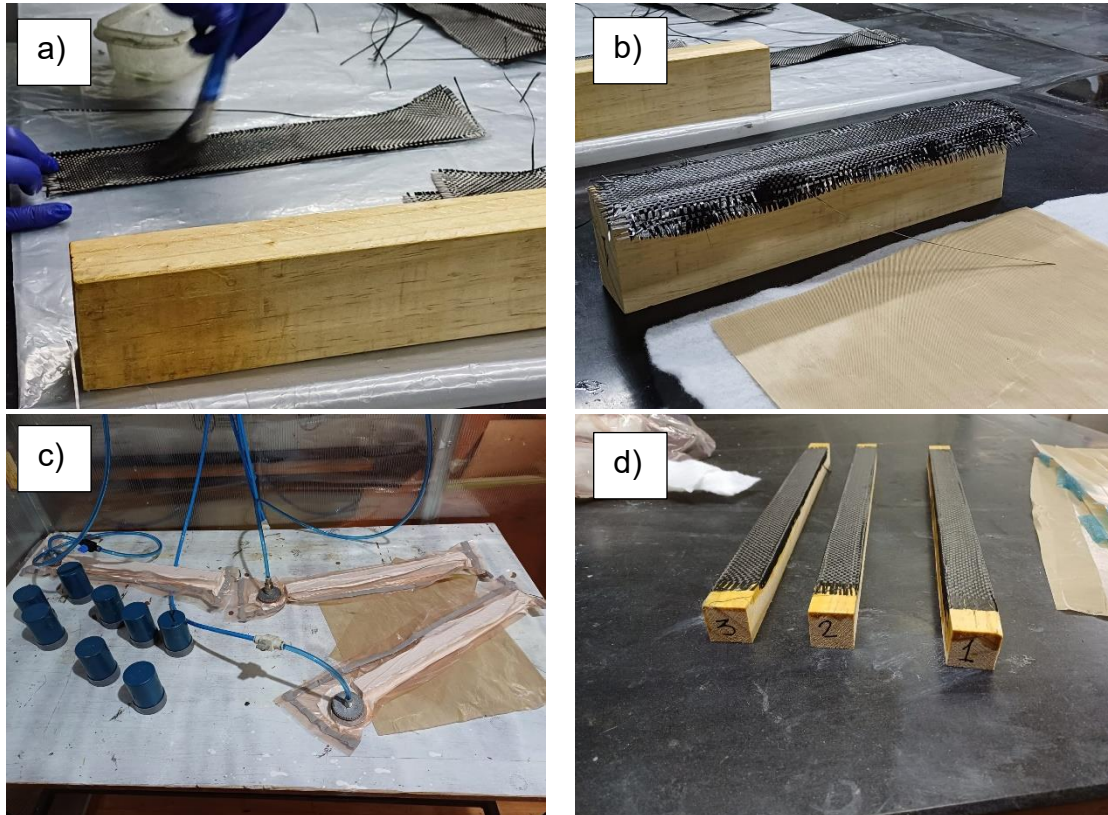


Figura 58 Proceso manufactura vigas reforzadas con CFRP. a) Aplicación de resina, b) Aplicación de CFRP a viga, c) Proceso de impregnación y "secado al vacío", d) Vigas listas para ensayar

ANEXO 2: EFECTO DE LAS VETAS EN LA MADERA

Las propiedades mecánicas de la madera se deben a su microestructura vista a diferentes escalas, lo que nos da los resultados de su heterogeneidad, anisotropía y jerarquía de su estructura. Lo que está ligado a las paredes celulares en que se basa la madera, las cuales viene ligado a su historia en formación de su humedad, expansiones térmicas, entre otros. [20]

En diferentes distancias radiales de un tronco de madera, se presentan ciertas propiedades en la madera, estas tienen una quiralidad que se da en las vetas, a nivel celular y a nivel microscópico. En la Figura 59 se puede observar como son las vetas de la madera y su orientación, estas son alargadas y unidireccionales

en un tronco, por lo que guarda propiedades anisotrópicas en su estructura general. [21]

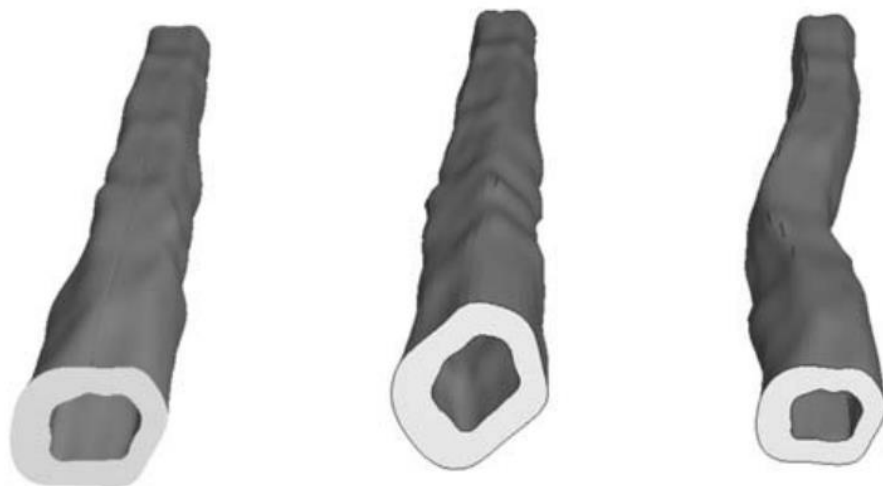


Figura 59 Concepto células de las vetas de la madera [20]

La formación de las fibras de las vetas de la madera, se da gracias a la formación, crecimiento y desarrollo de las traquídeas, las cuales son células que almacenan agua dentro de la estructura de la madera. Estas tienen dos “opciones” de crecimiento, con gibelerinas, las cuales son fitohormonas que regulan el proceso de crecimiento de las células de la madera, o con auxinas, las cuales son hormonas vegetales. Las primeras son las causantes de la fibra de la madera, mientras que las segundas se encargan de formar vasijas. Esto se puede observar con mejor detalle en la Figura 60. [7]

Por otro lado, en la Figura 61 se observa un esquema de un corte transversal donde se ve el compuesto de la madera, los cuales son unidireccionales, el cual cuenta con fibras celulósicas, y una pulpa que incluye glucosa, porosidades, xilano, lignina y microfibras vistas anteriormente. El xilano es un compuesto de polisacáridos que dan adherencia a la estructura, emulando lo que sería una resina epóxica, mientras que la lignina es un polímero orgánico que funciona como soporte estructural en el compuesto, emulando la fibra de carbono. [7]

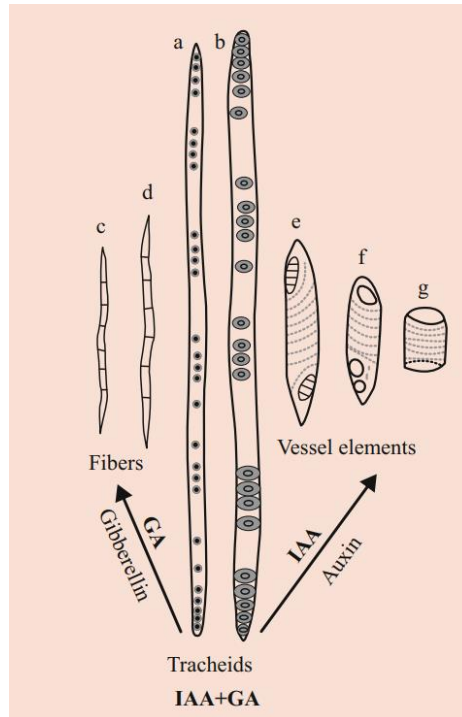


Figura 60 Esquema representativo de la formación celular de la madera

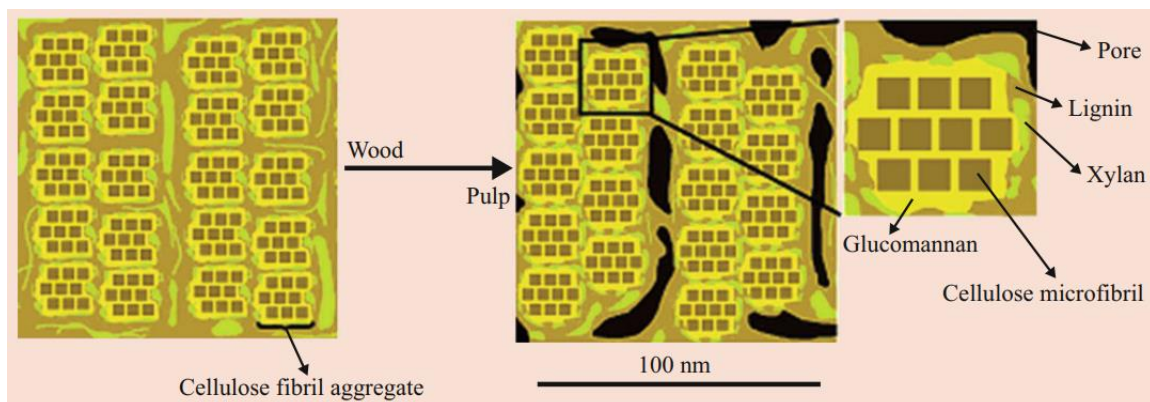


Figura 61 Esquema microestructural de un corte transversal de madera

ANEXO 3: NORMAS UTILIZADAS

Las normas utilizadas para manufacturar las probetas, realizar los ensayos y calcular los resultados fueron:

- ASTM D198 para calcular las propiedades como módulo de rotura y módulo de elasticidad.
- ASTM D143 para realizar los ensayos de compresión y tensión de la madera.

- ASTM D5868 para basarse en los ensayos de adhesión para FRP.
- NCh987 para realizar los ensayos de flexión tanto para la madera como para las vigas reforzadas con CFRP.

Para las normas utilizadas en los ensayos, la NCh987, para el método secundario, exige probetas de sección transversal de 25x25 [mm] con un largo de 410 [mm]. La luz o distancia entre soportes fue de 350 [mm] y la velocidad de ensayo es de 1.3 [mm/min]

Para la caracterización de la madera se utilizó la norma ASTM D143 donde las dimensiones de los cupones tienen geometrías complejas o a libre disposición en cuanto al usuario. Para el ensayo de tensión paralelo al grano (en dirección a las vetas) se utilizó una velocidad de 1 [mm/min]. En cuanto a compresión paralelo al grano, se utilizó un espécimen de 38x38 [mm] y de 150 [mm] de altura y la norma específica que el ensayo debe durar menos de 4 minutos, pudiendo hacer ensayos de prueba para estar en el rango, por lo que se realizó a 10 [mm/min]

Finalmente, para los ensayos de adhesión utilizando la norma ASTM D5868, fue una modificación de esta, pues la norma refiere a un par FRP/FRP, pero aquí se utilizó un par FRP/Madera. De todas formas, se siguió con las medidas de longitud y área de adhesión. También con la velocidad del ensayo que fue de 13 [mm/min].

ANEXO 4: RESULTADOS EXPERIMENTOS

4.2.1 CONFIGURACIÓN: **1 CAPA**, URDIMBRE, LARGO 450 [MM].

Estos ensayos constaron con una madera reforzada con 1 capa de CFRP, la dirección del reforzamiento fue en la urdimbre, con una longitud del reforzamiento de toda la barra (410 [mm]) y con la superficie sin alterar. En la Tabla 11 podemos ver los resultados obtenidos en triplicado, además, en la Figura 62 se puede observar el número de vetas de cada una y la cantidad de fibras en dirección a los esfuerzos de tensión. Los tipos de fractura fueron para la Madera 1 y 3 flexivos, mientras que para la madera 2 flexivo y fractura del CFRP, lo cual pudo deberse a la fractura de la madera que desgarró el CFRP.

Además, en la Figura 63 se obtuvo la curva Esfuerzo vs Deformación de las tres probetas.

Como se mencionó previamente, en la Figura 62 a) podemos observar el número de vetas de cada madera utilizada en los ensayos, donde la madera 1 y 2 se pueden observar 2 vetas en cada una, mientras que en la madera 3 se pueden ver 3 vetas. En cuanto a la Figura 62 b) se puede observar que el número de fibras es igual en todo su ancho, por lo que se puede concluir que este no fue un factor a considerar en la diferencia de los resultados obtenidos.

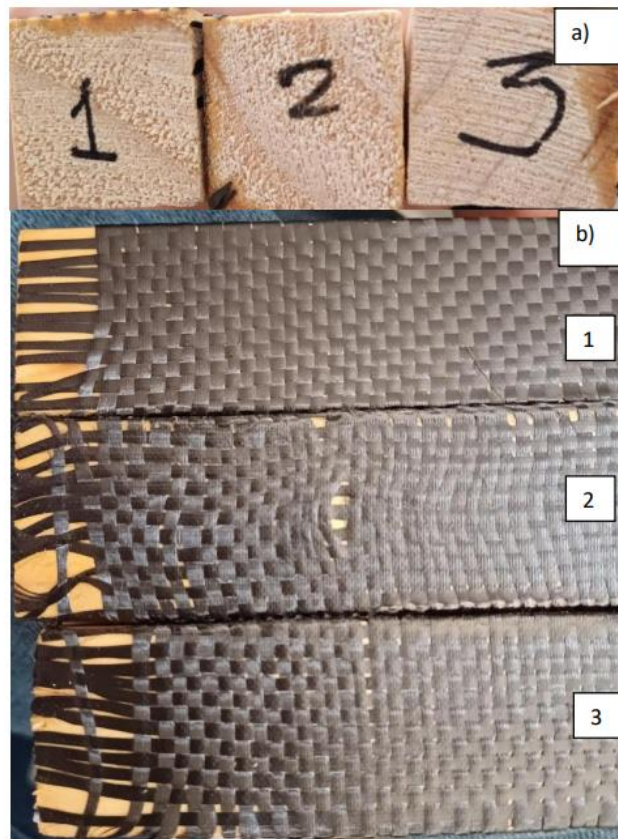


Figura 62 Maderas reforzadas con 1 capa de FC

Tabla 11 Resultados Ensayos Flexión 1 Capa de reforzamiento

	Madera 1	Madera 2	Madera 3
Esfuerzo Máximo, MPa	74.46	91.82	76.92
Deformación, -	0.016	0.016	0.016
E_{app} , MPa	8220	9788	8864

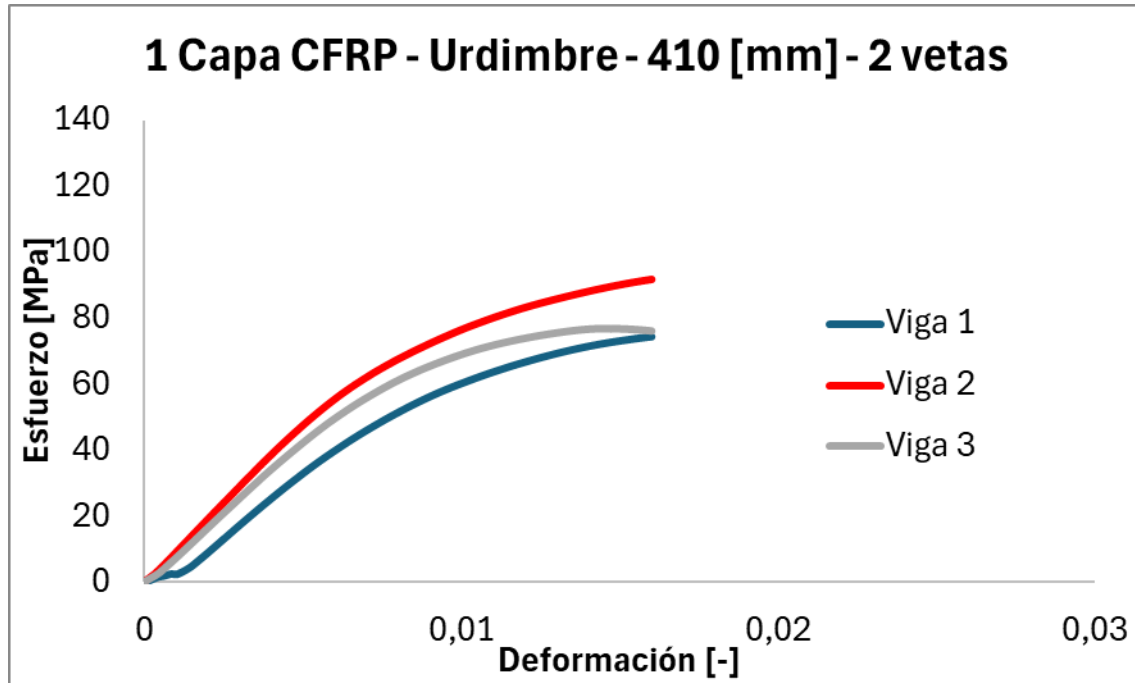


Figura 63 Curva Esfuerzo vs Deformación configuración 1 Capa - Urdimbre - 410[mm]

Se calculó el promedio y desviación estándar y se tomó como criterio una desviación estándar del 7% en base al resultado promedio para poder ser tomado en consideración y tener resultados representativos. De esta forma se hizo una comparativa estadística con un promedio en el esfuerzo obtenido. En la Tabla 12 se tienen los resultados del porcentaje del promedio y la desviación estándar considerando las 3 maderas.

Tabla 12 Estadística resultados, 1 Capa – Urdimbre – 410 [mm]

	Todas	M1 y M2	M1 y M3	M2 y M3
Desv. Est., %	7.97	11.06	5.87	5.19

La curva final obtenida se puede ver en la Figura 64, la cual considera el conjunto de probetas que obtuvo menos de 7% en cuanto a su desviación estándar y la menor entre ellas (siempre y cuando no sean las tres maderas), de esta forma se observó el mejor comportamiento con el promedio de la Madera 2 y 3.

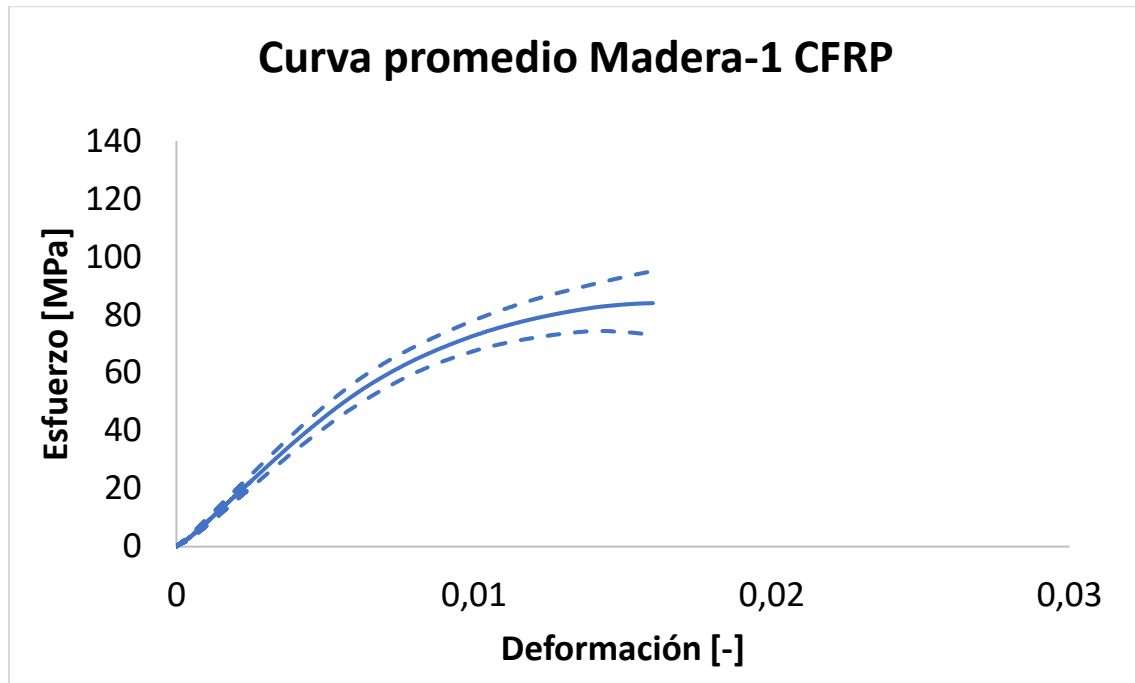


Figura 64 Curva Promedio Madera 2 y 3 Configuración 1 capa de CFRP - Urdimbre - 410 [mm]

4.2.2 CONFIGURACIÓN: 2 CAPAS, URDIMBRE, LARGO 410 [MM]

Estos ensayos constaron con una madera reforzada con 2 capas de CFRP, la dirección del reforzamiento fue en la urdimbre, con una longitud del reforzamiento de toda la barra (410 [mm]) y con la superficie sin alterar. Los resultados se encuentran en la Tabla 13, para el triplicado de maderas reforzadas. Para este caso todas las maderas contaban con 2 vetas transversales al eje de carga. Y de igual formas las tres contaron con un método de fractura puramente flexivo.

En la Figura 65 se puede observar las curvas resultantes de los ensayos para esta configuración.

Para los análisis estadísticos, estos pueden observarse en la Tabla 14, donde el promedio tiene una baja dispersión de los resultados, bajo el 5%. De esta forma se puede trabajar con todos los datos obtenidos.

Tabla 13 Resultados Ensayos Flexión 2 Capas de reforzamiento - Urdimbre - 410 [mm]

	Madera 1	Madera 2	Madera 3
Esfuerzo Máximo, MPa	122.54	126.36	121.53
Deformación, -	0.027	0.026	0.026
E _{app} , MPa	13103	14983	14423

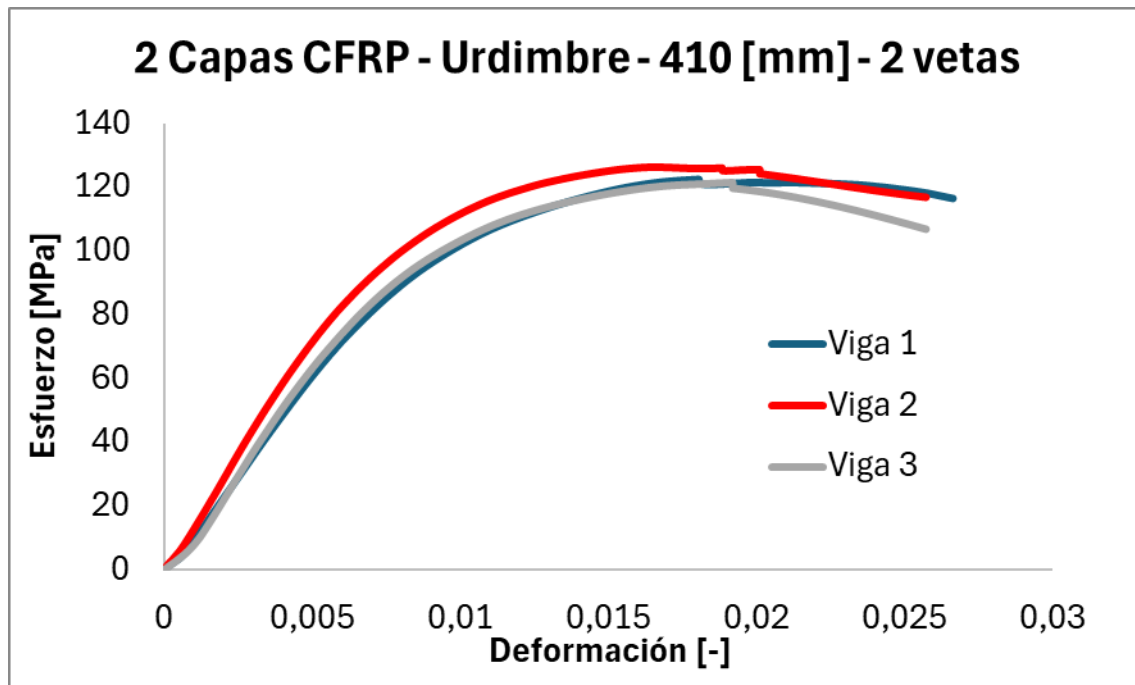


Figura 65 Curva Esfuerzo vs Deformación configuración 2 Capas - Urdimbre - 410[mm]

Tabla 14 Estadística resultados 3 maderas, 2 Capas – Urdimbre – 410 [mm]

	Todas	M1 y M2	M1 y M3	M2 y M3
Desv. Est., %	3.36	4.19	1.41	3.93

Además, se obtuvo la curva promedio con su respectiva desviación estándar. De aquí se puede analizar lo ajustada que se encuentra la curva considerando todo el set de datos. Esto se puede observar en la Figura 66.

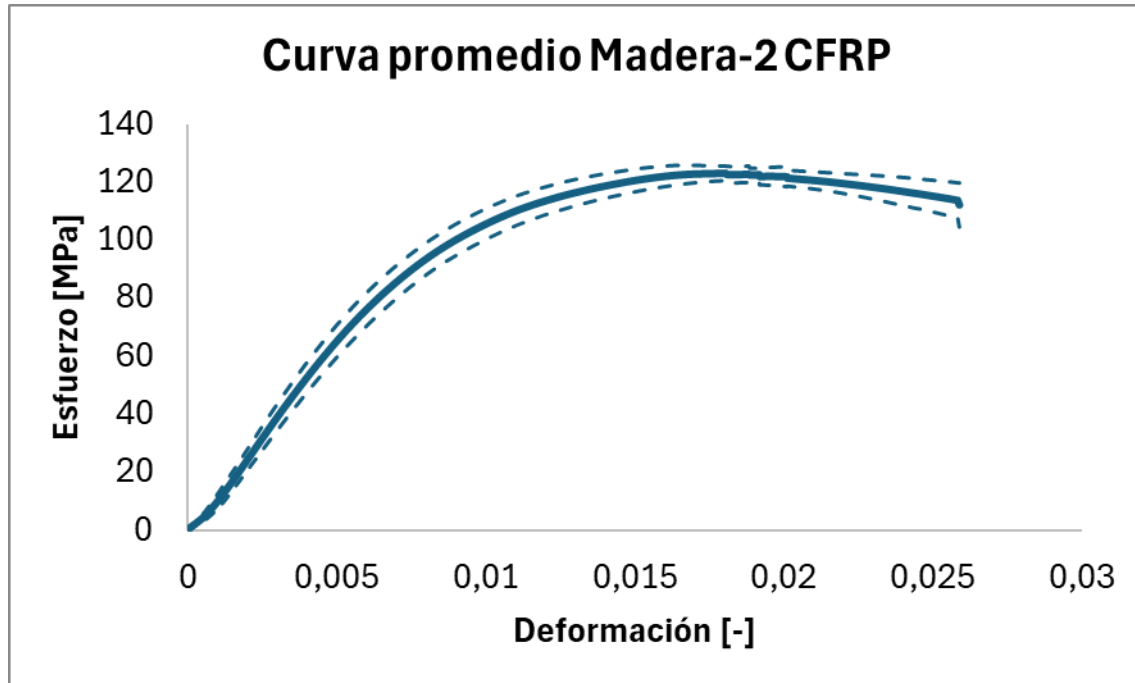


Figura 66 Curvas Promedio Configuración 2 capas de CFRP - Urdimbre - 410 [mm]

4.2.3 CONFIGURACIÓN: **3 CAPAS**, URDIMBRE, LARGO 410 [MM]

Estos ensayos constaron con una madera reforzada con 3 capas de CFRP, la dirección del reforzamiento fue en la urdimbre, con una longitud del reforzamiento de toda la barra (410 [mm]) y con la superficie sin alterar. En la Tabla 15 podemos ver los resultados obtenidos por estos ensayos en las distintas maderas. Para este caso todas las maderas contaban con 1 veta transversal al eje de carga. Y de igual formas las tres contaron con un método de fractura puramente flexivo.

Tabla 15 Resultados Ensayos Flexión 3 Capas de reforzamiento - Urdimbre - 410 [mm]

	Madera 1	Madera 2	Madera 3
Esfuerzo Máximo, MPa	120.45	105.03	121.10
Deformación, -	0.021	0.020	0.021
E_{app} , MPa	12021	12620	13443

También se tiene la curva Esfuerzo vs Deformación para las tres maderas en la Figura 67. Donde se ve una baja dispersión de los datos. Sin embargo, se realizó el análisis estadístico de los resultados, los cuales se pueden ver en la Tabla 16. De aquí se concluye que se deben considerar todas las maderas del conjunto de ensayos.

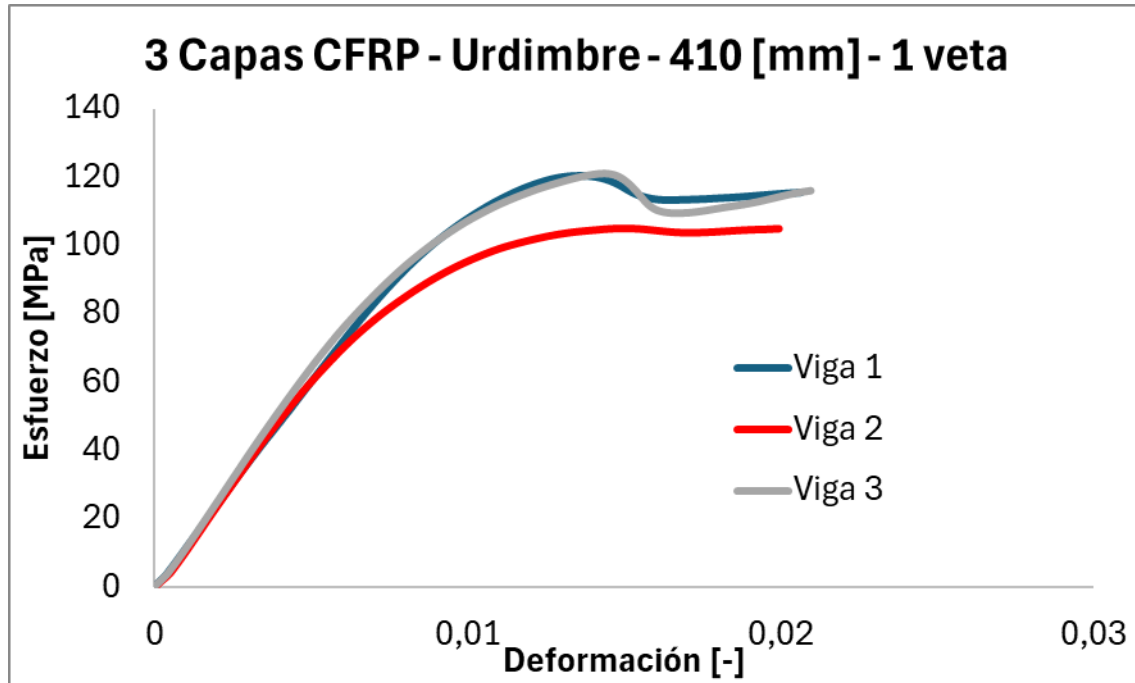


Figura 67 Curva Esfuerzo vs Deformación configuración 3 Capas - Urdimbre - 410[mm]

Tabla 16 Estadística resultados 3 maderas, 3 Capas – Urdimbre – 410 [mm]

	Todas	M1 y M2	M1 y M3	M2 y M3
Desv. Est., %	3.72	4.29	1.07	4.35

Finalmente se realizó la curva promedio en la Figura 68, la cual será la que se comparó con los otros ensayos del objetivo de N° de capas.

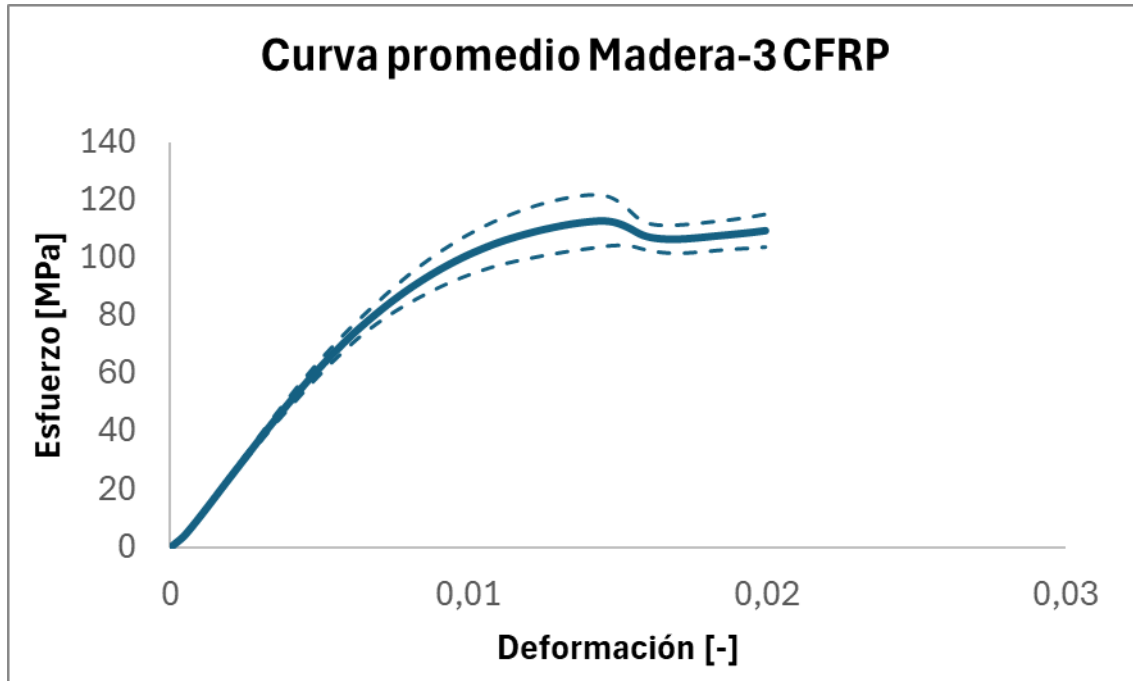


Figura 68 Curva Promedio Configuración 3 capas de CFRP - Urdimbre - 410 [mm]

4.2.4 CONFIGURACIÓN: 2 CAPAS, URDIMBRE, **LARGO 350 [MM]**

Estos ensayos constaron con una madera reforzada con 2 capas de CFRP, la dirección del reforzamiento fue en la urdimbre, con una longitud del reforzamiento de la sección fuera de los soportes (350 [mm]) y con la superficie sin alterar. Para este caso todas las maderas contaban con 2 vetas transversales al eje de carga. Y de igual formas las tres contaron con un método de fractura puramente flexivo. En la Tabla 17 se ven los resultados obtenidos por estos ensayos en las distintas maderas y en la Figura 69 se tiene la curva Esfuerzo vs Deformación. De esta figura se observa que la Madera 1 se encuentra muy desviada en comparación a las otras dos maderas, por lo que es importante realizar el análisis estadístico para poder discernir en la consideración de las tres maderas o de dos de estas.

Por lo que en la Tabla 18 se tienen los resultados de este análisis, lo que determina que la viga número 1 se debe omitir para tener una mejor homogeneidad de los datos, siendo está bastante ajustada.

Tabla 17 Resultados Ensayos Flexión 2 Capas de reforzamiento - Urdimbre - 350 [mm]

	Madera 1	Madera 2	Madera 3
Esfuerzo Máximo, MPa	131.26	100.53	101.22
Deformación, -	0.018	0.018	0.02
E _{app} , MPa	15038	11721	11788

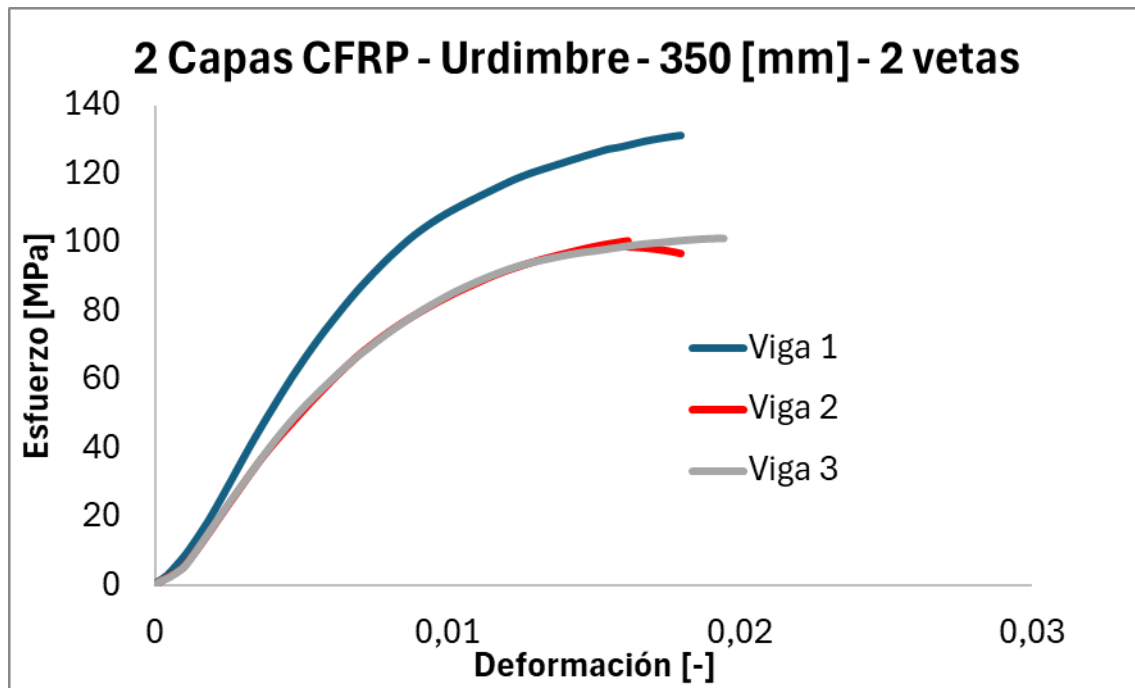


Figura 69 Curva Esfuerzo vs Deformación configuración 2 Capas - Urdimbre - 350[mm]

Tabla 18 Estadística resultados 3 maderas, 2 Capas – Urdimbre – 350 [mm]

	Todas	M1 y M2	M1 y M3	M2 y M3
Desv. Est., %	10.00	12.27	12.20	0.32

De esta forma, se tiene que la desviación estándar es mucho menor, siendo valores completamente aceptables como se puede apreciar en la Tabla 18. Por lo que en la Figura 70 se tiene la curva promedio considerando estas dos maderas con una notable mejora en su desviación de las líneas punteadas.

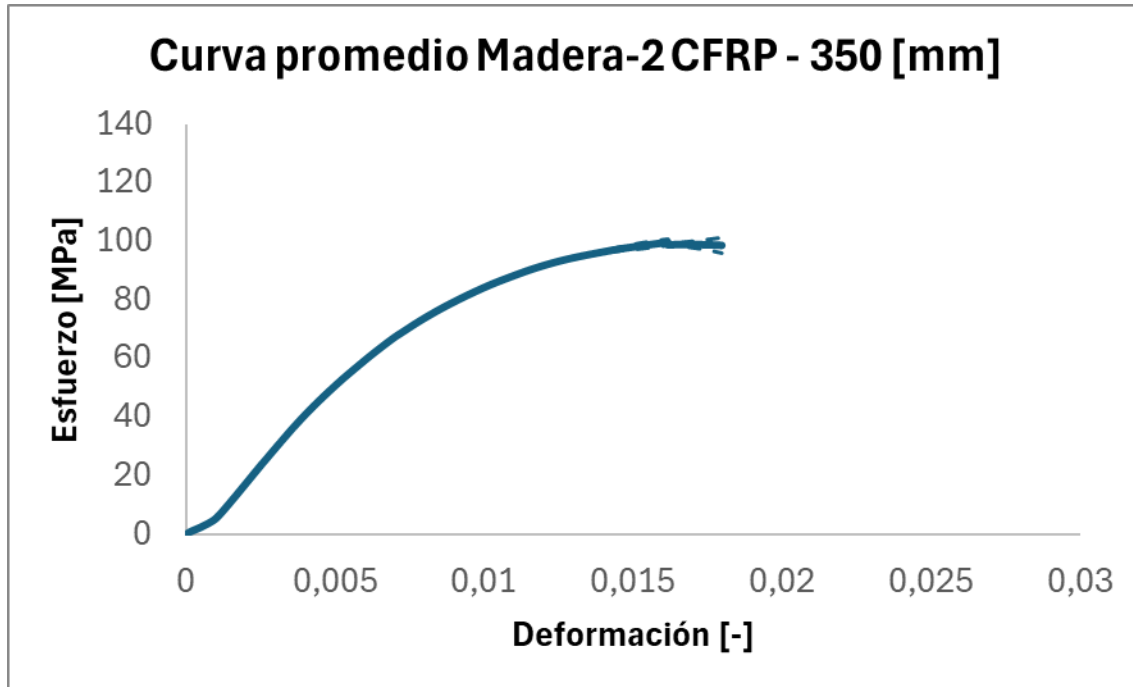


Figura 70 Curva Promedio Madera 2 y 3 Configuración 2 capas de CFRP - Urdimbre - 350 [mm]

4.2.5 CONFIGURACIÓN: 2 CAPAS, URDIMBRE, **LARGO 100 [MM]**

Estos ensayos constaron con una madera reforzada con 2 capas de CFRP, la dirección del reforzamiento fue en la urdimbre, con una longitud del reforzamiento una pequeña sección de la viga (100[mm]) y con la superficie sin alterar. Para este caso todas las maderas contaban con 2 vetas transversales al eje de carga. Y de igual formas las tres contaron con un método de fractura puramente flexivo. En la Tabla 19 se encuentran los resultados obtenidos los ensayos en las distintas maderas y en la Figura 71 Curva Esfuerzo vs Deformación configuración 2 Capas - Urdimbre - 100[mm]se tiene la curva Esfuerzo vs Deformación. De esta figura se observa que la Madera 1 se encuentra muy desviada en comparación a las otras dos maderas, por lo que es importante realizar el análisis estadístico de la carga y el módulo de elasticidad para trabajar los datos.

En la Tabla 20 se tienen los resultados de este análisis, lo que determina que la viga número 1 se debe omitir para tener una mejor homogeneidad de los datos. Esto debido a que supera el umbral del 7% propuesto para la consideración de los datos.

Tabla 19 Resultados Ensayos Flexión 2 Capas de reforzamiento - Urdimbre - 100 [mm]

	Madera 1	Madera 2	Madera 3
Esfuerzo Máximo, MPa	78.02	101.34	99.95
Deformación, -	0.013	0.013	0.014
E _{app} , MPa	8826	12333	12024

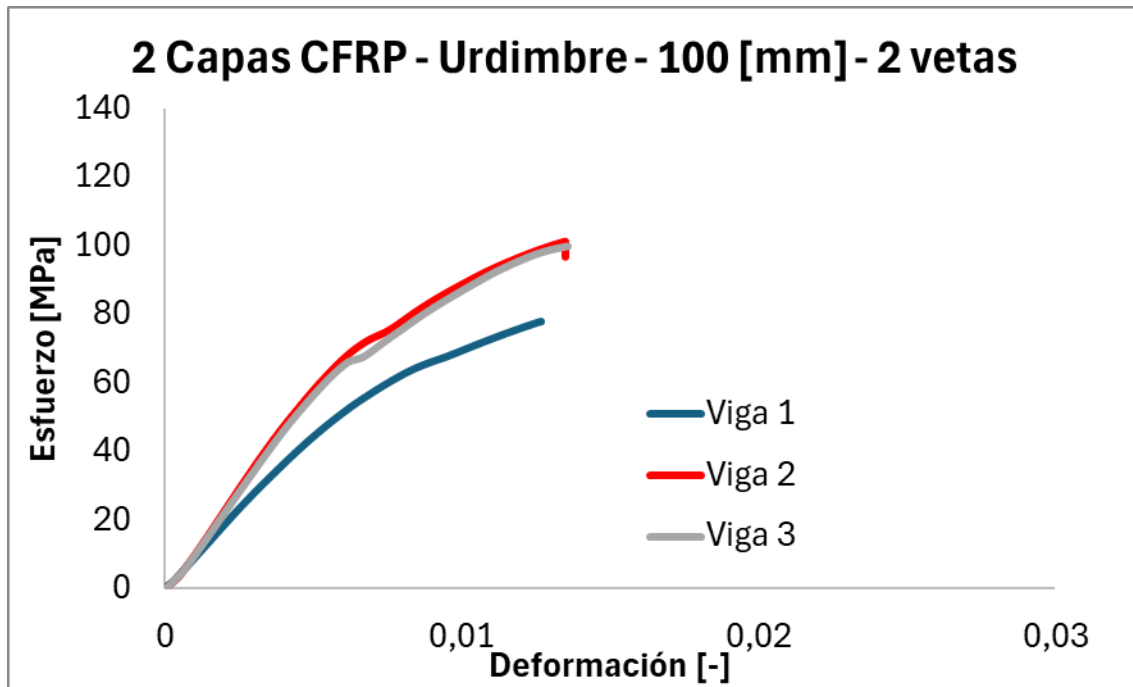


Figura 71 Curva Esfuerzo vs Deformación configuración 2 Capas - Urdimbre - 100[mm]

Tabla 20 Estadística resultados 3 maderas, 2 Capas – Urdimbre – 100 [mm]

	Todas	M1 y M2	M1 y M3	M2 y M3
Desv. Est., %	7.05	7.91	6.96	0.95

De esta forma, se tiene que la desviación estándar es mucho menor, siendo valores completamente aceptables como se puede apreciar en la Tabla 20. Por lo que en la Figura 72 se tiene la curva promedio considerando estas dos maderas con una notable mejora en su desviación de las líneas punteadas.

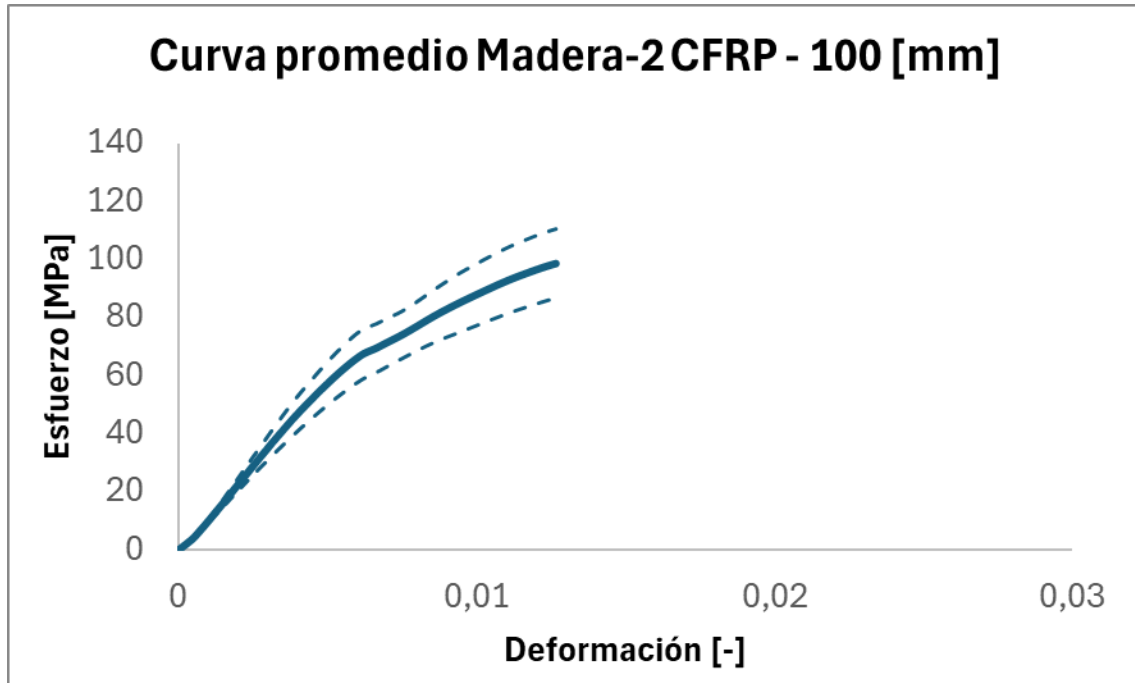


Figura 72 Curva Promedio Madera 2 y 3 Configuración 2 capas de CFRP - Urdimbre - 100 [mm]

4.2.6 CONFIGURACIÓN: 2 CAPAS, **TRAMA**, LARGO 410 [MM]

Estos ensayos constaron con una madera reforzada con 2 capas de CFRP, la dirección del reforzamiento fue en la urdimbre, con una longitud del reforzamiento una pequeña sección de la viga (100[mm]) y con la superficie sin alterar. Para este caso todas las maderas contaban con 2 vetas transversales al eje de carga. Y de igual formas las tres contaron con un método de fractura puramente flexivo. En la Tabla 21 se encuentran los resultados obtenidos los ensayos en las distintas maderas y en la Figura 73 se tiene la curva carga vs desplazamiento. De esta figura se observa que la Madera 1 se encuentra muy desviada en comparación a las otras dos maderas, por lo que es importante realizar el análisis estadístico de la carga y el módulo de elasticidad para trabajar los datos.

En la Tabla 22 se tienen los resultados de este análisis, lo que determina que la viga número 1 se debe omitir para tener una mejor homogeneidad de los datos. Esto debido a que supera el umbral del 7% propuesto para la consideración de los datos.

Tabla 21 Resultados Ensayos Flexión 2 Capas de reforzamiento - Trama - 410 [mm]

	Madera 1	Madera 2	Madera 3
Esfuerzo Máximo, MPa	115.84	115.82	127.67
Deformación, -	0.018	0.017	0.017
E _{app} , MPa	10851	14397	13934

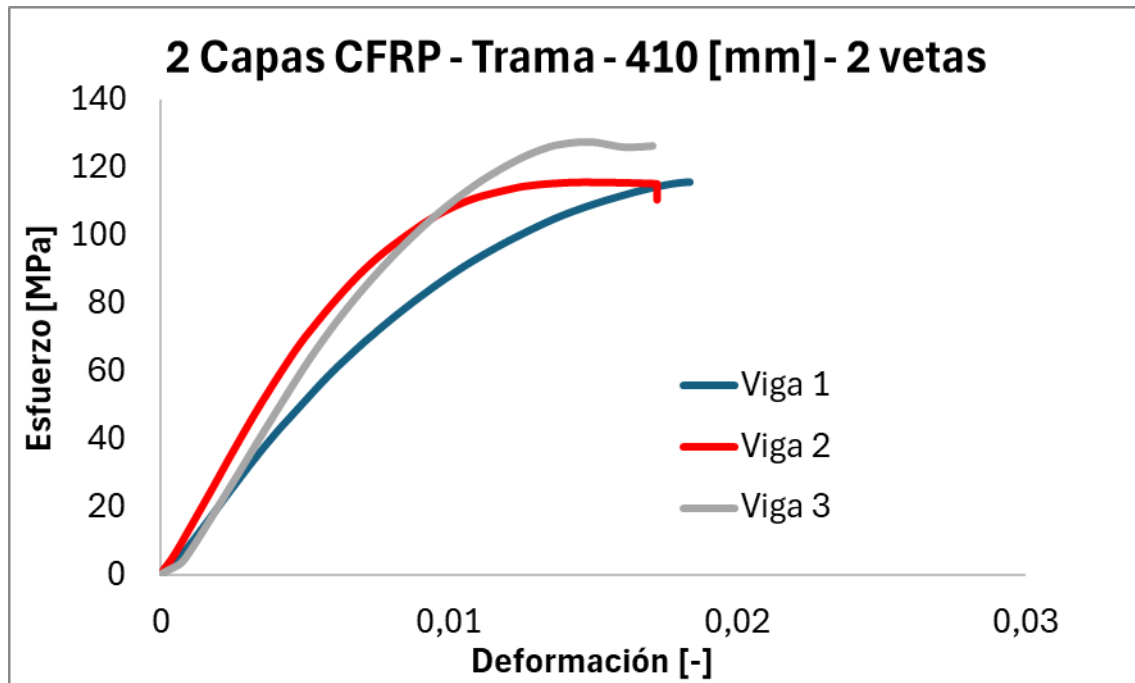


Figura 73 Curva Esfuerzo vs Deformación configuración 2 Capas - Trama - 410[mm]

En la Tabla 22 se observa que el uso de la Madera 1 desvía los datos, por lo que la eliminación de esta disminuye en gran medida la desviación estándar. En la Figura 74 se tiene la curva promedio sin considerar la Madera 1.

Tabla 22 Estadística resultados 3 maderas, 2 Capas – Trama – 410 [mm]

	Todas	M1 y M2	M1 y M3	M2 y M3
Desv. Est., %	7.01	7.31	7.18	4.20

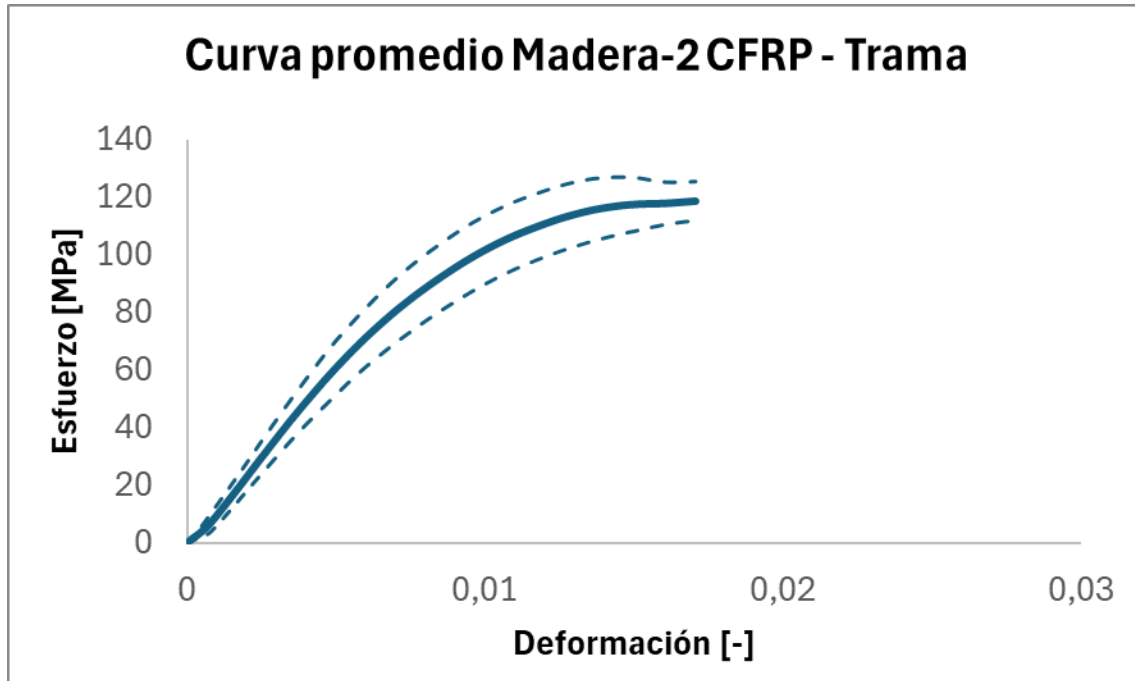


Figura 74 Curva Promedio Madera 2 y 3 Configuración 2 capas de CFRP - Trama - 410 [mm]

4.2.7 CONFIGURACIÓN: 2 CAPAS, **BIDIRECCIONAL, LARGO 410 [MM]**
 Estos ensayos constaron con una madera reforzada con 2 capas de CFRP, la dirección del reforzamiento fue en sentido bidireccional, con una longitud del reforzamiento de toda la barra (410 [mm]) y con la superficie sin alterar. En la Tabla 23 se observan los resultados de los ensayos para este caso bidireccional. Para este caso las vigas de madera contaban con 3 vetas transversales al eje de carga para el caso de la Madera 1, mientras que para la Madera 2 y 3 contaban con 2 vetas. Y de igual formas las tres contaron con un método de fractura puramente flexivo.

Tabla 23 Resultados Ensayos Flexión 2 Capas de reforzamiento - Bidireccional - 410 [mm]

	Madera 1	Madera 2	Madera 3
Esfuerzo Máximo, MPa	113.68	131.12	134.59
Deformación, -	0.024	0.018	0.018
E_{app} , MPa	12215	14165	14079

En la Figura 75 se observa la curva Esfuerzo vs Deformación para este caso en las tres maderas. Viéndose que la madera uno se escapa de los otros dos

ensayos. Al realizar el análisis estadístico de los resultados obtenidos, se concluye que la desviación estándar considerando las tres maderas es elevado, por lo que, al inspeccionar la figura de la curva se concluye que se debe omitir los resultados de la madera 1.

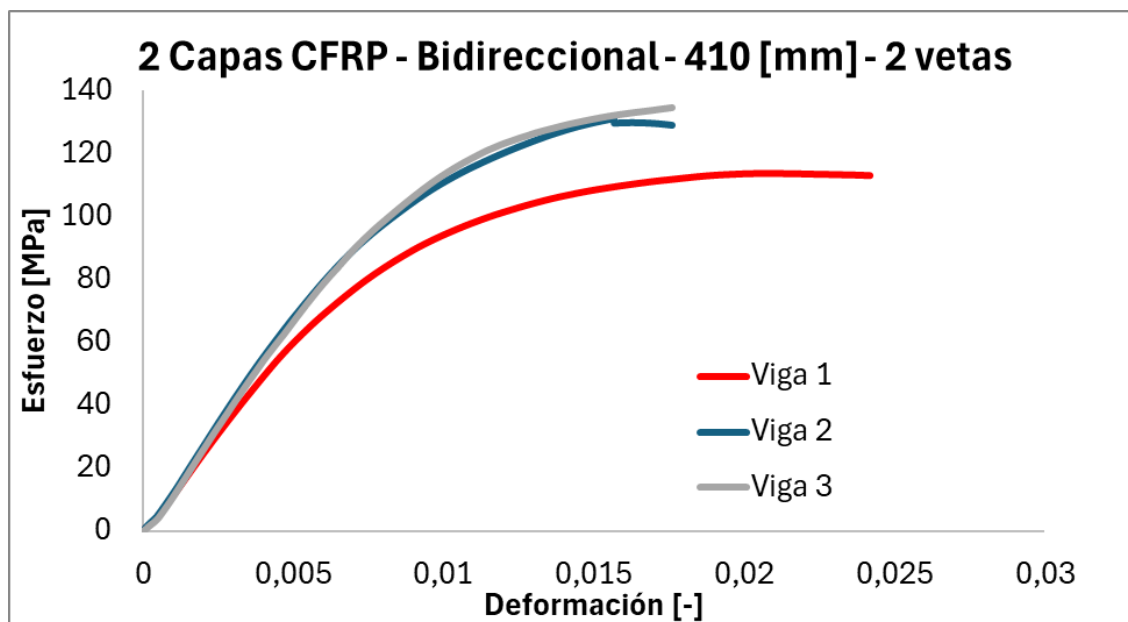


Figura 75 Curva Esfuerzo vs Deformación configuración 2 Capas - Bidireccional - 410[mm]

Tabla 24 Estadística resultados 3 maderas, 2 Capas – Bidireccional – 410 [mm]

	Todas	M1 y M2	M1 y M3	M2 y M3
Desv. Est., %	5.50	6.42	6.87	0.94

Sin embargo, los resultados están dentro del rango propuesto en un comienzo, donde debe ser menos de un 7% el cociente entre la desviación estándar promedio y el esfuerzo máximo. Teniendo la curva promedio en la Figura 76 considerando las tres maderas reforzadas.

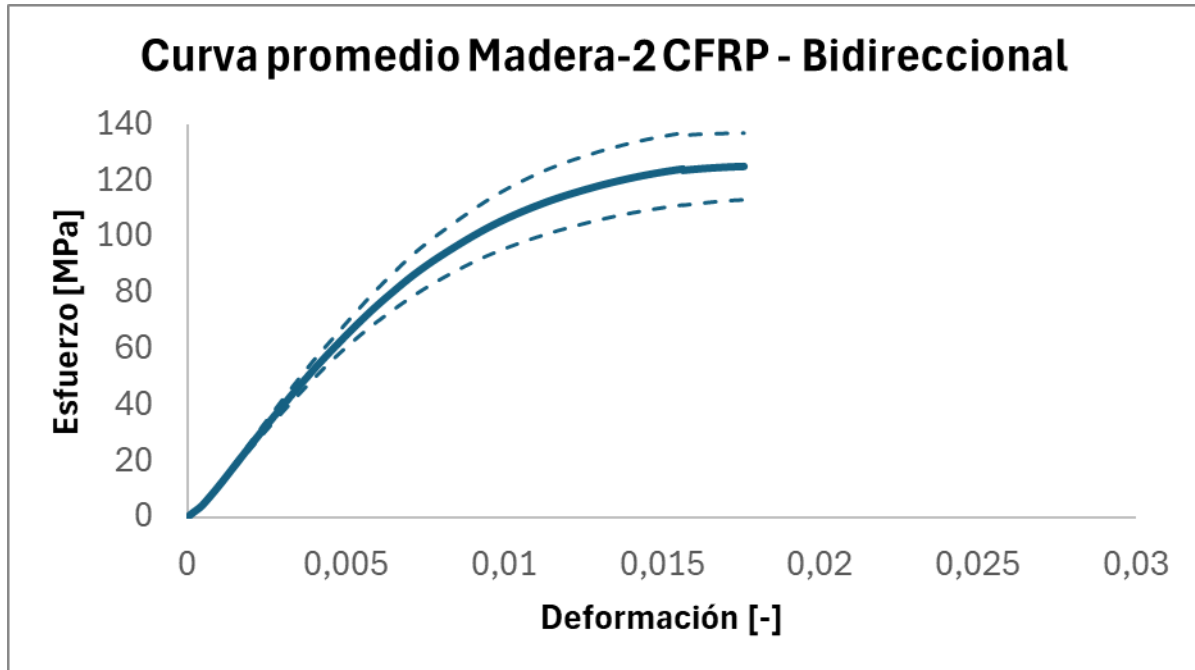


Figura 76 Curva Promedio Configuración 2 capas de CFRP - Bidireccional - 410 [mm]

ANEXO 5: CÁLCULO DE CURVA TEÓRICA

Para realizar el cálculo de la curva teórica para el caso de 1, 2 y 3 capas, se realizó con la metodología aplicada en la investigación citada en la sección 2.5. Donde en un comienzo se caracterizó la madera dando los resultados de la sección 4.1.1 y 4.1.2, donde se utilizaron los módulos de elasticidad de cada madera, como una curva cuadrática para el caso de la madera en compresión para su zona elastoplástica.

Posterior a tener los resultados, se utilizó la Ec. 1 (Regla de las mezclas) para ponderar el módulo de elasticidad de la madera en compresión (1351 [MPa]) con su respectiva fracción volumétrica, el módulo de la madera en tensión (2673 [MPa]) con su fracción volumétrica y el módulo de la fibra de carbono que fue otorgada por los proveedores Mepssystem (280000 [MPa]) y su respectiva fracción volumétrica según cada capa que se añadía.

Con estos valores se obtuvo el módulo de elasticidad del compuesto en general, el cual fue utilizado iterando con cada deformación desde el 0 hasta el 0.01 el cual fue el punto de fluencia común de los ensayos.

Una vez llegado el punto de fluencia se aplicaba la ecuación cuadrática obtenida por la curva de compresión para seguir este comportamiento en cada caso.

De esta forma se obtuvo cada una de las curvas teóricas calculadas.

Como recomendación, e insistencia, el uso de vigas de mayores dimensiones darían resultados mucho más exactos. Esto a causa de la aleatoriedad que ofrece el comportamiento de las vigas a la hora de encontrarse con vetas en su estructura, haciendo que lo teórico se aleje de lo experimental.

Como ejemplo se plantea lo siguiente.

Tabla 25 Propiedades de los materiales utilizados, con las fracciones volumétricas

Propiedad	Módulo de Elasticidad, MPa	Fracción Volumétrica 1 capa	Fracción Volumétrica 2 capas	Fracción Volumétrica 3 capas
Madera Comp	1351	0.4966	0.4933	0.4900
Madera Tensión	2673	0.4966	0.4933	0.4900
CFRP	280000	0.0068	0.0134	0.0200

Aplicando la regla de las mezclas se tiene:

$$E_c = V_f * E_f + (1 - V_f) * E_m$$

$$1 \text{ Capa: } E_{c1c} = 0.0068 * 280000 + 0.4966 * (1351 + 2673)$$

$$E_{c1c} = 5780 \text{ [MPa]}$$

$$2 \text{ Capas: } E_{c2c} = 0.0134 * 280000 + 0.4933 * (1351 + 2673)$$

$$E_{c2c} = 9499 \text{ [MPa]}$$

$$3 \text{ Capas: } E_{c3c} = 0.0200 * 280000 + 0.4900 * (1351 + 2673)$$

$$E_{c3c} = 19413 \text{ [MPa]}$$

Por otro lado, la ecuación cuadrática obtenida de la curva de compresión es:

$$-8.8915 * \epsilon^2 + 226.63 * \epsilon + C$$

CAPÍTULO 7. REFERENCIAS

- [1] ASM International, ASM Handbook Volume 21 - Composites, ASM, 2001.
- [2] M. P. Groover, Fundamentos de Manufactura Moderna, Pennsylvania: Mc Graw Hill, 2007.
- [3] Carbono, «Carbono Composites Training,» de *Curso de Formación profesional en composites de fibra de carbono 2022* , Buenos Aires, 2022.
- [4] P. K. Mallick, Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design, CRC Press, 2007.
- [5] W. Hall, Design and Manufacture of Fibre Reinforced Composites, Southport: Springer, 2021.
- [6] M. F. Ashby, Engineering Materials 2, Tercera ed., ELSEVIER, 2006.
- [7] P. Niemz, A. Teischinger y D. Sandberg, Handbook of Wood Science and Technology, Vienna: Springer.
- [8] F. Kollmann y E. Kuenzi, Principles of Wood Science and Technology, New York: Springer, 1975.
- [9] B. B. O. W. M. Hettesheimer, Qualification-Dimensioning. Forest Management Strategy. State's Forest Service of Rhineland-Palatinate, RheinlandPfalz, 2009.
- [10] J. M. Whitney y M. B. Riley, «Elastic Properties of Fiber Reinforced Composite Materials,» *AIAA Journal*, vol. 4, nº 9, pp. 1537-1542, 1966.
- [11] ASTM International, «Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials».
- [12] W. Callister, Ciencia de Materiales, Estay: Springer, 2014.
- [13] D. R. Askeland, The Science and Engineering of Materials, 7ma ed., Cengage Learning, 2011.
- [14] F. Beer, Mecánica de Materiales, Quinta ed., MC GRAW HILL, 2010.
- [15] A. K. Kaw, Mechanics of Composite Materials, Segunda Edición ed., CRC Taylor & Francis, 2006.

- [16] A. Kholkin, «Numerical Simulation of Damage and Failure of Laminated 3-Point Bending Specimens,» 2012.
- [17] N. Dowling, S. Kampe y M. Kral, Mechanical Behavior of Materials, Quinta Edición ed., UK: Pearson, 2020.
- [18] G. Hernández y J. C. Pinilla, «Propiedades básicas asociadas a la madera de acacio, Robinia pseudoacacia (L. Locust), proveniente de la provincia de Linares,» Instituto Forestal, Concepción, 1999.
- [19] Y.-F. L. Y.-M. X. y M.-J. T. , «Enhancement of the flexural performance of retrofited wood beams using CFRP composite sheets,» *Construction and Building MATERIALS*, vol. 23, pp. 411-422, 10 Noviembre 2006.
- [20] K. Hofstetter y K. Gamstedt, «Hierarchical modelling of microstructural effects on mechanical properties of wood. A review,» *Holzforschung*, vol. 63, pp. 130-138, 2009.
- [21] E. Marklund, J. Varna, C. Neagu y K. Gamstedt, «Stiffness of Aligned Wood Fiber Composites: Effect of Microstructure and Phase Properties,» *Composite Materials*, vol. 42, nº 22/2008, pp. 2377-2405, 2008.
- [22] ASTM International, *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*, 2017.
- [23] E. C. Botelho, L. Figiel, M. C. Rezende y B. Lauke, «Mechanical Behavior of carbon fiber reinforced polyamide composites,» *ELSEVIER*, 2003.
- [24] Centro Sismológico Nacional Universidad de Chile, «CSN,» 16 Enero 2023. [En línea]. Available: <https://www.csn.uchile.cl/durante-2022-se-registraron-7-273-sismos-a-lo-largo-del-pais/>.
- [25] S. Liu, Y. Lei, J. Zhang, J. Zhao, C. Bai y Q. Hu, «Experimental study and analysis on bonding strength of CFRP-wood interface,» *Adhesion & Adhesives*, vol. 123, 12 Mayo 2022.
- [26] Y. Nadir, P. Nagarajan, M. Ameen y M. Arif, «Flexural stiffness and strength enhancement of horizontally glued laminated wood beams with GFRP and CFRP composite sheets,» *Construction and Building MATERIALS*, vol. 112, pp. 547-555, 4 Marzo 2016.