

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

1.1. El problema.

1.1.1. Planteamiento

El paso de los años ha ido un factor determinante para el deterioro de las edificaciones de madera, puesto que su estructura se ha visto muchas veces comprometida, debido a los cambios en su forma original que en algunos casos estos han sido irreversibles. Esto debido a que la madera es orgánica, y sus deficiencias pueden ser afectadas por motivos físicos o mecánicos, consecuencia de ello, es la pérdida de sus capacidades estructurales que se hacen cada vez más evidentes.

La madera, elemento arquitectónico que da cuenta de nuestra historia y cultura patrimonial, se convierte en un documento que revela el paso del tiempo, cuyo transcurrir se ve plasmado en sus estructuras desde épocas anteriores a la colonia, las mismas que podrían continuar presentes en los monumentos o edificaciones de gran importancia considerados patrimonio cultural lo que imposibilita la opción de demolición como: La Casa Dorada (Casa de la Cultura), El Castillo Azul Moisés Navajas, La iglesia Catedral, Iglesia San Roque, Iglesia de San Lorenzo, Iglesia de Chaguaya, Casa de Tomas O'Connor Darlach y otros que lo podemos encontrar en el casco viejo de nuestra ciudad. A pesar de existir variadas intervenciones de restauración en el país, muy pocas han profundizado sobre la importancia de la rehabilitación estructural de elementos de madera, ya que en muchos casos es necesario para brindar seguridad y confort, y los refuerzos metálicos, de hormigón, etc. no cubren con las expectativas de una mejor imagen.

1.1.2. Formulación

En Tarija y en el país, en la actualidad no se tiene demasiado uso de maderas reforzadas con fibra porque se tiene un reducido conocimiento de este producto en el campo estructural.

En tiempos pasados los procesos de recuperación estructural de piezas de madera, se distinguían por la materialidad y la tipología del refuerzo: reforzamiento con piezas de madera, perfiles metálicos por la cara superior, secciones de hormigón y otros. En la actualidad es un tema prioritario, la conservación sostenible y rehabilitación.

1.2. Objetivos.

1.2.1. General

El objetivo general de esta investigación es:

Analizar el comportamiento estructural de la probeta de madera con refuerzo de fibra de carbono sometida a flexión tanto analítica como experimental en base al modelo de cálculo estructural (Arguelles), siguiendo las recomendaciones dadas por la Norma Panamericana COPANT.

1.2.2 Específicos

- Elaborar probetas de madera de Aliso (*Alinus Jorullensis*) bajo procedimientos y consideraciones de la norma de diseño de maderas COPANT 455.
- Determinar analíticamente (Método de Arguelles) la resistencia a flexión de la probeta de madera reforzada, como así también su deformación máxima.
- Determinar la resistencia a flexión experimental de las probetas de madera reforzadas y sin reforzar, como así mismo sus propiedades elásticas (MOE, MOR, ELP) tanto para las probetas reforzadas como para las sin reforzar.
- Analizar el incremento de carga experimental que se puede lograr con el refuerzo de fibra de carbono, y la deflexión máxima alcanzada por ambos grupos de probetas.
- Comparar los resultados obtenidos experimentalmente con los resultados del modelo teórico de cálculo aplicado.
- Analizar el comportamiento mecánico de las probetas y los tipos de fisuras al momento de alcanzar su carga de rotura.

- Determinar las dimensiones equivalentes para probetas, con la carga alcanzada experimentalmente por las probetas reforzadas.

1.3 Justificación del proyecto.

Las razones por las cuales se plantea la propuesta de proyecto de ingeniería civil son las siguientes.

1.3.1. Académica.

La presente investigación se justifica para optar al título Profesional, ya que colabora y contribuye a profundizar los conocimientos en cuanto a refuerzo en probetas de madera y la importancia que tiene el estudio del incremento de resistencia en este tipo de elemento estructural.

1.3.2. Técnica.

La presente investigación permitirá incrementar la eficiencia de los elementos estructurales ante la degradación por envejecimiento mediante método y técnica de refuerzo con fibra de carbono que mejoren la capacidad resistente de la probeta, sin alterar tanto su diseño inicial, como su originalidad, aun presente en cada una de ellas.

1.3.3. Social.

Prolongar el tiempo de las estructuras antiguas tradicionales, manteniendo la integridad del patrimonio cultural y la autenticidad histórica atrayendo el turismo, al mismo tiempo el impacto en el medio ambiente es menor que el producido por la demolición y construcción desde cero.

1.3.4. Económico

Resulta más económico o eficiente reparar que las soluciones de demolición y posteriores de reconstrucción, por otro lado, el costo de la fibra es compensado por sus múltiples ventajas, entre ellas su rápida instalación económica.

1.4 Marco de referencia.

1.4.1. Marco conceptual.

a) **Rigidez:** Es la capacidad de un elemento para oponerse a la deformación.

En el diseño de la mayoría de los elementos estructurales de madera, la rigidez es comúnmente la que decide el diseño de la escuadría final, las luces máximas admisibles y la distancia entre vigas.

En general en vigas y columnas esbeltas es la rigidez la que decide el diseño donde existen elementos sometidos a tracción, como es el caso del cordón inferior de una cercha; en cambio, las vigas cortas y columnas poco esbeltas muy cargadas, quedan diseñadas por resistencia.

La rigidez flexional (EI/L) de un miembro es representada como el producto del módulo de elasticidad (E), el segundo momento de área también conocido como momento de Inercia (I) dividido por la longitud (L).

b) **Resistencia:** Capacidad de un elemento para soportar esfuerzos sin llegar a la rotura.

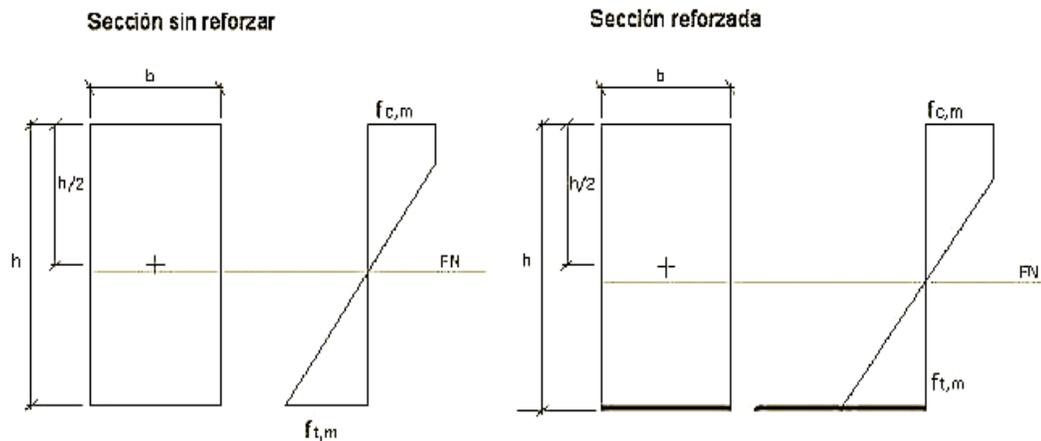
c) **Ductilidad:** Capacidad de un elemento para deformarse sin perder su resistencia.

1.4.1.1 Interacción entre la madera y el refuerzo

La madera sin reforzar sometida a flexión, generalmente muestra un modo de fallo a tracción. En algunas ocasiones, dicho fallo se produce tras la plastificación de alguna de las fibras comprimidas. Se trata de una rotura frágil, producida en la zona traccionada y con escasa plastificación de las fibras superiores.

Mediante la aplicación de refuerzos se pretende aumentar la rigidez y la resistencia en dicha zona. De esta manera se consigue un aumento en la resistencia a tracción y la resistencia a compresión. Así se producirá una rotura más dúctil, a la vez que las fibras comprimidas alcanzaran su mayor grado de plastificación. La madera será la que gobierne el modo de fallo y el valor de la carga última. El material compuesto cuenta con un módulo de elasticidad y una resistencia a tracción muy superiores a los de la madera.

El mecanismo de funcionamiento consiste en la transmisión de la tensión a través de la superficie de unión entre la madera y el refuerzo.



*Figura 1.1: Comparación entre sección reforzada y sin reforzar.
Fuente: Universidad Austral de Chile.*

1.4.1.2 Formas de refuerzo en elementos sometidos a flexión

La colocación de los refuerzos se realiza casi siempre por adherencia, o bien embebidos en la zona sometida a esfuerzos de tracción del elemento flexionado. También se han estudiado probetas con refuerzo colocado en la cara comprimida o posicionado en la cara traccionada.

| REFUERZO EN LA CARA TRACCIONADA | | | | | | |
|---------------------------------|--|--|--|--|--|----|
| Varillas | | | | | | VT |
| Láminas | | | | | | LT |
| Tejidos | | | | | | TT |

*Figura 1.2. Refuerzo en caras traccionadas
Fuente: Universidad Austral de Chile.*

1.4.1.3. Materiales compuestos

Se denomina material compuesto a aquel formado por dos o más componentes de distinta naturaleza, y distinguibles macroscópicamente, unidos con el fin de obtener una combinación de propiedades que no se pueden conseguir con ellos individualmente. Un componente conforma la matriz que envuelve al otro, de forma que los materiales trabajen como uno solo, manteniendo sus formatos originales por separado. Un caso concreto de este tipo de material es el de los polímeros reforzados con fibras (FRP), que son combinaciones bifásicas formadas por dos componentes principalmente: fibras y matriz polimérica. El elemento fibroso aporta rigidez y resistencia. La matriz, normalmente a base de resina, es flexible y poco resistente, y tiene como misión principal transmitir los esfuerzos de unas fibras a otras y protegerlas de posibles daños.

1.4.1.3.1. Propiedades

Las características que definen un material compuesto de polímeros reforzados con fibras son: la geometría, la orientación de las fibras respecto de los ejes principales del elemento y la concentración de éstas, es decir, el porcentaje fibras con respecto al volumen total del material compuesto.

Son materiales heterogéneos que tienen aproximadamente 70% de fibra y un 30% de polímero cuya principal característica es su comportamiento lineal hasta la rotura y el esfuerzo producido es casi diez veces mayor al del acero. En la mayoría de los casos son materiales anisótropos, ya que las fibras suelen estar orientadas en una dirección. Las principales ventajas de estos materiales son: sus buenas propiedades mecánicas, su bajo peso en relación a su resistencia y la resistencia a la corrosión. Una de las más significativas de los polímeros reforzados con fibras respecto al acero es su baja densidad en relación a sus propiedades mecánicas, $\rho_{\text{fibra de carbono}} = 0,25 \cdot \rho_{\text{acero}}$ (Ehsani, 2004).

Debido a la naturaleza anisótropa de los materiales compuestos, las propiedades mecánicas dependen en gran medida de la orientación de las fibras. Para el análisis de las propiedades es útil conocer la radio anisótropa, que se define como el valor del

cociente entre valores de las propiedades del material en las distintas direcciones.

La unión es directa entre la matriz y las fibras, y la eficacia y buen funcionamiento de material compuesto dependerá en gran medida de la buena ejecución.

Las probetas sometidas a flexión, en la mayoría de los casos, se rompen por fallo de las fibras inferiores sometidas a tracción. Si se refuerza dicha zona con materiales compuestos se consigue un aumento en la capacidad de carga última de los elementos reforzados.

El comportamiento de la superficie de unión entre la madera y el refuerzo se considera un factor determinante en el funcionamiento de este tipo de sistemas.



*Figura 1.3. Refuerzo con fibra de carbono de un puente
Fuente: Escuela técnica superior de edificación*

1.4.2 Espacial.

Los ensayos a flexión se llevaron a cabo en el laboratorio de Tecnología de la madera de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales, posteriormente se realizó los cálculos y análisis de resultados en gabinete.

1.4.3. Temporal

La vida útil del proyecto será ilimitada o hasta que se desarrollen y aparezcan nuevos productos con mejores capacidades mecánicas que este tipo de refuerzo.

1.5. Alcance

1.5.1. Hipótesis

La aplicación del refuerzo de fibras de carbono a las probetas incrementará su capacidad de carga entre un 20 a 40%, además se prevé esperar una mayor deformación en el orden del 9% en comparación con las probetas sin reforzar.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

La madera ha sido un material muy utilizado a lo largo de la historia en la construcción de edificaciones. Por este motivo, ha sido necesario idear sistemas de refuerzo de las estructuras construidas con madera, con el objetivo de recuperar o incrementar la capacidad portante inicial de vigas y pilares.

Esta necesidad exigió una búsqueda de métodos más eficientes que pudieran cumplir ese papel, por lo cual varios estudios están siendo realizados utilizando polímeros reforzados con fibras (FRP). Dentro de ésta, las fibras que presentan mejores resultados como refuerzo estructural para elementos de madera son las fibras de carbono.

La fibra de carbono comenzó a utilizarse en el refuerzo de elementos estructurales a principios de los años 90, concretamente la primera aplicación mediante la adhesión de láminas de material compuesto con fibra de carbono fue llevada a cabo en el puente Ibach, en Suiza, en el año 1991. En este caso se trataba del refuerzo de elementos de hormigón, al igual que la mayoría de las aplicaciones realizadas en años posteriores. Su aplicación sobre la madera fue posterior y más escasa. La primera operación importante de refuerzo de una estructura de madera con este tipo de material también se realizó en Suiza en 1995, cuyo proyecto fue llevado a cabo por G. Schwegler u H. Meier. el refuerzo se realizó mediante la colocación de láminas de material compuesto de fibra de carbono sobre la estructura de un puente de madera de 185 años de antigüedad en la ciudad de Sins, en el mismo año también se realizó el refuerzo de las cerchas de cubierta de la iglesia de Frauenkirche (Kempe,1995), construida en el siglo XV en Meissen, Alemania. En este caso, el refuerzo consistió en la construcción de tirantes de material compuesto con fibra de carbono han sido investigados en menor medida. Esto hace surgir un interés especial por el desarrollo de estudios que conduzcan a un mayor conocimiento del comportamiento de esta materia utilizado como refuerzo de elementos estructurales, tanto de fibra de basalto, por su escaso conocimiento, como los de fibra de carbono, por las pocas ocasiones en las que se ha aplicado en

elementos estructurales de madera, puesto que, en la mayoría de los casos, se ha aplicado sobre elementos de hormigón.

2.1.1. La madera en edificios patrimoniales locales

El uso de la madera siempre ha sido parte de las construcciones, pese a todos los cambios de tipología arquitectónica que se han ido dando. En la actualidad podemos encontrar una variedad de inigualables edificaciones patrimoniales, cuyos sistemas estructurales han evolucionado a partir de la introducción de nuevas tecnologías en el manejo de la madera y que cuentan con alto valor histórico, entre ellos están: La Casa Dorada (Casa de la Cultura), El Castillo Azul Moisés Navajas, La iglesia Catedral, Iglesia San Roque, Iglesia de San Lorenzo, Iglesia de Chaguaya, y otros



Figura 2.1: Edificio patrimonial ubicado en la calle General Trigo

Fuente: <https://www.elperiodico-digital.com/wp-content/uploads/2019/08/repo-5-1.jpg>

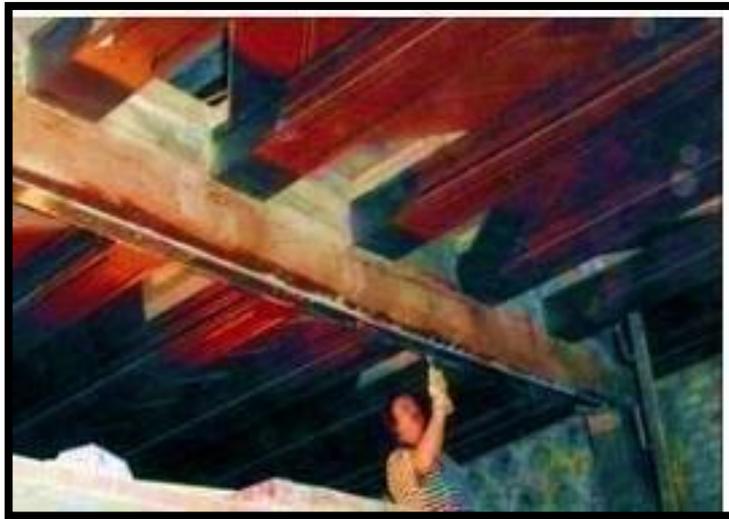
Actualmente el reglamento básico de conservación de las áreas históricas de Tarija, establece diferentes categorías: A de arquitectura patrimonial de excepcional relevancia nacional, B de arquitectura patrimonial de relevancia y C de arquitectura

patrimonial intervenciones restrictivas.

Según las categorías A, B y C entre las más importantes de este plan, no pueden ser modificadas de acuerdo a su estructura original, demolidos total o parcialmente y de ninguna manera divididas. Pero sí es permitido: la rehabilitación y/o funcionamiento para recuperar su diseño original.

2.1.2. La madera reforzada en edificios contemporáneos

Como se puede ver en la Figura, en Escocia se realizó un reforzamiento de probetas de Techo en losa reticular en el Castillo Mansfeld el propósito fue el cambio de uso, se convirtió en un Hotel.



*Figura 2.2. Reforzamiento del Castillo Mansfeld.
Fuente: Revista estudio en madera*

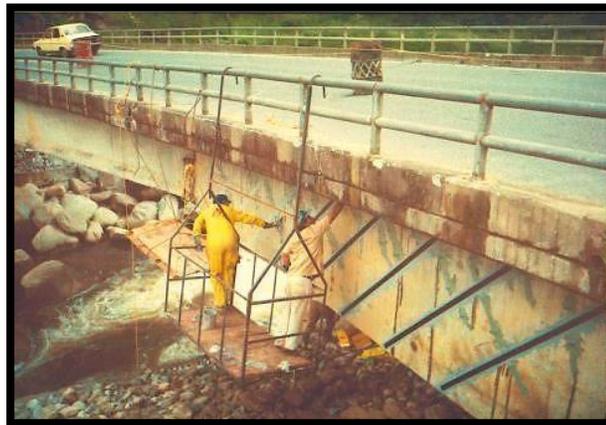
En Italia el Palacio Farnesio Del siglo XVI uno de los edificios más atractivos del Renacimiento de Roma, se inició a construir en el año 1514. Antonio Sangallo, luego Miguel Ángel y, finalmente, Giacomo della Porta, fueron los encargados de su edificación, en la Figura 2, se puede apreciar que las probetas de su cubierta fueron reforzadas con CFRP , actualmente es la sede de la embajada de Francia en Roma.

El primer reforzamiento que se hizo en Latinoamérica fue en el año de 1996 en el puente Corconá (Bogotá-Colombia) donde se tuvo que incorporar este tipo de refuerzo

en 45° para evitar la fisuración por esfuerzo cortante.



*Figura 2.3. Reforzamiento del Palacio Farnecio.
Fuente: Revista estudio en madera*



*Figura 2.4. Puente Corconá 1996.
Fuente: Plan gerencia técnica.*

2.1 Elementos de madera reforzada con materiales compuestos.

Las probetas sometidas a flexión, en la mayoría de los casos, rompen por fallo de las fibras inferiores sometidas a tracción. Si se refuerza dicha zona con materiales compuestos, se consigue un aumento en la capacidad de absorber tracciones, mostrando un incremento en la capacidad de carga última de los elementos reforzados.

Los primeros trabajos de investigación que aparecen en la literatura, dedicados al estudio del comportamiento de elementos de madera reforzados con FRP,

corresponden a la década de los sesenta. En ambos trabajos se emplearon materiales compuestos de fibra de vidrio y se reforzaron probetas de madera aserrada (Gomez et al, 2008). Spaun F. analizó el incremento de resistencia y la rigidez de las probetas reforzadas ensayadas a flexión. El refuerzo también se realizó con fibra de vidrio. Se comienza a aplicar la fibra de carbono como material de refuerzo en probetas de madera posteriormente (Meier et al, 1995; Ogawa et al, 2000; Buell et al, 2009). En el año 1992 se publicaron dos trabajos realizados por Plevris N. y Triantafillou T. y por Triantafillou T. y Deskovic N., en los que se aplicaron este tipo de refuerzos. En el primero se aplicó el refuerzo en forma de lámina sin pretensar. En el segundo se aplicaron las mismas láminas, pero pretensadas previamente. Se observó un aumento en la capacidad de carga de las probetas con láminas pretensadas con respecto a las no pretensadas. Las láminas pretensadas fueron también objeto de estudio en los trabajos publicados por Brunner M. en 2002 y 2005. En el primero se hace un análisis teórico del incremento de capacidad de carga en probetas reforzadas con láminas pretensadas, con respecto a las no pretensadas. En el segundo, se hace una comprobación experimental, en la que se confirma que los resultados que obtenidos con el modelo teórico aplicado se ajustan a los obtenidos en los ensayos.

El modo de fallo de las probetas de madera a flexión, en función del tipo de refuerzo aplicado, también ha sido objeto de estudio (Schober, 2005). Otro posible fallo de las probetas de madera es el debido al esfuerzo cortante (Akbivik et al., 2007; Lam et al, 2000). La existencia de fendas de secado en las probetas de madera puede producir el fallo prematuro por dicho esfuerzo. Son varios los autores que han analizado y propuesto sistemas de refuerzo a cortante con láminas dispuestas en las caras laterales de las probetas. Dichos refuerzos se colocaron en las zonas de mayor esfuerzo cortante (Greenland, 1999; Triantafillou, 1997). Otra forma de refuerzo ante esfuerzo cortante es el realizado con varillas pultruidas (Corradi et al, 2007; Guan et al, 2005) embebidas con resina epoxi en orificios practicados en el canto inferior de las probetas.

La fibra utilizada para la fabricación de los materiales compuestos en refuerzo de elementos de madera fue, en los primeros trabajos de investigación, la fibra de vidrio (Gentile, 1999; Hallstrom, 1997; Johns y Lacroix, 1999; Pavez, 2009).

Posteriormente, aumentó el número de trabajos en los que se estudió la aplicación de la fibra de carbono en este tipo de refuerzos (Borri 2003; Borri 2005). Los materiales compuestos de fibra de basalto han sido objeto de estudio en algunos trabajos. En el trabajo realizado por Quanfeng W. en 2010, el autor concluye que este tipo de refuerzo, con fibra de basalto, mejora las propiedades mecánicas de los elementos reforzados (Zandbergs et al, 1998).

2.2.1. Polímeros reforzados con fibras (PRF)

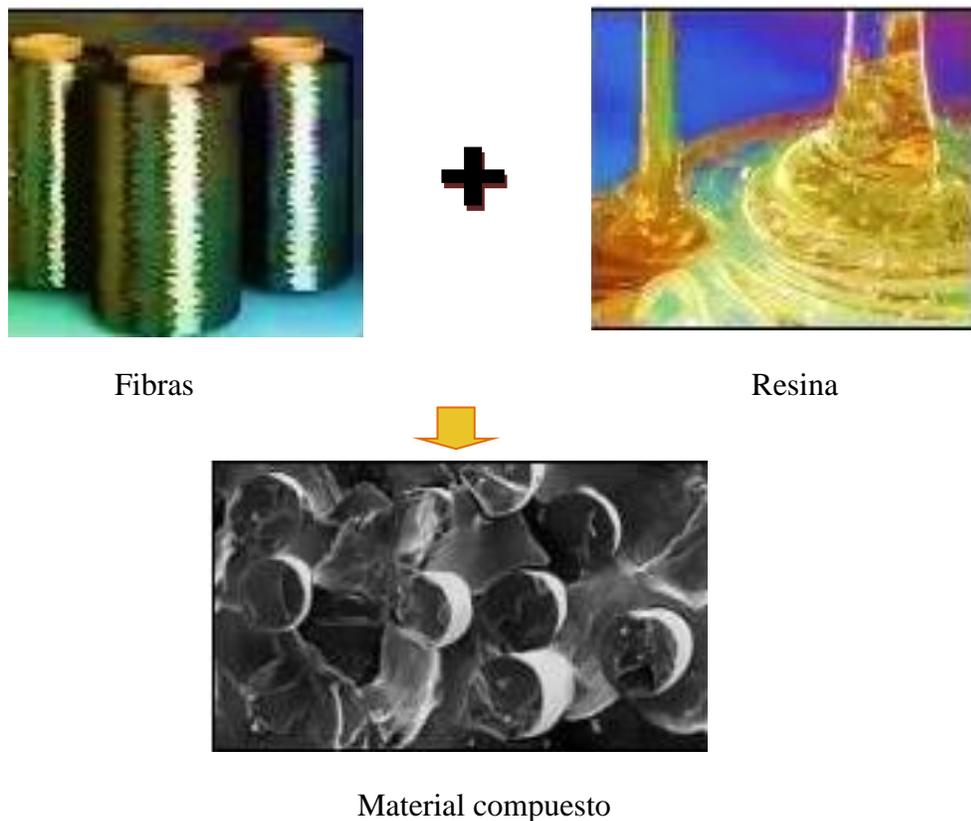


Figura 2.5. Componentes de un material compuesto
Fuente: Comportamiento-materiales- compuestos-fibra-carbono

Los polímeros reforzados con fibra (PRF) se forman a partir de la unión de fibras a una matriz (adhesivo), constituyendo una composición que presenta propiedades mecánicas de resistencia y elasticidad superior a las propiedades individuales de cada material. Según NORRIS & SAADATMANESH (1994), las fibras son responsables de la

resistencia del compuesto, y la matriz es el producto que los une, siendo responsable de la transmisión de esfuerzos.

Entre las fibras que se están utilizando para formar un PRF destacan las fibras de vidrio, (aramida) y fibras de carbono.

2.2.1.1. Fibras

- Asumen las cargas.
- Trabajan en una dirección preferente.
- Reducen la deformación.
- Aportan resistencia y rigidez.

2.2.1.2. Matriz

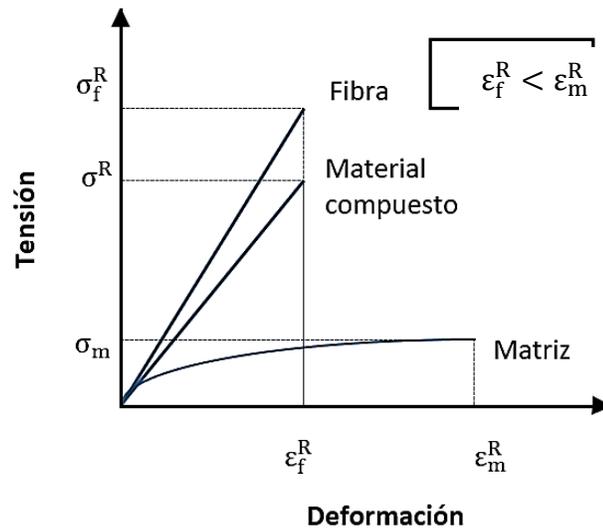
- Transfiere las tensiones.
- Mantiene las fibras en posición.
- Protege a las fibras.
- Proporciona dureza.
- Aporta resistencia a la fatiga.

2.2.2. Sistemas de refuerzo de fibra de carbono

Los sistemas de refuerzo con FRP se pueden aplicar de varias maneras: Existen materiales compuestos obtenidos mediante pultrusión o laminación, con diferentes formas comerciales. En este caso, el FRP se adhiere directamente al elemento que se quiere reforzar. También se utilizan otros sistemas en los que el tejido es impregnado previamente con resina en fábrica, pudiéndose adherir directamente al elemento a reforzar, o bien añadiendo resina en el momento de su colocación en el refuerzo. Por último, existe otro método de ejecución “in situ” en el que el FRP se prepara en el mismo momento de su aplicación, adhiriéndose simultáneamente al elemento reforzado.

Las características del FRP dependen de las propiedades y fracción de volumen de los

elementos que lo compone, así como de la adherencia entre las fibras y la resina que conforma la matriz. De todas formas, las propiedades mecánicas del FRP son fundamentalmente gobernadas por las de la fibra, debido a que la contribución mecánica de la resina en el FRP es prácticamente despreciable, en comparación con las de la fibra. En la siguiente Figura se presenta un diagrama en el que se muestra un ejemplo de la relación tensión-deformación de un FRP y los materiales que lo componen (fibras y matriz).



*Figura 2.6. Diagrama tensión - deformación de las fibras, matriz y compuesto.
Fuente: Revista.materialesdeconstruccion.com*

Los dos tipos de materiales más utilizados (platina y tejido de fibra) difieren ligeramente en rendimiento y método de aplicación.



*Figura 2.7: Tejido unidireccional. y hoja de fibra de carbono.
Fuente: revista Sika (2000)*

La principal diferencia está en la forma de presentación del producto. Mientras que la tela de fibra de carbono tiene un grosor de 0,5 mm y un ancho de aproximadamente 1,5 m, las hojas de fibra de carbono tienen un grosor que varía de 1,2 a 1,4 mm y ancho de 5 a 10 cm.

Se utilizan como adaptación a nuevas normativas, defectos de proyecto y/o de ejecución, reparación de estructuras dañadas con pérdida de sección resistente, mejorar, aumentar o rehabilitar el comportamiento y la resistencia de las estructuras para:

a) Mayor capacidad de carga:

- Cambio de uso que conlleva a aumentar la capacidad de carga de losas, probetas y secciones de puentes.
- Para la instalación de maquinaria más pesada en edificaciones industriales.
- Para estabilizar estructuras con vibración.
- Para cambios en el uso de las edificaciones.
- Incremento de cargas vivas en almacenes.

b) Daños a elementos estructurales:

- Deterioro en el tiempo de los materiales de construcción originales.
- Refuerzo de acero con corrosión.
- Accidentes (impacto de vehículos, terremotos, incendios).

c) Mejora de la capacidad de servicio y durabilidad:

- Reducción de la deformación y el ancho de fisuras.
- Reducción de tensiones en el acero de refuerzo.
- Resistencia a la fatiga mejorada.

d) Cambio de sistema estructural:

- Eliminación de muros y/o columnas.

- Eliminación de secciones en losa y pared para crear accesos / aberturas.
- e) **Resistencia a posibles eventos:**
 - Mayor resistencia a terremotos, impactos o explosiones, etc.
- f) **Para reparar defectos de diseño o construcción tales como:**
 - Refuerzo insuficiente / inadecuado.
 - Profundidad estructural insuficiente / inadecuada (recubrimiento insuficiente).

2.2.2.1. Ventajas

- Tienen densidades que varían entre 1.5 y 2.5 g/ cm^3 en contraste con la densidad del acero que es de 7.85 g/ cm^3 la baja densidad hace que los FRP sean materiales livianos y que al momento de utilizarlos como esfuerzo no incrementen el peso de la estructura.
- Elevada resistencia a la tracción una ventaja muy importante de la fibra de carbono ya que incrementa notablemente la resistencia de la estructura, pero muy poco la rigidez.
- Es resistente a condiciones ambientales agresivas, ataques químicos, álcalis y la corrosión no es un factor que afecte su comportamiento como en los materiales metálicos, por lo que su coste de mantenimiento será muy inferior.
- Tiene una excelente durabilidad y resistencia a la fatiga al ser sometido a cargas cíclicas que en materiales metálicos disminuyen la resistencia con mayor rapidez.
- Disponible en varios módulos de elasticidad.
- Longitud ilimitada, sin necesidad de traslapes no requiere juntas, se elimina los empalmes que eran necesarios con las chapas de acero, pudiendo cortar donde se considere más conveniente directamente en la obra.
- Bajo espesor, se puede revestir con un acabado final como recubrimiento con mortero o simplemente pintura.
- Simple ejecución de intersecciones o cruces de platinas (emparrillados).

- Colocación rápida, en un día se pueden colocar varios cientos de metros lineales de refuerzo lo que hace que el rendimiento sea mayor y el costo por unidad de medida sea muy bajo.
- Bajo espesor del sistema, simple intersección y empalmes de platinas.
- Liviano y flexible, muy fácil instalación, transporte (rollos) y manejo, no requiere mano de obra especializada ni equipo de instalación.
- Ensayos y aprobaciones disponibles en diversos países del mundo.
- Permite ser pintado sin preparación previa.

2.2.2.2. Desventajas

- Una de las desventajas más importantes del FRP es el alto costo de la materia prima, pero de alguna manera esto se compensa con el bajo costo del equipamiento y mano de obra necesarios en el proceso de preparación, ensamblado y colocación del FRP en los elementos a reforzar.
- El FRP es una excelente opción para el reforzamiento de estructuras, pero no es la respuesta a todos los problemas que se presentan, su uso se encuentra limitado a refuerzos pequeños o dicho de otra forma para “cirugías menores”.
- Por tratarse de un sistema que va adherido externamente al hormigón mediante una formulación epóxica, se requiere un mayor cuidado en la preparación de la superficie de contacto ya que una incorrecta colocación conlleva a serias fallas estructurales por concentración de esfuerzos o por delaminación de las platinas.
- Desde el punto de vista de su instalación, bajo ninguna razón y por ningún medio deben ser dobladas, esto limita un poco su instalación en lugares con muchos quiebres y cambios de dirección, pero se puede solucionar utilizando tejidos de fibra de carbono los cuales, si son moldeables,
- Uno de los modos de falla que se considera es el desprendimiento del material, cuando existen esfuerzos de flexión y cortante, esto es un problema porque una vez que empieza la delaminación los elementos fallan ante un bajo nivel de sollicitaciones y la estructura se vuelve más débil que al inicio.

- La fibra de carbono tiene un módulo de rotura muy baja por lo que no es recomendable que se use en aplicaciones donde se requiere mayor ductilidad, como por ejemplo un refuerzo sísmico, sin analizar detenidamente el comportamiento frente a tales sollicitaciones.
- Otra debilidad del FRP es su susceptibilidad al fuego, ya que a una temperatura superior a los 80°C el material comienza a despegarse del sustrato, aún se está trabajando en nuevos códigos de diseño y normativas que estandaricen su uso para la construcción.

2.3. Propiedades de los materiales

2.3.1 Madera

Las propiedades de la madera por sus diferentes reacciones y, obviamente, por su condición orgánico-vegetal, podrán ser altamente variables, aun siendo de la misma especie, e inclusive del mismo árbol. Las propiedades generales de la madera dependerán de factores como: crecimiento, edad, contenido de humedad, tipo de terreno en el que creció y distintas partes del tronco. Se debe recordar que un árbol cumple con funciones estructurales intrínsecas, pues todos sus componentes se desarrollan en función de su posición de crecimiento; es decir, cada elemento del árbol ayuda a que este se mantenga de pie, soportando fenómenos naturales propios o externos. A causa de esta situación, dichas propiedades se dividen en dos grupos principales: las físicas y las mecánicas.

Con respecto al origen de las propiedades mecánicas, estas son el resultado de aplicar esfuerzos de carga sobre el material; es decir, la respuesta que la madera posee ante fuerzas aplicadas, ya sean estas paralelas o perpendiculares a su eje axial.

Las propiedades físicas, generalmente, no son producidas por fuerzas exteriores que actúan sobre el elemento; son factores propios de cada material. Todo dependerá de la estructura y el procesamiento que haya tenido en su periodo de vida.

Es un material natural cuya constitución es semejante a la de un material compuesto. Su estructura interna consta de fibras longitudinales de celulosa y una matriz de lignina que las envuelve, las protege y las mantiene unidas, además de transmitir los esfuerzos

entre ellas. Su funcionamiento consiste en que las fibras de celulosa soportan las tracciones y la matriz de lignina las compresiones.

2.3.1.1. Características

- Es un material anisótropo que presenta diferente comportamiento en función de la dirección en la que se aplique la fuerza. Se puede considerar un material ortótropo, teniendo en cuenta tres direcciones principales: axial (paralela al eje de crecimiento del árbol), radial (perpendicular a la dirección axial y cortando el eje del árbol) y tangencial (perpendicular a la axial y a la radial). La resistencia a tracción en dirección perpendicular a las fibras es entre 30 y 70 veces menor que en la dirección paralela a estas. La resistencia a compresión en la dirección perpendicular es alrededor de una cuarta parte que en la dirección paralela (Arguelles et al, 1996).
- Está compuesta principalmente por carbono (50%), oxígeno (40%) e hidrógeno (5%).
- En cuanto a su macroestructura, se puede considerar al tronco de un árbol como un cono o paraboloides formado por sucesivas capas superpuestas.
- Esta estructura que conforma el entero de la madera, se organiza en diferentes capas, las cuales son de dentro a afuera:
 - a) **Médula:** Parte central del tronco carente de resistencia mecánica.
 - b) **Duramen:** Parte interna del tronco, caracterizada por ser de color más oscuro que el resto del mismo debido a ciertos procesos químicos, acumulación de resinas o aceites, compuestas por células inactivas que se van obstruyendo ya sea por depósito de sales minerales como oxalatos o carbonatos, o por la transformación de tilosas que provoca que los elementos conductores pierdan su función. Su resistencia es mayor a la de la albura.
 - c) **Albura:** parte que suscribe al duramen, de color característico más claro que este, compuesta por células activas por donde discurre savia bruta desde las raíces hacia las hojas. La albura, junto al duramen, conforman la xilema de la madera.
 - d) **Cambium:** Parte delgada de la madera, que se forma exteriormente a la xilema y separa este del floema. Las células del cambium se dividen para dar lugar internamente

a nuevas células del xilema que forman los nuevo anillos de crecimiento y externamente a las células del floema encargadas de conducir los producto de la fotosíntesis desde las hojas al resto de los órganos de la planta.

e) **Floema:** compuesto por la corteza interna o Liber y la corteza externa o peridermo.

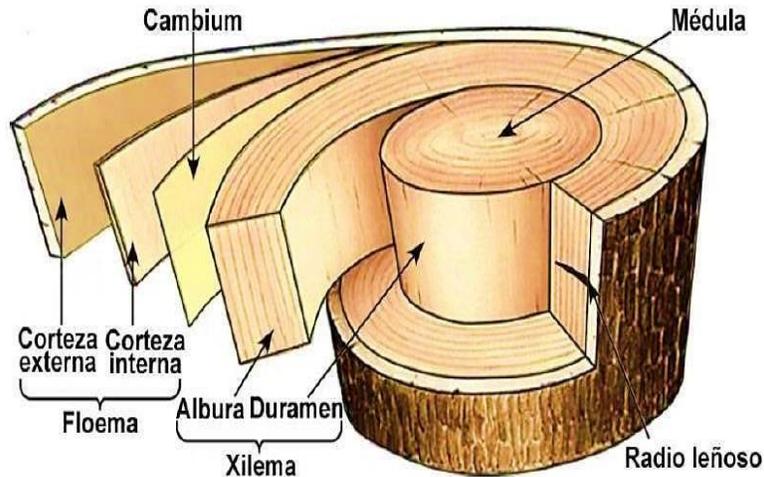


Figura 2.8. Sección transversal de las partes del tronco.

Fuente: <http://mundobiologico/morfologia.html>.

2.3.1.2. Tipos de defectos

a) **Nudos:** Son inclusiones de las ramas dentro del árbol. Pueden estar sanos y ser de adherentes, con los que no constituyen ningún defecto pues obedecen al desarrollo vegetativo.



Figura 2.9. Nudo sano en madera aserrada

Fuente: Revista ing. Daniel Enríquez

b) **Fendas:** Son fisuras o agrietamiento en dirección radial y axial, que se

producen en el árbol o en la madera cortada al superarse los valores de existencia por diferentes motivos, como las tensiones de crecimiento o la desecación de la madera.

- c) **Acebolladuras:** Roturas locales producidas entre dos anillos de crecimiento vecinos, a lo largo del eje del árbol, que se producen cuando dichos anillos se desarrollan a velocidades distintas.
- d) **Doble albura:** Se genera por la falta de ligninación de dos o más anillos anuales que no se transformaron a tiempo en duramen.
- e) **Inclinación de la fibra:** Defecto genético bastante habitual en la madera juvenil de las coníferas y las frondosas, que se revira a derechas pero que en la mayoría se corrige con la formación de la madera madura.
- f) **Pudriciones:** Afección por parte de alguno de los numerosos organismos vivos que viven en la madera (hongos o agentes xilófagos).

2.3.1.3 Propiedades físicas

Las propiedades físicas de la madera dependen, fundamentalmente, de los factores propios de la naturaleza que envuelve a la madera y, sobre todo de su especie.

Para el caso de la madera estructural, las propiedades físicas relacionan la humedad y su efecto con el comportamiento estructural y con cambios dimensionales y de densidad que este factor pueda producir en las piezas de madera.

Las características físicas y mecánicas variarán con el contenido de humedad, que en estado natural es alto (50-300% dependiendo de la especie).

2.3.1.3.1 Anisotropía

La madera quizá sea el mejor exponente con esta propiedad, ya que su condición orgánica hará que esta responda de diferente manera, según su posición ante esfuerzos aplicados.

Entonces, la anisotropía se refiere a las diferentes propiedades que tiene la madera según la orientación de su estructura fibrosa, es decir, sus propiedades no se distribuyen de la misma forma, en todas sus direcciones, ya que intrínsecamente el

árbol posee dos ejes principales que son: paralelo a la fibra (paralelo al eje del tronco) y la perpendicular a la fibra (perpendicular al eje del árbol, en dirección tangencial o radial). Por lo tanto, es lógico que las propiedades en dirección paralela a la fibra, que vayan a ser mucho más favorables, puesto que en este eje se orienta la mayoría de tensiones generadas en el interior del árbol y que utiliza para cumplir su función estructural. Sin embargo, el árbol no tiene por qué soportar grandes esfuerzos en dirección perpendicular a su eje y, por lo tanto, no ha desarrollado mecanismos para resolverlos.

Además, esta propiedad puede ayudar a determinar otras propiedades físicas, tales como: elasticidad, temperatura, conductividad, etc. Este fenómeno, siempre debe ser considerado para interpretar el comportamiento estructural de la madera, pues es uno de los aspectos más importantes con respecto a otros materiales. Como dato estructural, se puede estimar que el comportamiento de la madera para cualquier propiedad física o mecánica en dirección de la fibra, está en el orden de 10 a 30 veces más resistente que en dirección perpendicular.

Para una mejor asimilación de la propiedad anisotrópica en la madera, se propone un ejemplo muy común en la construcción: si se considera una pieza de madera maciza de sección constante, y se la aplica una carga axial al eje del tronco -paralelo a la fibra-, el elemento presentara una resistencia superior a la que pueda tener si el esfuerzo fuera aplicado perpendicular a la fibra. La situación expuesta, ha citado el caso común de una columna y probeta de madera, las cuales poseen diferentes tipos de resistencia.

2.3.1.3.2 Humedad de la madera

Unas de las características especiales de la madera como material es su capacidad higroscópica, ya que tiende a absorber o perder humedad relativa, dependiendo del medio en el que se encuentre. La cantidad de agua en la madera podemos encontrarla en tres tipos diferentes: agua libre, agua higroscópica, y agua de constitución. El agua libre es la que se encuentra llenando las cavidades celulares. El agua higroscópica es la que podemos encontrarla dentro de las paredes celulares, y el agua de constitución se

encuentra formando parte integrante de la estructura molecular.

La madera después de su respectivo proceso de aserrado y exposición al medio ambiente, empieza a perder agua dando inicio al proceso de secado que se divide en tres etapas.

En el transcurso de dicho proceso, en primer lugar, pierde el agua libre contenida y, después, en un proceso más lento, el agua higroscópica va disminuyendo su contenido de las paredes celulares del material, dejando únicamente el agua de constitución en el interior, la cual se llega a perder solo en el caso de combustión.

Según el contenido de agua que una pieza de madera puede contener se clasifica en tres estados: verde, seco y anhidro.

Madera verde se considera cuando ha perdido una pequeña cantidad de agua libre, madera seca, en cambio, cuando haya perdido totalmente el agua libre y empiece a perder agua higroscópica, finalmente, será madera anhidra cuando haya perdido toda el agua libre e higroscópica.

Con respecto al tiempo en el que la madera pueda perder o ganar humedad, se debe considerar dos aspectos importantes:

- Las propiedades mecánicas podrán variar, significativamente, según la cantidad de agua presente o contenida en la madera.
- La variación de volumen en las piezas, ocasiona serios problemas estructurales. También se debe recalcar, en cuestiones de durabilidad, que si el nivel de agua es alto y variable, el material se vuelve susceptible al ataque de xilófagos y a factores de podredumbre. Para motivos de análisis de la madera, el contenido de humedad (CH%) se define como: el porcentaje en peso, que tiene el agua libre más el agua higroscópica con respecto al peso de la madera anhidra, la expresión citada es la siguiente

$$CH\% = \frac{\text{Peso húmedo} - \text{Peso anhidro} * 100}{\text{Peso anhidro}}$$

Dicho contenido de humedad es habitual fijarlo en el 12%, aunque en general resultados inferiores al 20% son válidos considerando factores de ajuste. En cualquier caso las relaciones resistencia-rigidez deben establecerse con madera seca.

2.3.1.3.3 Densidad de la madera

La densidad es la relación existente entre la masa y el volumen de un cuerpo. Para cuestiones de cálculo se toma la masa como el peso del cuerpo: el peso de la madera es el resultado de sumar el peso de la parte sólida, más el peso del agua. El volumen de un elemento de madera se puede considerar constante cuando se encuentra en estado verde; este volumen puede ir disminuyendo cuando el CH. se encuentra por debajo el PSF; finalmente, cuando la madera en cuestión alcanza un estado anhidro o seco, su volumen volverá a ser constante.

Es importante considerar que, para una misma especie, los valores de densidad pueden variar, considerablemente, según las condiciones en que se hagan las mediciones de peso y volumen.

Adicionalmente, a estos criterios de valores de densidades entre especies, existen variaciones, inclusive, entre las partes de un mismo árbol; por ejemplo, la madera de la parte inferior de un árbol es más densa que la parte superior.

Como consecuencia de las diferentes posibilidades que puede presentar una especie, al momento de realizar las mediciones para la obtención de sus respectivas densidades, se han considerado las cuatro más importantes, según el estado en el que se encuentre la madera, las cuales se detallan a continuación:

- La densidad verde (DV) es la relación que existe entre el peso verde (PV) y el volumen verde (VV).
- La densidad seca al aire (DSA) es el resultado de la relación que existe entre el peso seco al aire (PSA), y el volumen seco al aire (VSA).
- La densidad anhidra (DA) es la relación que existe entre el peso seco al horno (PSH) y el volumen seco al horno (VSH).
- La densidad básica (DB) es la relación entre el peso seco al horno (PSH) y el

volumen verde (VV). Este es el menor de las cuatro.

2.3.1.4. Propiedades mecánicas

Las principales propiedades mecánicas o propiedades resistentes de la madera son: Resistencia a la flexión, resistencia a la compresión, resistencia a la tracción y corte paralelo.

Observando la composición básica de la madera y del FRP, ambos materiales son conceptualmente similares. Ambos están constituidos a base de fibras dispuestas en una dirección principal, con una elevada resistencia a tracción en dicha dirección. De igual modo, tanto el FRP como la madera están formados por un elemento que sustenta dichas fibras.

Para el caso de la madera, se trata de los parénquimas y los canales resiníferos. En el caso del FRP se trata de la matriz de resina. La principal y gran diferencia reside en su origen. La madera es un material natural de origen orgánico, afectado por numerosos factores como nudos, cambios de humedad, etc., con bajo o nulo control en su producción y desarrollo. Sin embargo, los materiales FRP son productos industriales elaborados con un riguroso control.

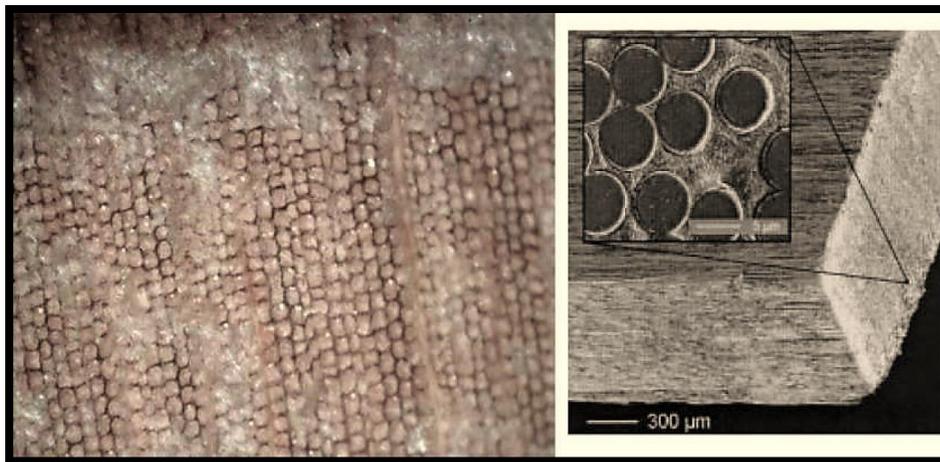


Figura 2.10. Comparativa de ambos materiales a nivel microscópico. Izq Madera. Derecha: Lámina de CFRP. Fuente: Universidad de la Granada.

2.3.1.4.1. Resistencia a la flexión

La flexión perpendicular a la fibra es un esfuerzo característico de las probetas de madera. En la gráfica de Carga-Deformación, se puede apreciar los diferentes estados que atraviesa la pieza previa a su ruptura. Como primera fase, está el rango elástico, el cual se encuentra definido por la recta inicial de dicho gráfico, seguido del límite proporcional, el cual está claramente definido, puesto que allí se encuentra el mayor esfuerzo admisible, y es donde la línea recta cambia su pendiente y la curva empieza a deformarse, definiendo un primer punto de inflexión “p”.

Después de sobrepasar, el límite proporcional, el material pasa a un estado plástico, en

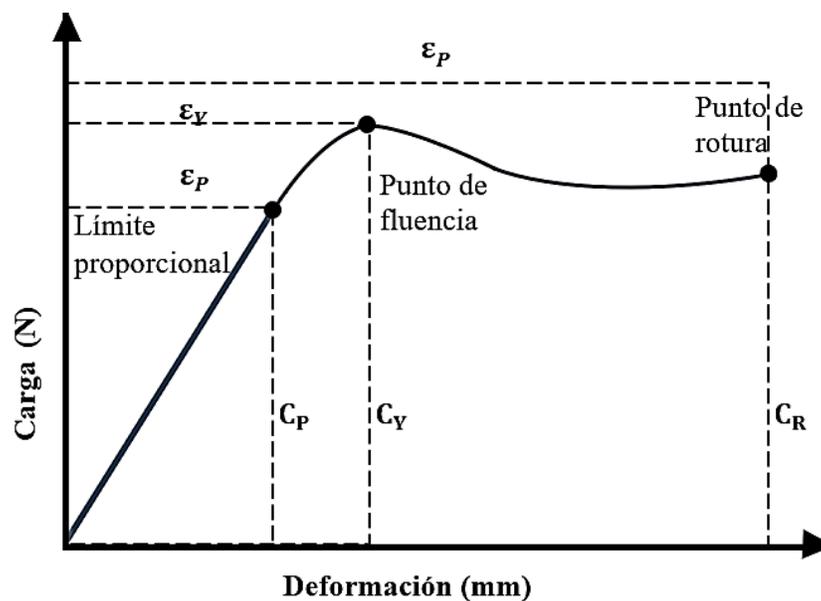


Figura 2.11. Curva típica Carga-Deformación de un Material

Fuente: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1415-43662004000100015&script=sci_arttext

donde, cada deformación producida, se hace de forma permanente. Como última etapa, dentro del comportamiento a flexión del material, está el punto de ruptura, el cual refleja la máxima capacidad de carga, que puede soportar un elemento. Una de las características especiales de la madera expuesta a flexión, es que la fractura no es repentina, ya que el elemento se manifiesta previa a un colapso y el proceso responde a

una separación de fibras muy lenta, dependiendo de las cargas.

Con respecto al diseño estructural para probetas de madera, los valores de la carga perpendicular a la fibra deberán estar por debajo del límite proporcional, así la madera se comportará, en flexión, como material elástico. Y a medida que la carga va aproximándose a su valor máximo, la distribución de los esfuerzos transversales deja de ser lineales y la posición del eje neutro se desplaza hacia abajo.

Debido a que la falla en la madera a flexión inicia con el aplastamiento de las fibras extremas sometidas a compresión y, esto a su vez, deriva en la rotura de las fibras a tensión. En probetas secas la falla se produce directo a tracción. En ensayos de

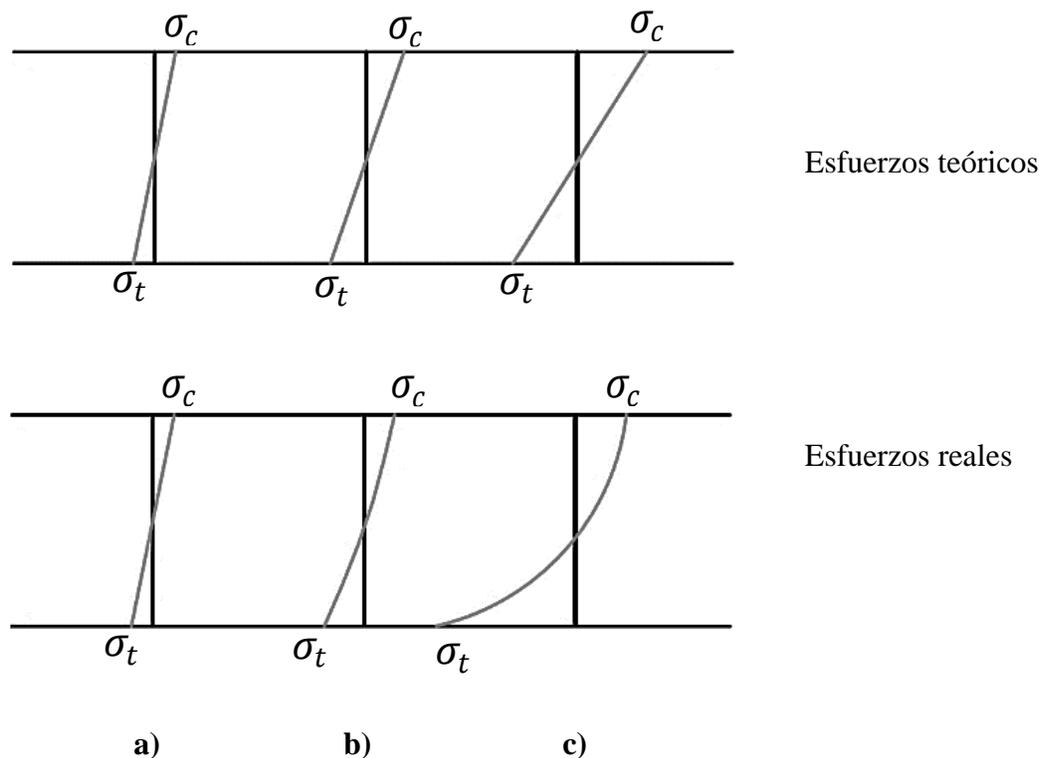


Figura 2.12. Sección sometida a flexión / Fuente: JUNAC(PADT-REFORT).” Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino”. Lima-Perú: 61982

probetas pequeñas la resistencia a flexión varía entre 200 y 1700 kg/cm².

Como ya se había mencionado la madera es un material anisótropo. Característica que le confiere distintas propiedades según sea la dirección en la que tenga que responder

ante esfuerzos de compresión, tracción etc. Esta característica, que viene directamente relacionada con la anatomía vegetal y crecimiento del árbol, hace más compleja la simulación de la estructura. Pese a ello, en el modelo matemático podemos simplificar su microestructura ignorando las imperfecciones naturales como nudos, fendas, desviaciones de fibra, etc.

Pese a que el estudio del comportamiento plástico de la madera en el ámbito de su naturaleza anisótropa está bastante estudiado, en esta tesis nos limitaremos al estudio del comportamiento elástico lineal y ortotrópico de la estructura de madera cuando se encuentra reforzada por elementos de acero. Por tanto y admitiendo la hipótesis de Bernoulli de la deformación plana de la sección en la flexión de las piezas de madera se pueden distinguir tres fases.

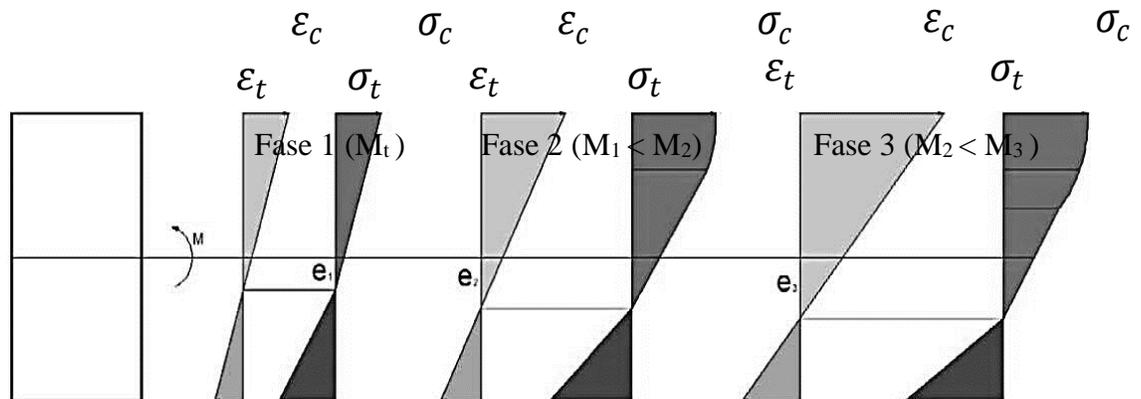


Figura 2.13 Etapas por las que atraviesa la flexión de una probeta de madera
Fuente: adaptado de Arguelles y Arriaga, 1996.

La primera fase en la que hay proporcionalidad lineal en tensiones de tracción y compresión. La excentricidad e_1 (desviación de la fibra neutra) se produce por equilibrio entre los bloques de tensiones con distinto módulo de elasticidad, donde e_1 es la desviación de la fibra neutra con respecto al eje de la sección, h es el canto de la sección y E_t y E_c son los módulos de elasticidad a tracción y compresión. La segunda fase está marcada por el umbral en la deformación y tensión del comienzo de la fase

plástica en compresión. Se empieza a dibujar una curva del bloque de compresiones y equilibrio de nuevo entre ambos bloques y se marca una mayor desviación de la fibra (e_2). La última fase corresponde al momento en el que la tensión última del borde comprimido comienza su plastificación. La deformación y tensión de las fibras comprimidas se independizan avanzando la primera sin aumento de la segunda y la excentricidad e_3 crece aún más. La rotura se produce por fallo de las fibras traccionadas al llegar a su valor último. La rotura no es inmediata sino que se ve precedida de varios crujidos (Arguelles Bustillo, 1994) correspondientes a las roturas parciales de las fibras.

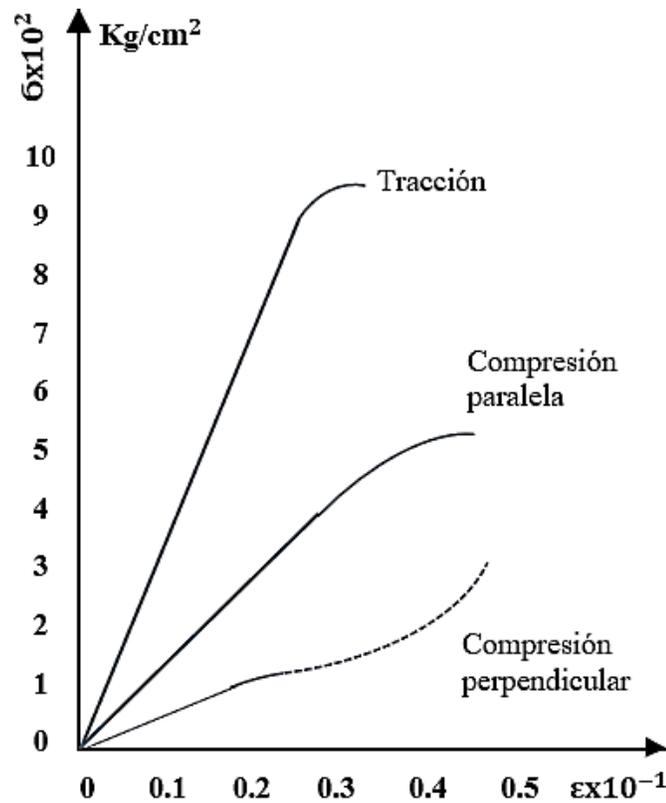
2.3.1.4.2. Resistencia a la compresión

El comportamiento mecánico a compresión, como a otros tipos de esfuerzos, es muy diferente en ambos materiales, debido principalmente a las dimensiones en que se utilizan en el sector de la construcción. En el caso del comportamiento a compresión, la madera presenta un excelente comportamiento, con unas buenas prestaciones mecánicas en relación a su peso, presenta dos tramos claramente diferenciados, marcando un comportamiento elastoplástico.

Por el contrario, para los materiales FRP, pese a que su resistencia última a compresión es similar, aunque inferior a la resistencia a tracción, las geometrías típicas de suministro (gran esbeltez) presentan grandes problemas de pandeo ante este esfuerzo.

2.3.1.4.3. Resistencia a la Tracción

La tracción en dirección paralela a la fibra suele ser la mayor resistencia que presenta la madera ante las demás acciones mecánicas. Según la Figura anterior, se puede observar el comportamiento lineal y elástico de la curva esfuerzo deformación. Además, se distingue lo rápido que puede fallar una pieza bajo estos esfuerzos. La resistencia que presenta la madera a la tracción paralela es afectada por la inclinación del grano. El esfuerzo a rotura varía entre 500 y 1500 kg/cm².



*Figura 2.14. Curvas esfuerzo - deformación para maderas latifoliadas.
Fuente: JUNAC(PADT-REFORT). "Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino". Lima-Perú:1982. pág. 1-23*

El hecho de que tanto la madera como el FRP sean materiales con fibras dispuestas en una dirección principal, hace que su comportamiento a tracción sea prácticamente similar. Se puede observar como para ambos casos, la relación entre tensión y deformación es totalmente lineal hasta una rotura frágil. Sin embargo, el módulo elástico a tracción del CFRP es de 15 a 20 veces mayor que el de la madera.

2.3.1.4.4. Ductilidad

Para obtener un comportamiento dúctil de las probetas a flexión es necesario que las fibras traccionadas tengan un comportamiento plástico, mayor que las comprimidas, lo que, en el caso de la madera es difícil al tener un comportamiento elástico-lineal en tracción. Otra forma de obtener un comportamiento dúctil en la configuración de

ensayo realizada, sería el caso en que las fibras de tracción tuviesen mucha más resistencia que las comprimidas y el fallo se produjese por rotura de estas últimas (tipo aplastamiento)

El modo de fallo en los ensayos a piezas a flexión sin refuerzo, desecha la posibilidad de existir comportamiento dúctil en las probetas ensayadas.

Se pueden obtener dos modos de fallo:

- Rotura por cortante, por lo que no se producen procesos de plastificación de la parte comprimida de la pieza.
- Rotura por flexión debido a la existencia de un punto débil por un defecto: en este caso el fallo por dicho punto secciona la probeta al instante, por lo que tampoco se obtendrá comportamiento dúctil.

Sin embargo, las piezas ensayadas una vez reparadas muestran un comportamiento que se podría denominar dúctil ya que, como se comprobará posteriormente, la descarga que sufren una vez adquirida la máxima tensión de ensayo es paulatina y permite alcanzar unos desplazamientos mayores.

Lamentablemente, dicho comportamiento no se puede contabilizar debido a que, aunque es claro, no sigue un patrón de comportamiento marcado en todas las probetas.

2.3.1.5. Propiedades elásticas.

2.3.1.5.1. Módulo de flexión, de Young, o de elasticidad longitudinal (MOE)

Es un constante que determina el comportamiento de un material dentro el rango elástico, relaciona el esfuerzo y la deformación de un material según la ley de Hooke.

Para obtener el módulo de elasticidad se hace uso de la ecuación de la deflexión máxima para una probeta simplemente apoyada con carga en centro luz:

$$Y_{\text{máx}} = \frac{P * L^3}{48EI}$$

De esta se despeja el módulo de elasticidad E y se la representa por MOE y a la deflexión lectura en centro luz por Δ :

$$\text{MOE} = \frac{P * L^3}{48\Delta I}$$

MOE= Módulo de elasticidad en flexión (kg/cm²).

P= Carga al límite de proporcionalidad obtenida de la gráfica (kg) L= distancia entre apoyos de la probeta (cm)

b= ancho de la probeta (cm) h= espesor de la probeta (cm)

Δ =Deflexión en centro luz correspondiente al límite de proporcionalidad(cm).

m= pendiente de la tangente a a la porción inicial de línea recta de la curva de carga desviación de deflexión (kg/cm)

También se obtiene directamente de una curva de esfuerzo-deformación en un ensayo de compresión paralela a la fibra o de manera indirecta en los ensayos a flexión dibujando una tangente a la porción de línea recta inicial más empinada de la curva de desviación de carga. Sin embargo, según resultados obtenidos en madera tropicales estructurales, el MOE a compresión paralela, es mayor que el MOE obtenido de ensayos en flexión estática.

Para cálculos de elementos individuales, el valor promedio de su MOE está predeterminado para los tres diferentes grupos estructurales.

2.3.1.5.2. Módulo de ruptura o esfuerzo a flexión

La resistencia máxima a la flexión es el valor máximo de la curva (sostenido por la muestra durante el ensayo) es decir, el valor del esfuerzo de las fibras más alejadas del eje neutro cuando $y=c$ sometido a esfuerzos de compresión y tensión, para la carga máxima registrada en el ensayo a flexión, se calcula con:

$$\text{MOR} = \sigma_f = \sigma_m = \frac{M_{\text{máx}} \cdot c}{I}$$

Tomando en cuenta que:

$$M_u = \frac{PL}{4}; \quad C = \frac{h}{2}; \quad I = \frac{bh^2}{12}$$

Tendremos:

$$MOR = \sigma_f = \frac{3 \cdot P_{rup} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

MOR = Esfuerzo de las fibras extremas al punto medio (kg/cm²). P_{rup} = Carga a la ruptura (kg)

L_{flex} = Distancia entre apoyos (cm) b = Base de la probeta (cm)

h = Altura de la probeta (cm)

2.3.1.5.3. Esfuerzo de las fibras en el límite elástico o proporcional (ELP)

Se define como el esfuerzo máximo en que el esfuerzo y la deformación permanecen directamente proporcionales. Se determina trazando una línea recta tangente a la curva, en el origen, y anotando la primera desviación que tenga la curva en su linealidad. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$ELP = \frac{3 \cdot Pl \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

Donde:

ELP= Esfuerzo al límite proporcional (kg/cm²) Pl= Carga en el límite proporcional (kg)

L= Luz de la probeta (cm) b= Ancho de la probeta (cm) h= Altura de la probeta (cm)

2.3.2 Fibras

Las fibras se componen de filamentos continuos muy finos y difíciles de manipular individualmente. Estos filamentos se caracterizan por su composición química y por su masa por su unidad de longitud. Se adhiere sobre la estructura, como refuerzo externo, usando el adhesivo epóxico.

La geometría alargada de las fibras permite fabricar, con mayor facilidad, materiales

más resistentes con formato de láminas, donde predomina una dimensión, que elementos con forma macizos, donde predominen las tres dimensiones. Las configuraciones mono direccionales presentan un bajo número de defectos en comparación con los elementos tridimensionales.

| TIPO DE FIBRA | $\sigma_{m\acute{a}x}(N/mm^2)$ | E(N/mm²) | Densidad (t/m³) |
|----------------------|--------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| Vidrio (E-Glass) | 2.000 | 76.000 | 2.60 |
| Vidrio (S-Glass) | 4.750 | 89.000 | 2.49 |
| Carbono (HM-Carbon) | 2.400 | 380.000 | 1.95 |
| Carbono (HS-Carbon) | 4.900 | 230.000 | 1.75 |
| Aramida | 3.000 | 130.000 | 1.45 |
| Basalto | 4.000 | 84.000 | 2.8 |
| Boro | 2.800 | 385.000 | 2.63 |
| Cerámicas | 1.400-2.000 | 180.000-380.000 | 2.6-3.95 |
| Vegetales | 400-1.500 | 5.000-80.000 | 1.25-1.50 |

Tabla 2.1. Características mecánicas de algunas de las fibras empleadas para fabricar materiales compuestos (CNR-DT 20072004; Andre,2006)

Las fibras utilizadas con mayor frecuencia son la de vidrio, carbono y aramida. En la siguiente tabla se indica la resistencia a tracción y módulo de elasticidad de fibras empleadas en la fabricación de materiales compuestos. Además de las utilizadas más frecuentemente, se indican las características de la fibra de basalto, las fibras cerámicas, que se utilizan en materiales sometidos a altas temperaturas, y las fibras vegetales. Con la fibra de vidrio se consiguen materiales compuestos de medio-alto rendimiento. Estas fibras tienen un módulo de elasticidad más bajo que las de carbono y que las de aramida, y su resistencia a la abrasión y a la fatiga son relativamente bajas. Para mejorar la adherencia entre las fibras y la matriz, y para proteger las fibras de agentes alcalinos y de la humedad, se someten a un tratamiento de encolado que también mejora la durabilidad y el comportamiento a la fatiga del material compuesto. En la siguiente figura se observa el comportamiento que presenta la fibra solicitada a tracción, que es lineal prácticamente hasta la ruptura, hipótesis que se asume en el modelo teórico.

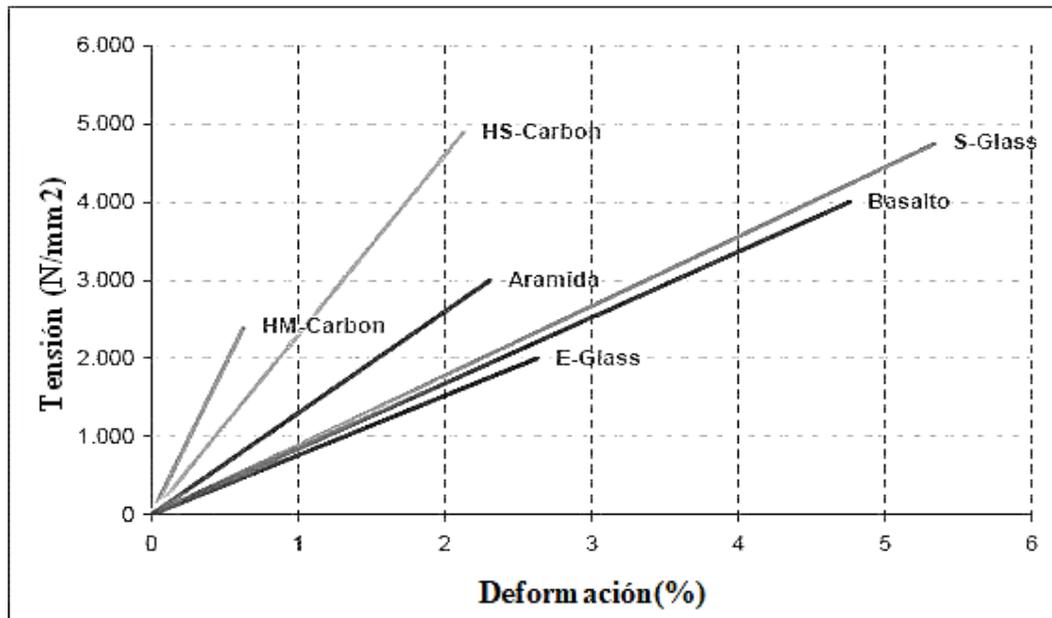


Figura 2.15. Diagrama tensión-deformación de varias fibras utilizadas en la fabricación de materiales compuestos. Fuente: Escuela politécnica superior de edificación.

2.5.2.1. Tela de fibra de carbono

Se adhiere sobre la estructura, como refuerzo externo, usando el adhesivo epóxico.

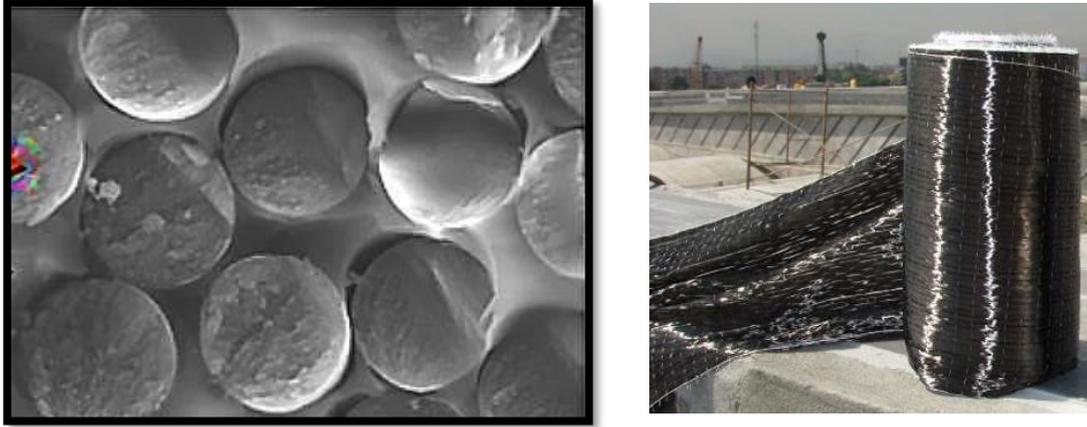
Las fibras de carbono se producen a partir de un componente básico conocido como PAN (poliacrilonitrilo). Según el tipo de tratamiento recibido fibra básica, que incluye carbonización, oxidación y grafitización, es posible fabricar fibras de carbono en varias configuraciones de resistencia y módulo elástico (fibra tipo I y tipo II). Algunos son más resistentes que el acero. Su color natural es negro.

El polímero reforzado con fibra de carbono, o más específicamente polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP), es el material que se ha utilizado como alternativa para reforzar piezas estructurales, mostrándose muy prometedora en el desempeño de esta función, además de una excelente resistencia a la corrosión.

Las características mecánicas de la fibra de carbono no se alteran ante la presencia de humedad, disolventes, ácidos o bases, agentes atmosféricos, etc. permitiendo un contacto directo con el hormigón durante largos periodos de tiempo.

Se caracterizan por una combinación de bajo peso gran durabilidad, fácil de asumir

Formas complejas, alta resistencia y gran rigidez. Tienen un gramaje de 200 a 800 g/m³ con anchos entre 30 y 60 cm, en rollos de 40 a 100m de longitud.



*Figura 2.16. Izq. Vista microscópica. Der; tejido de fibra de carbono
Fuente: www.materialesdeconstruccion.com*

Por su forma de tejido en forma de malla, una pequeña pieza puede soportar el impacto de varias toneladas de carga y deformarse mínimamente, ya que las fuerzas se distribuyen y son amortiguadas por las fibras. Según Hull (1995) la alta resistencia a la tracción y el alto módulo de la elasticidad se debe al paralelismo entre los ejes de la fibra

El alto módulo de elasticidad y la alta resistencia de las fibras de carbono son debido a la orientación de los planos de grafito y también a los enlaces covalentes (enlaces fuertes) entre átomos.

2.5.2.2. Pletinas de carbono

Son una combinación de fibras de carbono y una matriz de resina epóxica que tienen en dirección de la fibra una resistencia, rigidez muy alta y a la fatiga mejor que la del acero, y su densidad es muy baja. No presentan rama plástica en el diagrama esfuerzo deformación, por lo que se consideran materiales perfectamente elásticos hasta la rotura. Se presentan en rollos de longitud entre 100 y 500 m que luego se corta en obra a las dimensiones deseadas.



FIGURA 2.17.: Platinas de carbono
Fuente: www.sika.com

Existen tres tipos de platinas que se diferencian por su módulo de elasticidad, estas son: el tipo H con un módulo $E_f=3000000 \text{ kg/cm}^2$; el tipo M con un $E_f=2100000 \text{ kg/cm}^2$ y el tipo S con un $E_f=1650000 \text{ kg/cm}^2$. La resistencia a tracción son 13000 kg/cm^2 para el tipo H; 24000 kg/cm^2 para el tipo M, y 28000 kg/cm^2 para el tipo S. Las platinas tipo S y tipo M se utilizan para el reforzamiento de elementos de hormigón mientras que la platina tipo H se emplea en el reforzo de elementos de madera.

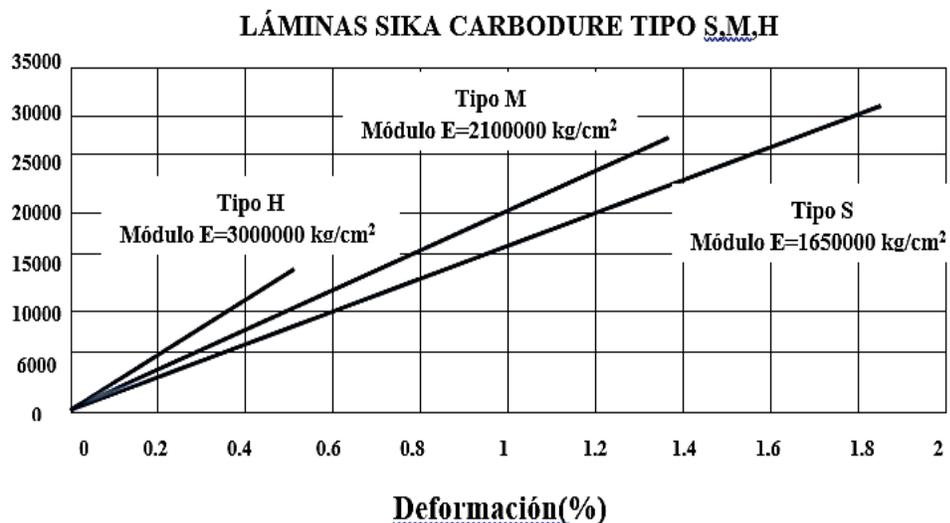


Figura 2.18: Curvas Esfuerzo Deformación de láminas de fibra.
Fuente: Escuela Politécnica del ejército.

| TIPO Sika Carbodur S | ANCHO | ESPESOR | ÁREA TRANSVERSAL |
|---------------------------------|--------------|----------------|-----------------------------|
| 512 | 50 mm | 1.2 mm | 60 mm ² |
| 514 | 50 mm | 1.4 mm | 70mm ² |
| 614 | 60 mm | 1.4 mm | 84 mm ² |
| 626 | 60 mm | 2.6 mm | 156 mm ² |
| 812 | 80 mm | 1.2 mm | 96 mm ² |
| 814 | 80 mm | 1.4 mm | 112 mm ² |
| 914 | 90 mm | 1.4 mm | 126 mm ² |
| 1012 | 100 mm | 1.2 mm | 120 mm ² |
| 1014 | 100 mm | 1.4 mm | 140 mm ² |
| 1214 | 120 mm | 1.4 mm | 168 mm ² |
| 1512 | 150 mm | 1.2 mm | 180 mm ² |

Tabla 2.2: Dimensiones comerciales
Fuente: Manual técnico. <http://www.sika.com.ec>

2.5.2.2.1. Características y composición del FRP empleados

Las características mecánicas del tejido son las que se indican en la tabla.

| CARACTERÍSTICAS | FC S512 |
|----------------------------------------------|----------------|
| Espesor (mm) | 1.2 |
| Módulo de elasticidad (kg/cm ²) | > 1682531.75 |
| Resistencia a tracción (kg/cm ²) | > 21210.1 |
| Resistencia a rotura (kg/cm ²) | > 31101.34 |

Tabla 2.3: Características mecánicas de la fibra.
Fuente: Manual técnico. <http://www.sika.com.ec>

El adhesivo recomendado como pegamento para adherir el tipo de fibra fue Sikadur 30

| CARACTERÍSTICAS | Sikadur 30 |
|------------------------------------------------|-------------------|
| Espesor (mm) | 0.5 - 2 |
| Módulo de elasticidad (kg/cm ²) | 130480 |
| Resistencia a tracción (kg/cm ²) | 300 |
| Resistencia a compresión (kg/cm ²) | 950 |

Tabla 2.4: Características mecánicas de la matriz
Fuente: Manual técnico. <http://www.sika.com.ec>

2.3.3. Adhesivo o resina epoxi:

La matriz se forma a base de resinas. Las más utilizadas en fabricación de materiales compuestos son las resinas termoestables. Éstas tienen ventajas, como la baja viscosidad, que facilita la impregnación adecuada de las fibras, las buenas propiedades adhesivas, la alta resistencia a los agentes químicos y ausencia de temperatura de fusión. Los principales inconvenientes de este tipo de resinas aparecen cuando son aplicadas “in-situ”, es decir, cuando se encuentran en estado líquido-viscoso, ya que son sensibles a la humedad y el rango de temperaturas a las que son trabajables es limitado. Las resinas termoestables más utilizadas en el campo de la construcción son los epoxis y, con menor frecuencia, las vinílicas y de poliéster.

Las resinas epoxi se caracterizan por su buena resistencia a la humedad y a los agentes químicos, además de poseer unas excelentes propiedades adhesivas. La temperatura máxima a la que pueden ser aplicadas depende de su composición. En general, a partir de 60° C hay que tener en cuenta la variación de sus propiedades mecánicas. Normalmente no hay limitaciones significativas en cuanto a la temperatura mínima de aplicación.

Las resinas de poliéster tienen una viscosidad más baja que los epoxis, son muy versátiles y altamente reactivas. Sus resistencias mecánicas y sus propiedades adhesivas son normalmente más bajas que las de las resinas epoxi.

Para condiciones de altas temperaturas y ambientes agresivos químicamente se utilizan resinas vinílicas. Éstas presentan unas propiedades intermedias entre las resinas de poliéster y los epoxis.

Debido a las limitaciones que presentan las resinas termoestables, tales como su poca dureza, limitaciones en la trabajabilidad a ciertas temperaturas y la tendencia a absorber humedad ambiental, han sido desarrolladas recientemente los compuestos fabricados con matrices de resinas termoplásticas. En general, las matrices termoplásticas son más duras que las termoestables y son trabajables a temperaturas más altas. En la tabla 2.5 se muestran algunas de las características mecánicas de las resinas más utilizadas en el campo de los materiales compuestos.

| RESINAS | E (GPa) | σ máx. (N/mm²) | Densidad (t/m³) |
|----------------------------------|--------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Termoestables | | | |
| Epoxi | 2-5 | 35-100 | 1.1-1.4 |
| Poliéster | 2-4.5 | 40-90 | 2-4.5 |
| Vinílicas | 3 | 70 | 1.2 |
| Termoplásticas | | | |
| Polipropileno | 1-1.4 | 20-40 | 0.9 |
| Poliéster éter cetona | 3.6 | 170 | 1.3 |
| Poliamida | 1.4-2.8 | 60-70 | 1.14 |

*Tabla 2.5: Características de algunas resinas empleadas para materiales compuestos.
Fuente: Escuela Politécnica del ejército.*

2.4. Modelo analítico

Los procedimientos analíticos seguidos por los distintos autores, para predecir la capacidad de carga de los elementos reforzados, son básicamente dos: Cálculo del momento último, estableciendo el equilibrio de la sección mediante un análisis no lineal, y método de la sección transformada mediante un análisis lineal.

2.4.1 Introducción

El desarrollo de un modelo de cálculo para el caso de probetas de madera reforzado con fibras es importante para el uso correcto y seguro del material en refuerzo y recuperación de estructuras. También permite ampliar su uso en construcción civil.

Para comprobar el estado límite de uso en las probetas reforzadas, los desplazamientos verticales se determinaron a partir de la rigidez a la flexión evaluada según un modelo elástico lineal de cálculo (método de sección transformada).

Para determinar el momento flector último se utilizó un modelo teórico de Arguelles que considera el comportamiento elastoplástico de la madera requerida a compresión, y comportamiento elasto-frágil para madera traccionada y fibra de refuerzo.

En la evaluación de la resistencia respecto al esfuerzo cortante, se despreciará el aporte

de la fibra, considerando la pieza de madera como responsable de la absorción total de este esfuerzo.

2.4.2. Análisis de la rigidez a la flexión de las probetas

El siguiente es un modelo teórico para calcular la rigidez de madera reforzada con fibra mediante el método de sección transformada.

2.4.2.1. Método de la sección transformada

Es un modelo elástico lineal para la determinación de la rigidez teórica de probetas de madera reforzado con fibra formada para evaluar probetas con sección rectangular ($b \times h$). Las probetas de madera, sin refuerzo, tienen un momento de inercia (I) igual a:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

Las probetas reforzadas se analizarán según la teoría clásica de flexión, que considera el alargamiento y acortamiento de las fibras longitudinales proporcionales sus distancias del eje neutro, considerando el material en régimen elástico lineal, por lo que no se considera el tramo plástico de la madera a compresión.

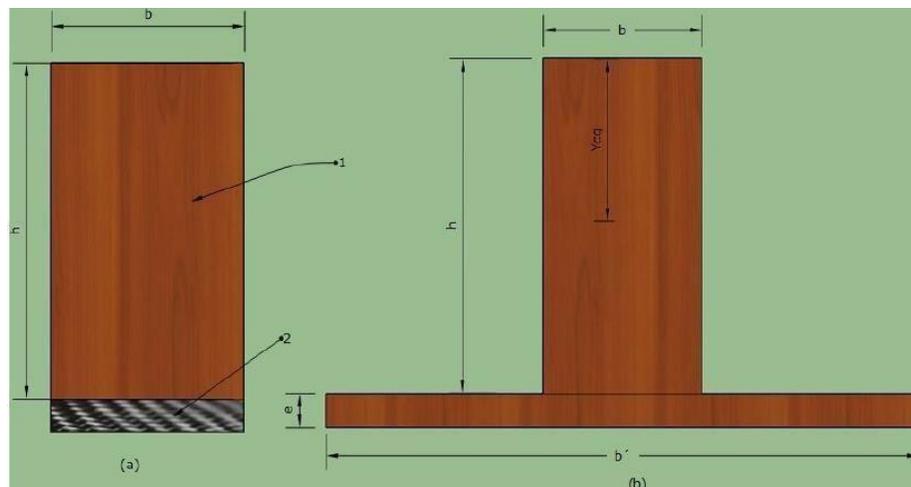


Figura 2.23: (a) Probeta constituida por dos materiales diferentes; (b) Sección equivalente Fuente: Revista investigación de materiales.

Para este tipo de probeta, que consta de dos materiales diferentes, simplemente se debe determinar la sección transversal equivalente de la probeta idealizada que consta de solo uno de los materiales. La sección rectangular que se muestra en la Figura (a), que consta de madera (material 1) y fibra (material 2) ilustra este modelo. Para el refuerzo de fibra será establecida un ancho igual al de la probeta de madera y espesor “e”.

Considerando a la sección transversal equivalente el cual se muestra en la Figura (b), formado únicamente por el material 1 (madera). El ancho b' está determinado por el producto de la relación de los módulos de elasticidad de madera (E_1) y fibra (E_2) por ancho b .

$$b' = b * \frac{E_2}{E_1}$$

Para la sección equivalente, se determinó la posición del centro de gravedad de la pieza (Y_{cg}), dimensionada en relación con el borde inferior de la probeta de madera.

$$Y_{cg} = \frac{(b \cdot h) \left(\frac{h}{2} + e\right) + \left(b \cdot \frac{E_2}{E_1} \cdot e\right) \left(\frac{e}{2}\right)}{(b \cdot h) + \left(b \cdot \frac{E_2}{E_1} \cdot e\right)}$$

El valor del momento de inercia para la sección equivalente de la probeta reforzada (I_r) está dado por:

$$I_r = \frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot h \cdot \left[\left(e + \frac{h}{2} \right) - Y_{cg} \right]^2 + \frac{b \cdot E_2 \cdot e^3}{E_1 \cdot 12} + \frac{b \cdot E_2 \cdot e}{E_1} \cdot \left(Y_{cg} - \frac{e}{2} \right)^2$$

2.4.2.1.1 Análisis de la eficiencia del refuerzo

El aumento de rigidez a la flexión de las probetas reforzadas, en comparación con las probetas sin refuerzo, se determinará a través de la relación entre los momentos de inercia:

$$\frac{I_r}{I} = \frac{\frac{h^3}{12} + h \cdot \left[\left(e + \frac{h}{2} \right) - Y_{cg} \right]^2 + \frac{E_2 \cdot e^3}{E_1 \cdot 12} + \frac{E_2 \cdot e}{E_1} \cdot \left(Y_{cg} - \frac{e}{2} \right)^2}{\frac{h^3}{12}}$$

2.4.2.2. Cálculo de rigidez

La rigidez experimental está determinada por la siguiente ecuación, que toma en cuenta la longitud de probeta, carga y deformación obtenida experimentalmente.

$$EI = \frac{P * L^3}{48 * \Delta}$$

2.4.3. Análisis teórico del momento flector último (sin refuerzo)

Considerando el material elástico-lineal, el momento resistente de la probeta sin refuerzo viene dado por:

$$M_u = f_b * Z_i$$

Donde:

M_u = Último momento resistido por la probeta f_b = Resistencia de la madera a la flexión

Z_i = Módulo de resistencia de la sección transversal transformada

Considerando que la carga consiste en una fuerza concentrada en él a través del tramo de la probeta, la fuerza máxima resistida por la probeta se puede determinar mediante:

$$M_u = \frac{P * L}{4}$$

Despejando la carga de la probeta sin refuerzo tenemos:

$$P = \frac{4 * M_u}{L}$$

2.4.3.1. Análisis de la deflexión para probetas sin refuerzo

El desplazamiento vertical máximo en el medio del tramo se determina a partir de la

rigidez a la flexión.

Donde:

L = longitud del tramo P = Fuerza máxima

$$\delta = \frac{P * L^3}{48EI}$$

2.4.4 Análisis del momento flector ultimo (con refuerzo)

Este modelo teórico experimental de cálculo se basa en el estudio del método desarrollado por Arguelles. El autor se basa por el método de dimensionamiento, considerando que conduce a resultados superiores a los determinados experimentalmente. De esta forma desarrolla un modelo teórico más preciso, considerando la compatibilidad de deformaciones entre los diferentes elementos que componen la sección y con un comportamiento elasto-plástico para la madera solicitada a la compresión, y comportamiento elasto-frágil para la madera traccionada y para la fibra de refuerzo.

Para establecer el equilibrio de la sección (análisis no lineal) y calcular el momento último que puede soportar una probeta con refuerzo, se admiten las siguientes hipótesis:

- Las secciones se mantienen planas después de la deformación (Bernoulli Navier).
- Principio de compatibilidad de las deformaciones.
- Perfecta unión entre la madera y el refuerzo.
- Comportamiento elástico lineal de la madera a tracción, y elasto-plástico a compresión.
- Comportamiento elástico lineal del refuerzo a tracción.

Para utilizar el modelo analítico se considera que el fallo se alcanza cuando la madera experimenta la deformación última a tracción o a compresión. Cuando el fallo se produce porque las fibras traccionadas de la sección alcanzan la deformación última, se pueden dar dos casos: que las fibras superiores comprimidas no hayan llegado a plastificarse (modo 1), o que en el momento del fallo a tracción ya se haya producido la

plastificación de parte de las fibras comprimidas (modo 2). El otro modo de fallo que se considera cuando las fibras comprimidas alcanzan la deformación última y el fallo se produce precisamente en dicha zona (modo 3).

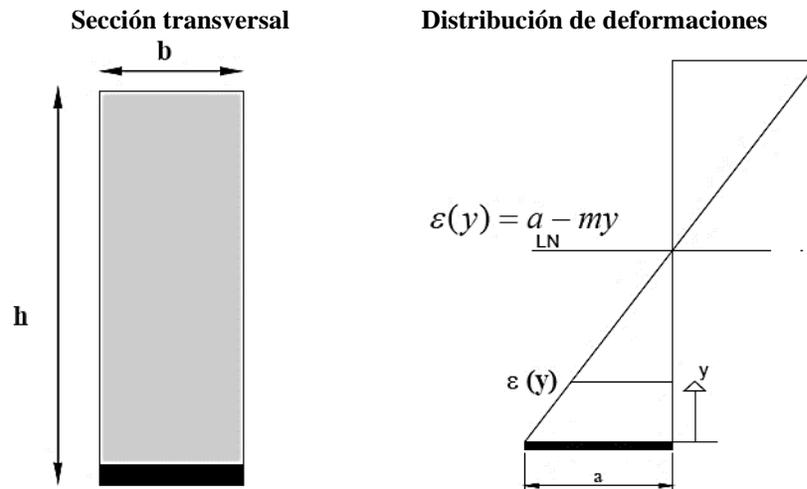


Figura 2.27 : Diagrama de deformación en la sección transversal
Fuente: Juliano Arguelles.Revista investigación de materiales

El valor del estado límite de compresión se estipuló hasta el punto que el cuerpo de prueba pueda absorber esfuerzos. Este valor se tomó de bibliografía de estudios realizados como prueba de compresión paralela a las fibras.

Para la madera traccionada y para el refuerzo de fibra se considera un comportamiento elasto-frágil, asumiendo que la deformación específica máxima de la madera es lo mismo que la fibra. Entonces, la relación entre la tensión máxima que actúa sobre la fibra y la tensión máxima que actúa sobre la madera es igual a la relación entre los módulos de elasticidad del fibra y madera. Como esta relación es siempre mucho menor a la relación observada para la resistencia a la tracción de la fibra y la madera, se puede concluir que la ruptura por tracción siempre ocurrirá en la madera.

Las siguientes son las deducciones de las expresiones para evaluar el momento flector último, considerando los estados de compresión y tracción en la madera.

Obviamente, el último momento flector debe evaluarse mediante la expresión que proporcione el menor valor.

Para ambas evaluaciones (ruptura por compresión o tracción), se hace las siguientes consideraciones:

- a) Para $\varepsilon_1 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_2$, el esfuerzo de compresión sobre la madera es igual a:

$$\sigma_c = f_{c0}$$

- b) La deformación en la fibra es igual a la deformación máxima por tracción en la madera, despreciando la variación en la deformación a lo largo del espesor de la fibra.

Se han establecido las siguientes denominaciones:

C1 y C2 = Fuerzas de compresión resultantes en la madera;

TM = Fuerza de tracción resultante en la madera

TF = Fuerza de tracción en la fibra

h = altura de la probeta

e = espesor de la fibra

f_{c0} = resistencia a la compresión paralela a las fibras de madera

f_{t0} = resistencia a la tracción paralela a las fibras de madera

E_c = módulo de elasticidad para la compresión paralela de la madera

E_t = módulo de elasticidad de tracción en paralelo de madera

E_f = módulo de elasticidad de tracción de fibra.

$$s = \frac{f_{c0}}{E_c \cdot m}$$

$$p = \frac{f_{t0}}{E_t \cdot m}$$

2.4.4.1 Modo de ruptura: compresión

El estado límite último en compresión se considera alcanzado cuando la máxima deformación en la parte comprimida alcanza el valor ϵ_2 . Basado en las relaciones establecidas entre tensiones y deformaciones, la siguiente Figura muestra la distribución de tensiones cuando esta alcanza el límite, así como las fuerzas resultantes de estas tensiones y sus posiciones:

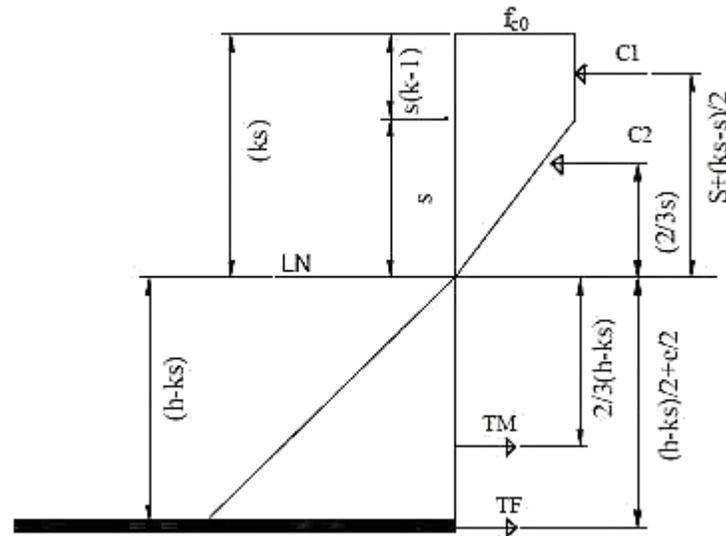


Figura 2.27 : Distribución de tensiones en la sección transversal (falla por compresión)

Fuente: Juliano Arguelles. Revista investigación de materiales

Los valores de las fuerzas resultantes de la compresión y la tracción es igual a:

$$C_1 = f_{c0} \cdot b \cdot s \cdot (k - 1)$$

$$C_2 = f_{c0} \cdot \frac{b \cdot s}{2}$$

$$T_m = \frac{b}{2} (h - ks) \cdot E_t \cdot \left(m \cdot h - \frac{k \cdot f_{c0}}{E_c} \right)$$

$$T_f = b \cdot e \cdot E_f \cdot \left(m \cdot h - \frac{k \cdot f_{c0}}{E_c} \right)$$

A partir de la condición de equilibrio de fuerzas horizontales, reemplazando los valores

de "s" en las ecuaciones mostradas y reordenando los términos, obtenemos:

$$\begin{aligned} \sum F=0 \\ m^2 \cdot (h^2 E_t E_c^2 + 2E_f E_c^2 e h) + m(-2h E_t k f E_c - 2E_c e E_f k f_{c0}) + (k^2 E_t f_{c0}^2 \\ - 2E_c f_{c0}^2 (k - 1) - (E_c f_{c0}^2)) = 0 \end{aligned}$$

Después de determinar "m", utilizando la siguiente ecuación, se puede evaluar el valor del momento resistente, a partir de la sumatoria de los momentos de las fuerzas resultantes.

$$\begin{aligned} \sum M=0 \\ M_c = \left[b \cdot \frac{f_{c0}^2}{E_c \cdot m} (k - 1) \right] \cdot \left[\frac{f_{c0}}{E_c \cdot m} \left(\frac{f_{c0}}{2 \cdot E_c \cdot m} \cdot (k - 1) \right) \right] + \left[\left(\frac{f_{c0}^2 \cdot b}{2 E_c \cdot m} \right) \cdot \left(\frac{2 \cdot f_{c0}}{3 \cdot E_c \cdot m} \right) \right] \\ + \left[\frac{b}{2} \left(h - \frac{k \cdot f_{c0}}{E_c \cdot m} \right) \right] \cdot \left[\frac{2}{3} \cdot E_t \left(m h - \frac{k \cdot f_{c0}}{E_c} \right) \left(h - \frac{k \cdot f_{c0}}{E_c \cdot m} \right) \right] \\ + \left[b \cdot e \cdot E_f \left(m h - \frac{k \cdot f_{c0}}{E_c} \right) \left(h + \frac{e}{2} - \frac{k \cdot f_{c0}}{E_c \cdot m} \right) \right] \end{aligned}$$

2.4.4.2. Modo de frenado: tracción

Se considera alcanzado el estado límite de tracción en la madera, cuando el máximo tensión de tracción que actúa sobre la madera es igual a su resistencia a la tracción. A partir de las relaciones establecidas entre tensiones y deformaciones, la siguiente Figura presenta la distribución de esfuerzos cuando se alcanza este estado límite, así como las fuerzas resultantes de estas tensiones y sus posiciones. Por debajo de la línea neutra, la región estirada de la madera se considera con distribución lineal de esfuerzos, actuando en conjunto con la fuerza resultante del material de refuerzo.

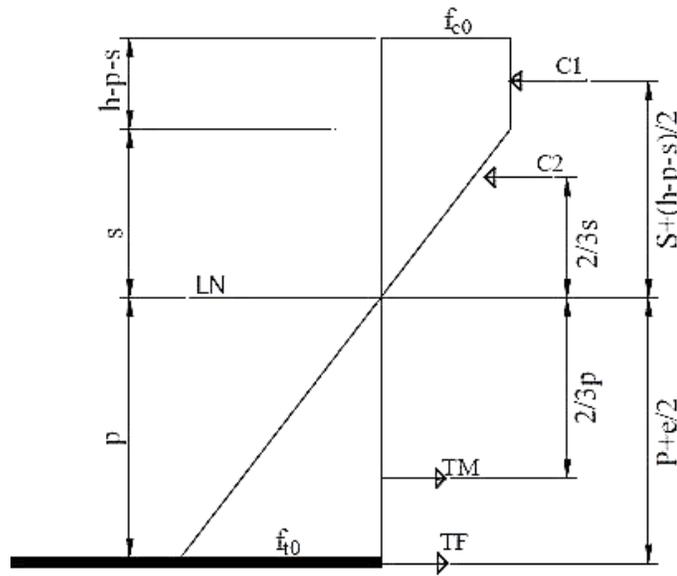


FIGURA 2.28 : Distribución de tensiones en la sección transversal (rotura por tracción en la madera)

Fuente: Juliano Arguelles. Revista investigación de materiales

Los valores de las fuerzas resultantes de la compresión y la tracción es igual a:

$$C_1 = f_{c0} \cdot b \cdot (h - s - p)$$

$$C_2 = f_{c0} \cdot \frac{b \cdot s}{2}$$

$$T_m = f_{t0} \cdot \frac{b}{2} \cdot \left(\frac{f_{t0}}{E_t \cdot m} \right)$$

$$T_f = b \cdot e \cdot E_f \cdot \left(\frac{f_{t0}}{E_t} \right)$$

De la condición de equilibrio de fuerzas horizontales, reemplazando los valores de "s" y "p" en la ecuación las ecuaciones anteriores y reordenando los términos, obtenemos:

$$\sum F = 0$$

$$m = \frac{f_{t0}^2 \cdot E_c + 2 \cdot E_t \cdot f_{c0}^2 + 2 \cdot E_c \cdot f_{c0} \cdot f_{t0} - f_{c0}^2 \cdot E_t}{2 \cdot f_{c0} \cdot h \cdot E_t \cdot E_c - 2 \cdot E_c \cdot e \cdot E_f \cdot f_{t0}}$$

Después de determinar "m", se puede evaluar el valor del momento resistente, a partir de la suma de los momentos de las fuerzas.

$$\Sigma M=0$$

$$M_t = f_{c0} \cdot b \cdot \left[\left(h - \frac{f_{c0}}{E_c \cdot m} - \frac{f_{t0}}{E_t \cdot m} \right) \cdot \left(\frac{f_{c0}}{E_c \cdot m} + \left(\frac{h}{2} - \frac{f_{t0}}{2 \cdot E_t \cdot m} - \frac{f_{c0}}{2 \cdot E_c \cdot m} \right) \right) \right] \\ + \left[\left(\frac{f_{c0}^2 \cdot b}{2 \cdot E_c \cdot m} \right) \cdot \left(\frac{2 \cdot f_{c0}}{3 \cdot E_c \cdot m} \right) \right] + \left[\left(\frac{f_{t0}^2 \cdot b}{2 \cdot E_t \cdot m} \right) \cdot \left(\frac{2 \cdot f_{t0}}{3 \cdot E_t \cdot m} \right) \right] + \left[\left(\frac{b \cdot e \cdot E_f \cdot f_{t0}}{E_t} \right) \cdot \left(\frac{f_{t0}}{E_t \cdot m} - \frac{e}{2} \right) \right]$$

Con el valor del momento último de las probetas reforzadas, es posible determinar la fuerza máxima resistida por la probeta usando la siguiente ecuación:

$$P = \frac{4 * Mu}{L}$$

Donde:

L = longitud del tramo P = Fuerza máxima

Mu = Último momento de probetas reforzadas

2.4.4.1 Análisis de la deflexión para probetas reforzadas

Para este caso es necesario calcular el módulo de elasticidad utilizando la siguiente ecuación, (Askeland, 1998):

Donde,

$$E = E_m \cdot (1 - V_f) + E_f V_f$$

V_f : fracción volumétrica de las fibras

$$V_f = \frac{E_f \cdot b \cdot l}{h \cdot b \cdot l} = \frac{E_f}{h}$$

Posteriormente calculamos la deflexión máxima para probetas reforzadas con carga puntual en el centro del tramo con la siguiente ecuación:

$$\delta = \frac{P * L^3}{48EI}$$

CAPÍTULO III

MARCO METODOLOGICO

3.1 Introducción

Para el estudio de interés académico sobre comportamiento de probetas con y sin refuerzo de fibras de carbono, además del análisis teórico se realizaron pruebas experimentales.

En este capítulo se mostrará los pasos del procedimiento de la investigación, definiendo de esa manera los materiales a utilizar, el número de probetas, el cómo y dónde se realizará el ensayo para proceder con la parte experimental, de la misma manera se indicará el procedimiento para la obtención de los datos para el análisis teórico. Cabe hacer notar que se adicionaron 17 probetas para las pruebas experimentales de las vigas sin refuerzo y tres probetas para las vigas con refuerzo. Llegándose a tener un total de 20 probetas sin refuerzo y 6 probetas con refuerzo para el estudio.

3.2 Selección de materiales y equipos

3.2.1. Madera y fibra

La creciente demanda de productos maderables, disminución paulatina de algunas especies de importancia económica y la sobreexplotación de las especies más conocidas comercialmente, obliga a buscar cada vez más nuevas especies que puedan ser promocionadas para ingresar al mercado maderero y para ello será necesario realizar y dar a conocer los resultados de los estudios.

La especie de madera que se utilizará es el Aliso, de nombre científico *Alnus Jorullensis* es una de las especies maderables de valor comercial en la ciudad de Tarija, con DMC igual a 35cm que usualmente corresponde al actualmente utilizado en la región de estudio, se trata de árbol maduro comercialmente aprovechable, convirtiéndose en una madera apta para programas de reforestación y fácil de trabajar.

Alcanza los 40 m de altura y un diámetro de 1.2 m, y se seca relativamente bien, llegando a una humedad del 12%. Se clasifica como una madera de resistencia media.

Cuando la madera se encuentra seca se consigue un punto de estabilidad dimensional, es decir, que la sección transversal de la madera no va a sufrir cambios significativos que afecten su resistencia. Se debe tener un buen secado de las lamelas para garantizar una buena unión entre ellas y generar una capa de pega más estable y resistente.

En cuanto a las platinas de fibra de carbono existen varios tipos, pero el que actualmente se comercializa en el país es el S512. El sistema no solamente comprende la fibra de carbono sino también la resina epóxica por lo cual para este tipo de fibra necesitamos el sikadur 30 la cual presenta unas características propias para absorber el mismo tipo de esfuerzo (flexión).

3.2.2. Equipo utilizado en la prueba

Las pruebas se realizaron en la prensa de ensayos universales marca AMSLER cuya precisión es de 0.1 KN, con una capacidad de 40 toneladas que se encuentra en el laboratorio de Tecnología de la madera de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales, maquina universal de ensayos provista con todos los accesorios necesarios para regular la velocidad de ensayo con una velocidad de 2.5mm/min.

3.2.3. Instrumentación de probetas

En las pruebas de flexión de las probetas reforzadas se midieron los desplazamientos verticales en el medio del tramo (flechas), mediante un deflectómetro 0,01 mm en el centro de la probeta de la cara inferior.



*Figura 3.2: Deflectómetro y Medición de la fuerza resistente en la escala de la prensa Universal.
Fuente: Elaboración propia.*

Para determinar el contenido de humedad de las piezas que componen cada probeta se utiliza el xilohigrómetro medidor de humedad de madera o dispositivo digital electrónico marca Wagner que funciona bajo el principio de resistencia eléctrica. Este dispositivo es utilizado industrialmente para tomar mediciones en serie antes de procesar la madera.



*Figura 3.3: Medición de la humedad con xilohigrómetro.
Fuente: Elaboración propia.*

3.2.4. Método de ensayo

El método de ensayo para determinar las propiedades de flexión, consistió en someter a cada probeta a un momento flector mientras se sostiene cerca de sus extremos en apoyos llamados reacciones y se le aplica una carga transversal impuesta en el centro de la luz hasta llegar a la ruptura. La probeta se deforma a una velocidad constante, y se toman mediciones de la deflexión de la probeta en el centro del claro hasta alcanzar la deformación máxima.

3.3 Elaboración de probetas

3.3.1. Preparación de las probetas (Control de humedad)

Se elaborará las probetas a ensayar con dimensiones especificadas según la norma, de las cuales seis probetas se prepararán con fibra de carbono.

Se procederá al sellado de las testas para evitar las rajaduras producidas debido a la rápida pérdida de humedad por los extremos. Cabe hacer notar que los ensayos aplicados son en estado seco al aire (13-18%) aproximado de contenido de humedad,

se tuvo que acondicionar las probetas distanciadas entre ellas, y a 0.5m de altura desde el nivel del suelo durante un tiempo de 2 meses, en la parte detrás del laboratorio de maderas para su secado expuesto a las condiciones ambientales.



Figura 3.4: Sellado de probetas
Fuente: Elaboración propia.

Realizando el pesado de todas las probetas cada 7 días hasta obtener un peso constante, presentando los primeros días de secado al aire libre una rápida pérdida de humedad y en los últimos días el ritmo de secado se tornó mucho más lento, próximamente alcanza una estabilidad hasta el final del estudio. Mencionar que la humedad interna en la madera es variada, siendo en el centro de la probeta mucho mayor que en la superficie de la misma, esto es una característica común en maderas secadas al aire libre, ya que no se somete a las tablas a un proceso de homogeneizado y acondicionado durante la etapa final de secado.



Figura 3.5: Probetas secadas al aire libre
Fuente: Elaboración propia.

Para mantener un adecuado registro de las probetas con las que se realizó el ensayo y poder facilitar la correcta tabulación de los datos se vio por conveniente realizar una codificación de las mismas, de una manera clara y sencilla que nos permite ubicar una determinada probeta en cualquier momento del ensayo y poder luego reemplazar correctamente, si se diera el caso de existir probetas falladas.

El código fue escrito de forma clara y lo suficientemente grande en uno de los costados de la probeta con lápiz indeleble para evitar que se borre.

3.3.2. Normas y métodos

Para el trabajo se utilizará el método de la sección transformada para el cálculo de la rigidez teórica de las muestras de madera reforzada con fibra y el método por Arguelles. para la determinación del momento último estableciendo el equilibrio de la sección. Para el ensayo el ensayo a flexión estática se seguirá la metodología establecida de las Normas Técnicas de la Comisión Panamericana (COPANT) Maderas, la cual se empleó para determinar las propiedades mecánicas de la madera.

Las normas empleadas son:

- COPANT 455 Método de determinación de flexión estática.
- COPANT 460 Método de determinación del contenido de humedad.
- COPANT 461 Método de determinación del peso específico aparente.
- COPANT 30:1-012 Análisis estadístico.
- PAD REFORT 1982 Manual de diseño para maderas del Grupo Andino.

3.3.3. Dimensionamiento de probetas

La norma establece que la muestra debe ser prismática con secciones transversales de 5x5cm cuando la madera de la cual se extraen las probetas proviene de árboles de diámetro mayor a 30cm, la longitud será de 15 veces la altura de la probeta (75cm).

3.4 Determinación analítica

Para la obtención de los primeros datos del desarrollo analítico del proyecto se utilizó como fuente de información un estudio relacionado a las propiedades mecánicas de la madera a utilizar.

Para evaluar la rigidez de las probetas de madera con refuerzo se utilizará el método de sección transformada para las probetas con refuerzo. En cuanto a la determinación del momento último, se desarrollará el método de diseño presentado en la revisión de la literatura (Método de Arguelles) obtenido a partir de la hipótesis de Navier. Este modelo considera la compatibilidad de deformaciones entre los diferentes elementos que componen la sección tomando en cuenta los estados límites últimos de resistencia a tracción y compresión de la madera, con un comportamiento elasto-plástico para la madera solicitada a la compresión, y comportamiento elasto-frágil para la madera traccionada y para la fibra de refuerzo.

3.5 Determinación experimental

Se colocarán cada una de las probetas entre dos soportes cilíndricos con un espaciamiento entre sí (Luz) de 70 cm, luego se aplicará sobre la cara tangencial a los anillos de crecimiento de la probeta una carga externa a través del rodillo metálico cuya fuerza era ejercida directamente en el centro de la probeta. La velocidad de ensayo será regulada de manera que la carga avanzará constantemente a 2.5mm/min.

Se tomarán lecturas de deformación a través del deflectómetro a intervalos constantes de incremento en la carga de 0.5 KN hasta el límite de ruptura de la probeta, momento en el que también se registrará la deflexión y/o deformación con el fin de analizar las cargas máximas de rotura y los desplazamientos, las cuales serán registradas en planillas. En base a estas lecturas se trazará la curva carga- deformación donde se obtendrán los datos necesarios para calcular de forma analítica el esfuerzo al límite proporcional (ELP), módulo de ruptura (MOR) y módulo de elasticidad (MOE) para cada una de las probetas ensayadas, en función a las relaciones matemáticas.

Para determinar el aumento de resistencia proporcionado por el refuerzo de fibra, se probaron probetas de madera con y sin refuerzo.

Una vez terminado el ensayo, se inspeccionará la probeta para identificar el tipo de

falla ya que pueden presentarse diferentes tipos de falla, que en ocasiones son influenciados por defectos del material, por una mala colocación en los apoyos, por la forma como se aplicó la carga; también puede ocurrir que falla el adhesivo, si éste no ha sido aplicado de la forma recomendada por el fabricante o porque no se mezcló en las proporciones de acuerdo al productor, o por falta del curado y secado ideal.

Luego de la zona más cercana de la ruptura se procedió a realizar un corte de una galleta de 2 cm. de espesor de 7 probetas elegidas al azar para introducirlas a la estufa y obtener el contenido de humedad de la madera ensayada pesadas cada 24hr hasta obtener un peso constante.



*Figura 3.6: Prueba a flexión estática en probetas simplemente apoyadas.
Fuente: Elaboración propia.*

3.6. Análisis estadístico

A vista de que no existe un protocolo definido, se lo realizó siguiendo la norma COPANT 30:1-012 para análisis estadístico de muestras de madera, tanto para las probetas sin refuerzo como para las probetas reforzadas, analizando su módulo de elasticidad, módulo de rotura y límite elástico, entre las que destacan la media y desviación, dichas tablas se muestran en el anexo 3.4.

3.7. Contrastación de hipótesis

En esta sección se realizará una comparación de los resultados promedios obtenidos con lo que se esperaba alcanzar una vez reforzada la probeta, de la misma manera sobre las deflexiones obtenidas.

3.8. Análisis y discusión de resultados

Se realizará la presentación comparativa de los resultados obtenidos, tanto por los modelos teóricos como por los cálculos experimentales, para las probetas reforzadas y sin reforzar, realizando un breve análisis de la rigidez, momento de ruptura, deflexión, comportamiento mecánico y modos de fallo.

CAPÍTULO IV

DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Introducción

En este capítulo se aplicará el desarrollo del procedimiento planteado en el capítulo 2 y 3 como ser lo recopilado en el Marco Teórico y lo señalado en el Marco Metodológico.

4.2. Recopilación de datos de los materiales

Los ensayos correspondientes a las propiedades mecánicas son determinados de acuerdo a las estipulaciones establecidas por las normas COPANT MADERAS, obteniendo datos para los respectivos cálculos del ensayo normalizado. Antes de realizar el ensayo se procedió a la medición de las probetas y determinación de su peso (gr). Estos datos son registrados en planillas, así como también los datos correspondientes a carga y deformación.

Las características mecánicas de los materiales compuestos utilizados como refuerzo dependerán fundamentalmente de las propiedades mecánicas tanto de la madera como de la fibra, de la orientación de éstas en el tejido y de su volumen con respecto a la sección total de la sección del FRP. Por otro lado, la aportación de la matriz a la mejora de las características mecánicas del FRP es escasa, siendo su misión la de transmitir esfuerzos entre las fibras y protegerlas de los agentes atmosféricos. Existen otros factores interesantes en el análisis del uso de un tipo de matriz u otra como son los condicionantes económicos y la trabajabilidad del material a la hora de aplicarlo, circunstancia que influye en la dificultad de ejecución y por tanto en el rendimiento de la mano de obra.

4.2.1. Propiedades mecánicas y elásticas de la madera

Los valores de las propiedades mecánicas de la madera maciza aserrada de Aliso utilizadas para la comparación son extraídos de la tesis “Determinación de las

propiedades mecánicas del aliso (*Alnus jorullensis*) del departamento de Tarija” desarrollado por Montañó Quiroz, Miguel Antonio, información disponible en la biblioteca central de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, dicho documento se encuentra impreso en la biblioteca central de a UAJMS.

| TIPO DE ENSAYO | Verde (%) | Seco al aire (%) | ajustado al 12% |
|-------------------------------------------|-----------|------------------|-----------------|
| Contenido de humedad (%) | 125,905 | 12,316 | 12 |
| Compresión Paralela (kg/cm ²) | 97,695 | 215,264 | 214,563 |
| Tracción paralela (kg/cm ²) | 116.986 | 395,485 | 393,567 |
| E (kg/cm ²) | 50592.14 | 62682.65 | 62677 |

Tabla 4.1: Propiedades mecánicas

Fuente: Determinación de las propiedades mecánicas del aliso-Tesis UAJMS

4.2.2. Propiedades de la platina de fibra de carbono

La información de las propiedades mecánicas de la fibra se la obtuvo de la ficha técnica del producto, entre las más importantes el módulo de elasticidad 170000 N/mm² y la resistencia de tracción 3100 N/mm².

| | |
|-----------------------------------------------------|---------------------------|
| CONTENIDO DE FIBRA EN VOLUMEN > 68 % | |
| RESISTENCIA A TRACCIÓN DEL LAMINADO | (EN 2561) |
| Valor Medio | 3 100 N/mm ² |
| Valor Fractil 5% | 2 900 N/mm ² |
| Valores en la dirección longitudinal de las fibras. | |
| MÓDULO DE ELASTICIDAD A TRACCIÓN DEL LAMINADO | (EN 2561) |
| Valor Medio | 170 000 N/mm ² |
| Valor Fractil 5% | 165 000 N/mm ² |
| Valores en la dirección longitudinal de las fibras. | |
| ELONGACIÓN A ROTURA DEL LAMINADO | |
| TEMPERATURA DE TRANSICIÓN VITREA | (EN 2561) |
| Valor Medio | 1.80 % |
| Valores en la dirección longitudinal de las fibras. | |
| TEMPERATURA DE TRANSICIÓN VITREA | >100 °C |
| APLICACIÓN | |
| CONSUMO | |

Figura 4.1: Propiedades mecánicas/físicas.

Fuente: Manual técnico. [Http://www.sika.com](http://www.sika.com)

4.2.3. Propiedades físicas de las probetas

Son aquellas que determinan su comportamiento ante los distintos factores que intervienen en el medio ambiente normal, sin producir ninguna modificación química o mecánica de su estructura (Pérez Ortega, 2014). Las probetas de madera a ensayar fueron extraídas de la misma pieza, para obtener probetas con menor variabilidad de propiedades.

4.2.3.1 Humedad

Teniendo en cuenta que la madera pierde rigidez y resistencia al aumentar el contenido de humedad, es necesario realizar esta medición de cada madera antes de realizar el ensayo de flexión. Se verificó el contenido de humedad superficial de las probetas con el xilohigrómetro identificando que todas se encuentran por debajo del 18%, por lo tanto, son aptas para aplicar las pruebas correspondientes. Posterior a la rotura de la pieza, se extrajo una muestra de la zona próxima a la falla, obteniendo seis muestras de seis probetas elegidas al azar de 2cm de espesor para determinar la humedad con la fórmula, sometiéndola a la estufa a 103 ± 2 , y determinando su peso cada 24hr hasta obtener un peso constante.



*Figura 4.2: Proceso del pesado de las probetas reforzadas.
Fuente: Elaboración propia.*



Figura 4.3: Galletas extraídas de las probetas, colocadas en estufa.
Fuente: Elaboración propia

| Pesos de las galletas (gr) | | | | |
|-----------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| N° probeta | 24hr | 24hr | 24hr | 24hr |
| 6,00 | 30,42 | 27,43 | 27,28 | 27,28 |
| 8,00 | 31,50 | 28,42 | 28,38 | 28,37 |
| 9,00 | 34,71 | 31,24 | 30,25 | 30,13 |
| 15,00 | 33,67 | 30,45 | 30,20 | 31,20 |
| 12,00 | 35,02 | 32,65 | 31,41 | 31,41 |
| 7,00 | 35,75 | 32,09 | 31,40 | 31,35 |
| 13,00 | 39,97 | 36,86 | 35,64 | 35,64 |

Tabla 4.2: Pesos de las galletas
Fuente: Elaboración propia

| Cont. de humedad de las galletas (%) | | | |
|---------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| N° | CH1(%) | CH2(%) | CH3(%) |
| 6,00 | 10,90 | 11,51 | 11,51 |
| 8,00 | 10,84 | 10,99 | 11,03 |
| 9,00 | 11,11 | 14,74 | 15,20 |
| 15,00 | 10,57 | 11,49 | 7,92 |
| 12,00 | 7,26 | 11,49 | 11,49 |
| 7,00 | 11,41 | 13,85 | 14,04 |
| 13,00 | 8,44 | 12,15 | 12,15 |
| Media | 10,92 | 12,01 | 12,02 |
| Desv. | 1,58 | 1,42 | 2,33 |

Tabla 4.3: Contenido de humedad de las galletas
Fuente: Elaboración propia

4.2.3.2. Densidad

La densidad de la madera se determinó, según lo establecido en la norma COPANT 461 madera en seco en ambiente normalizado para todas las probetas. En la realización de éste se utilizó una balanza de 0.01 gr de precisión.

$$Pe = \frac{1320.52}{5 * 5.4 * 75}$$

$$Pe = 0.6521 \frac{kg}{cm^3}$$

| Pesos de las probetas de madera (gr) | | | | | |
|--------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Nº | P(gr) | 7dias | 7dias | 7dias | 7dias |
| 1,00 | 1332,50 | 1329,54 | 1324,69 | 1321,00 | 1320,87 |
| 2,00 | 1275,34 | 1266,19 | 1263,65 | 1262,90 | 1262,18 |
| 3,00 | 1292,36 | 1286,69 | 1281,69 | 1276,36 | 1276,00 |
| 4,00 | 1317,62 | 1247,60 | 1242,60 | 1295,36 | 1294,65 |
| 5,00 | 1315,69 | 1309,69 | 1304,65 | 1299,64 | 1299,45 |
| 6,00 | 1334,64 | 1328,64 | 1323,69 | 1317,65 | 1312,65 |
| 7,00 | 1297,64 | 1293,64 | 1284,64 | 1278,64 | 1273,12 |
| 8,00 | 1236,10 | 1230,12 | 1226,14 | 1220,97 | 1219,85 |
| 9,00 | 1243,98 | 1244,99 | 1241,94 | 1240,11 | 1239,71 |
| 10,00 | 1201,12 | 1190,65 | 1184,54 | 1180,54 | 1180,54 |
| 11,00 | 1090,30 | 1084,95 | 1085,12 | 1081,51 | 1081,40 |
| 12,00 | 1274,69 | 1265,54 | 1260,69 | 1254,12 | 1254,11 |
| 13,00 | 1268,69 | 1262,64 | 1256,64 | 1252,64 | 1247,91 |
| 14,00 | 125,46 | 1246,95 | 1241,95 | 1236,94 | 1231,64 |
| 15,00 | 1076,68 | 1151,12 | 1141,36 | 1139,50 | 1139,50 |
| 16,00 | 1065,98 | 1054,98 | 1056,10 | 1052,94 | 1052,94 |
| 17,00 | 1134,12 | 1126,11 | 1125,56 | 1123,64 | 1123,54 |
| 18,00 | 1154,61 | 1149,67 | 1143,94 | 1138,31 | 1132,69 |
| 19,00 | 1156,75 | 1151,12 | 1144,33 | 1144,46 | 1139,65 |
| 20,00 | 1186,65 | 1181,19 | 1177,64 | 1171,41 | 1172,65 |
| 21,00 | 1239,51 | 1226,68 | 1216,10 | 1212,69 | 1212,69 |
| 22,00 | 1253,64 | 1249,87 | 1245,64 | 1240,90 | 1236,40 |
| 23,00 | 1142,98 | 1143,99 | 1140,94 | 1139,11 | 1138,71 |
| 24,00 | 1260,31 | 1255,64 | 1250,84 | 1246,65 | 1241,31 |
| 25,00 | 1245,69 | 1240,69 | 1235,49 | 1230,65 | 1230,65 |
| 26,00 | 1202,07 | 1191,60 | 1185,49 | 1181,49 | 1181,49 |

Tabla 4.4: Pesos de las probetas cada 7 días.

| Dimensiones de las probetas (cm) | | | | | Densidad (gr/cm ³) |
|----------------------------------|-------|-------|-------|---------------------|-----------------------------------|
| N° | L(cm) | a(cm) | b(cm) | V(cm ³) | |
| 1,00 | 70,00 | 5,00 | 5,40 | 1890,00 | 0,67 |
| 2,00 | 70,00 | 4,70 | 5,20 | 1710,80 | 0,74 |
| 3,00 | 70,00 | 4,80 | 5,20 | 1747,20 | 0,73 |
| 4,00 | 76,00 | 5,00 | 5,10 | 1938,00 | 0,67 |
| 5,00 | 76,00 | 5,10 | 5,00 | 1938,00 | 0,67 |
| 6,00 | 76,40 | 5,00 | 5,10 | 1948,20 | 0,67 |
| 7,00 | 75,40 | 5,00 | 4,90 | 1847,30 | 0,69 |
| 8,00 | 77,50 | 5,00 | 5,10 | 1976,25 | 0,62 |
| 9,00 | 76,70 | 5,10 | 4,90 | 1916,73 | 0,65 |
| 10,00 | 75,30 | 5,10 | 5,10 | 1958,55 | 0,62 |
| 11,00 | 75,40 | 4,80 | 5,00 | 1809,60 | 0,56 |
| 12,00 | 75,30 | 5,00 | 5,10 | 1920,15 | 0,65 |
| 13,00 | 75,60 | 5,10 | 5,10 | 1966,36 | 0,65 |
| 14,00 | 75,60 | 5,00 | 5,10 | 1927,80 | 0,64 |
| 15,00 | 75,40 | 4,90 | 5,00 | 1847,30 | 0,59 |
| 16,00 | 75,10 | 5,00 | 5,10 | 1915,05 | 0,55 |
| 17,00 | 73,00 | 5,10 | 4,90 | 1824,27 | 0,59 |
| 18,00 | 76,30 | 5,00 | 5,10 | 1945,65 | 0,59 |
| 19,00 | 75,40 | 5,00 | 5,20 | 1960,40 | 0,59 |
| 20,00 | 75,00 | 5,10 | 5,00 | 1912,50 | 0,61 |
| 21,00 | 76,30 | 4,90 | 5,00 | 1869,35 | 0,63 |
| 22,00 | 76,00 | 5,00 | 5,20 | 1976,00 | 0,65 |
| 23,00 | 76,00 | 5,00 | 5,00 | 1900,00 | 0,59 |
| 24,00 | 76,40 | 5,10 | 5,10 | 1987,16 | 0,65 |
| 25,00 | 75,00 | 5,00 | 5,10 | 1912,50 | 0,64 |
| 26,00 | 76,00 | 5,00 | 5,00 | 1900,00 | 0,62 |
| Media (gr/cm³) | | | | | 0,64 |
| Desv. standar | | | | | 0,05 |

Tabla 4.5: Dimensiones y densidad obtenida.

Fuente: Elaboración propia

4.3. Preparación de las probetas

Una vez llegado las probetas a pesar un peso aproximado cada 7 días se les midió con el xilohigrómetro su humedad superficial para verificar que estaba dentro el rango permitido (13-18%) para proceder con el ensayo.

Se completaron a 20 probetas sin refuerzo para tener mayor precisión en los valores

encontrados y 6 en las probetas con refuerzo.

| Ensayo a flexión | Dimensiones | Cantidad Probetas Seco al aire |
|-------------------------|--------------------|---------------------------------------|
| Sin refuerzo | 5x5x75 | 20 |
| Con refuerzo | 5x5x75 | 6 |

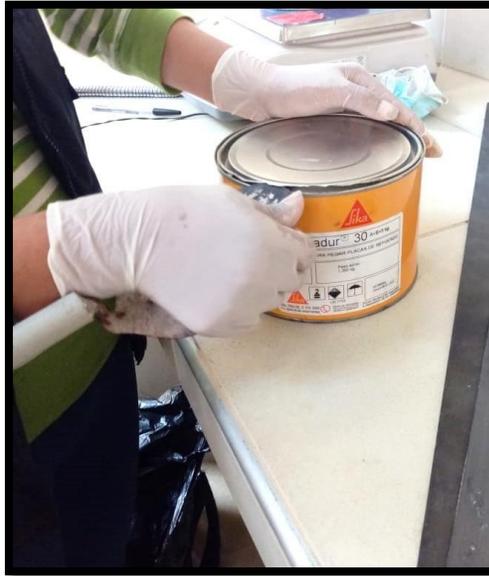
Tabla 4.6: Número de probetas a ensayar

4.3.1. Aplicación de la platina

El primer paso para aplicar el refuerzo de fibra es verificar el estado de la estructura, en nuestro caso no tendríamos mayores problemas por tratarse de muestras de madera con una escala reducida. Verificamos que la superficie se encuentre limpio, seco, libre de partículas sueltas, grasa y contaminación de aceite. En caso de que haya cavidades o agujeros en la superficie, estos deben rellenarse con algún tipo de mortero epoxi. Inicialmente, limpiamos la platina con thinner para quitarle el polvillo que viene de fabrica luego aplicamos una capa de resina sobre la superficie de madera e inmediatamente se colocó la platina de fibra en la superficie a incrementar la resistencia en este caso sobre la probeta con refuerzo aplicado en su cara inferior.

Presionar la fibra contra el adhesivo, es recomendable usar rodillo de desaireación de aluminio, eliminando así las burbujas de aire que pueda existir en el refuerzo. El curado requiere aproximadamente 48 horas a 5 días.

Una vez obtenidas las probetas se las dejó almacenadas en el laboratorio de Resistencia de los Materiales con el objetivo de que se alcance la resistencia máxima del adhesivo para posteriormente trasladar al Laboratorio de Maderas para el respectivo ensayo a flexión en la prensa universal.



*Figura 4.4 : Aplicación del adhesivo epóxico
Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 4.5: Probetas reforzadas.
Fuente: Elaboración propia.*

4.4. Determinación analítica

En este apartado se presenta el desarrollo de los cálculos a flexión reforzadas y sin reforzar, haciendo el uso de las cargas y deformaciones experimentales, dimensiones y módulos de elasticidad. Presentando una al finalizar con los resultados obtenidos de los cálculos: Rigidez del sistema por el método sección transformada, momento último para probetas con y sin refuerzo encontrando el módulo de elasticidad del sistema y

deflexiones teóricas.

4.4.1. Cálculo de la rigidez a la flexión

Las probetas de madera sin refuerzo, tienen un momento de inercia (I) igual a:

$$I = \frac{5 * (5.1)^3}{12}$$

$$I = 55,27 \text{ cm}^4$$

Se encontraron pequeñas variaciones en las dimensiones de las probetas de madera por lo que las inercias serán diferentes entre ellas.

4.4.1.1 Método de la sección transformada

Es un modelo teórico para la determinación de la rigidez teórica de probetas de madera reforzado con fibra formada para evaluar probetas con sección (b x h).

Transformando la sección compuesta en otra sección equivalente formado por un solo material tendremos un ancho efectivo:

$$b' = \frac{5\text{cm} * 1682531,75}{71954,74}$$

$$b' = 116.92 \text{ cm}$$

Para la sección equivalente, se determinó la posición del centro de gravedad del pieza (Y_{cg}), dimensionada en relación con el borde inferior de la probeta de madera.

$$Y_{cg} = \frac{(b \cdot h) \left(\frac{h}{2} + e\right) + \left(b \cdot \frac{E_2}{E_1} \cdot e\right) \left(\frac{e}{2}\right)}{(b \cdot h) + \left(b \cdot \frac{E_2}{E_1} \cdot e\right)}$$

$$Y_{cg} = \frac{(5 \cdot 5,4) * \left(\frac{5,4}{2} + 0,12\right) + \left(5 \cdot \frac{1682531,75}{71954,74} \cdot 0,12\right) \left(\frac{0,12}{2}\right)}{(5 \cdot 5,4) + \left(5 \cdot \frac{1682531,75}{71954,74} \cdot 0,12\right)}$$

$$Y_{cg} = 1.66 \text{ cm}$$

Una vez se ha obtenido el momento la inercia respecto al eje y, se puede transportar al eje Y_{cg} (que pasa por el centroide de la sección) mediante el teorema de los ejes paralelos (o teorema de Steiner) para obtener el valor del momento de inercia para la sección equivalente de la probeta reforzada (I_r):

$$I_r = \frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot h \cdot \left[\left(e + \frac{h}{2} \right) - Y_{cg} \right]^2 + \frac{b \cdot E_2 \cdot e^3}{E_1 \cdot 12} + \frac{b \cdot E_2 \cdot e}{E_1} \cdot \left(Y_{cg} - \frac{e}{2} \right)^2$$

$$I_r = 108,58 \text{ cm}^4$$

4.4.1.2 Cálculo de la eficiencia del refuerzo

No toma en cuenta adhesivo, es decir se asumió que la distribución de fuerzas de tracción en todo el espesor del adhesivo es nula y solo se consideró la altura de la probeta y fibra. Se determinará a través de la relación entre los momentos de inercia:

| Probeta | Y_{cg} (cm ⁴) | I (cm ⁴) | I_r (cm ⁴) | I_r / I |
|----------------------|-----------------------------|----------------------|--------------------------|-----------|
| 1,00 | 1,66 | 55,27 | 108,58 | 1,96 |
| 2,00 | 1,61 | 53,13 | 105,14 | 1,98 |
| 3,00 | 1,66 | 55,27 | 108,58 | 1,96 |
| 4,00 | 1,66 | 56,38 | 110,75 | 1,96 |
| 5,00 | 1,66 | 55,27 | 108,58 | 1,96 |
| 6,00 | 1,61 | 52,08 | 103,08 | 1,98 |
| Media | | | | 1,97 |
| Desv estándar | | | | 0,01 |

*Tabla 4.7: Incremento de rigidez en probetas
Fuente: Elaboración propia*

La rigidez teórica de la probeta reforzada se obtendrá al multiplicar el módulo de elasticidad del sistema por la inercia del sistema (EI).

La rigidez experimental la obtendremos a partir de la siguiente ecuación:

$$EI = \frac{P * L^3}{48 * \Delta}$$

4.4.2. Cálculo del momento flector último (sin refuerzo)

El análisis de probetas sin refuerzo se basa en la teoría del momento interno máximo debido a la carga puntual.

Considerando que la carga consiste en una fuerza concentrada en el centro del tramo de 70cm, la fuerza máxima resistida por la probeta se puede determinar mediante:

$$M_u = \frac{866,762 * 70}{4}$$

$$M_u = 15168.34 \text{ Kg. cm}$$

| Probeta | I (cm⁴) | Mu (kg*cm) |
|----------------------|---------------------------|-------------------|
| 1,00 | 65,61 | 15168,34 |
| 2,00 | 55,07 | 12848,47 |
| 3,00 | 56,24 | 14276,08 |
| 4,00 | 49,02 | 11952,09 |
| 5,00 | 55,27 | 15519,88 |
| 6,00 | 50,00 | 14984,71 |
| 7,00 | 56,38 | 13735,98 |
| 8,00 | 50,00 | 8741,08 |
| 9,00 | 55,27 | 14271,15 |
| 10,00 | 56,38 | 15698,27 |
| 11,00 | 55,27 | 14449,54 |
| 12,00 | 51,04 | 17482,16 |
| 13,00 | 55,27 | 8750,00 |
| 14,00 | 50,00 | 16411,82 |
| 15,00 | 55,27 | 20514,78 |
| 16,00 | 58,59 | 17660,55 |
| 17,00 | 53,13 | 17482,16 |
| 18,00 | 51,04 | 15698,27 |
| 19,00 | 58,59 | 12848,47 |
| 20,00 | 52,08 | 12250,00 |
| Media | 54,48 | 14537,19 |
| Desv estandar | 3,92 | 2866,32 |

Tabla 4.8. Momento de inercia y momento flector sin refuerzo

El desplazamiento vertical en el medio del tramo se estima mediante:

$$\delta = \frac{P * L^3}{48EI}$$

$$\delta = \frac{866.76 * 70^3}{48 * 71954.74 * 65.61}$$

$$\delta = 0.69 \text{ cm}$$

A continuación, se muestran los desplazamientos verticales experimentales para las probetas sin reforzar obtenidos mediante fórmula en el ensayo a flexión.

| Probeta | Def teo (cm) | Def exp (cm) |
|------------------|---------------------|---------------------|
| 1,00 | 0,69 | 0,48 |
| 2,00 | 0,73 | 0,67 |
| 3,00 | 0,81 | 0,62 |
| 4,00 | 0,82 | 0,80 |
| 5,00 | 0,82 | 0,56 |
| 6,00 | 0,91 | 0,69 |
| 7,00 | 0,72 | 0,79 |
| 8,00 | 0,71 | 0,77 |
| 9,00 | 0,91 | 0,71 |
| 10,00 | 0,90 | 0,71 |
| 11,00 | 1,01 | 0,72 |
| 12,00 | 0,99 | 0,61 |
| 13,00 | 0,64 | 0,85 |
| 14,00 | 1,01 | 0,74 |
| 15,00 | 1,01 | 0,54 |
| 16,00 | 0,78 | 0,50 |
| 17,00 | 0,95 | 0,64 |
| 18,00 | 0,89 | 0,79 |
| 19,00 | 0,73 | 0,64 |
| 20,00 | 0,97 | 0,65 |
| Media | 0,85 | 0,67 |
| Desv est. | 0,12 | 0,10 |

Tabla 4.9. Deformaciones calculadas y experimentales de probetas sin reforzar

4.4.3. Cálculo del momento flector último teórico (con refuerzo)

El modelo de cálculo aplicado ha consistido en establecer el equilibrio de la sección, considerando la plastificación de las fibras comprimidas de la madera. Mediante las

ecuaciones de equilibrio, las leyes de comportamiento de los materiales, las hipótesis de las secciones planas y la compatibilidad de deformaciones asociadas en el método de Arguelles, con lo que se calculará la carga máxima teórica.

4.4.3.1 Modelo de Arguelles

Según teoría se considera que el fallo de la probeta es debido al esfuerzo de tracción que por compresión.

El valor de las fuerzas resultantes de la compresión y la tracción es igual a:

$$\begin{aligned} C_1 &= f_{c0} \cdot b \cdot (h - s - p) \\ C_2 &= f_{c0} \cdot \frac{b \cdot s}{2} \\ T_m &= f_{t0} \cdot \frac{b}{2} \cdot \left(\frac{f_{t0}}{E_t \cdot m} \right) \\ T_f &= b \cdot e \cdot E_f \cdot \left(\frac{f_{t0}}{E_t} \right) \end{aligned}$$

De la condición de equilibrio de fuerzas horizontales, reemplazando los valores de "s" y "p" y reordenando los términos, obtenemos:

$$m = \frac{f_{t0}^2 \cdot E_c + 2 \cdot E_t \cdot f_{c0}^2 + 2 \cdot E_c \cdot f_{c0} \cdot f_{t0} - f_{c0}^2 \cdot E_t}{2 \cdot f_{c0} \cdot h \cdot E_t \cdot E_c - 2 \cdot E_c \cdot e \cdot E_f \cdot f_{t0}}$$

$$m = 0.521$$

Después de determinar "m", usando la ecuación 13, el valor del momento resistente, de la suma de los momentos de las fuerzas. Fue adoptado la posición de la línea neutra para resumir las fuerzas involucradas en el problema, obteniéndose:

$$\begin{aligned} \sum M_t &= 0 \\ M_t &= f_{c0} \cdot b \cdot \left[\left(h - \frac{f_{c0}}{E_c \cdot m} - \frac{f_{t0}}{E_t \cdot m} \right) \cdot \left(\frac{f_{c0}}{E_c \cdot m} + \left(\frac{h}{2} - \frac{f_{t0}}{2 \cdot E_t \cdot m} - \frac{f_{c0}}{2 \cdot E_c \cdot m} \right) \right) \right] + \\ &\left[\left(\frac{f_{c0}^2 \cdot b}{2 \cdot E_c \cdot m} \right) \cdot \left(\frac{2 \cdot f_{c0}}{3 \cdot E_c \cdot m} \right) \right] + \left[\left(\frac{f_{t0}^2 \cdot b}{2 \cdot E_t \cdot m} \right) \cdot \left(\frac{2 \cdot f_{t0}}{3 \cdot E_t \cdot m} \right) \right] + \left[\left(\frac{b \cdot e \cdot E_f \cdot f_{t0}}{E_t} \right) \cdot \left(\frac{f_{t0}}{E_t \cdot m} - \frac{e}{2} \right) \right] \end{aligned}$$

$$M_t = 26390,01 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

Posteriormente despejamos la carga "P" de la fórmula general de momento

flexionante para la respectiva comparación de cargas.

| Probeta | m | Mu (kg*cm) | P (kg) |
|---------------------|------|------------|---------|
| 1,00 | 0,52 | 26390,00 | 1508,00 |
| 2,00 | 0,51 | 26005,00 | 1486,00 |
| 3,00 | 0,48 | 25672,50 | 1467,00 |
| 4,00 | 0,54 | 27547,10 | 1574,12 |
| 5,00 | 0,53 | 26492,73 | 1513,87 |
| 6,00 | 0,50 | 25892,65 | 1479,58 |
| Media | 0,51 | 26333,33 | 1490,89 |
| Desviación estándar | 0,02 | 669,41 | 38,25 |

*Tabla 4 .10: Momento teórico para probetas con refuerzo (Arguelles)
Fuente: Elaboración propia*

4.4.3.2. Cálculo de nueva sección

Se calculó una nueva sección necesaria por resistencia, $f_{adm} = 150 \text{ kg/cm}^2$, para madera tipo B, calculado para el momento obtenido a partir de las cargas experimentales para probeta reforzada.

Z= Módulo de sección

$$Zi = \frac{Mu}{f_{adm}}$$

$$Zi = \frac{27382,77 \text{ kg} * \text{cm}}{150 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}$$

$$Zi = 182,55 \text{ cm}^3$$

Según tabla 13.1 del manual de diseño de maderas la sección que satisface los requisitos de momento de inercia I y módulo de sección Z obtenido a partir de las cargas experimentales es 4x16,5 cm ó 6,5x14cm.

| Probeta | Mu exp (kg*cm) | z (cm3) | I (cm4) | Sección comercial (cm) |
|----------------|-------------------|---------|---------|---------------------------|
| 1,00 | 27382,77 | 182,55 | 1486.3 | 6,5x14 |
| 2,00 | 27739,55 | 184,93 | 1486.3 | 6,5x14 |
| 3,00 | 27293,58 | 181,96 | 1486.3 | 6,5x14 |
| 4,00 | 26669,22 | 177,79 | 1497.4 | 4x16.5 |
| 5,00 | 29255,86 | 195,04 | 1486.3 | 6,5x14 |
| 6,00 | 28185,52 | 187,90 | 1486.3 | 6,5x14 |
| Media | 27754,42 | 185,03 | 1488,15 | |
| Desv. estándar | 890,91 | 5,94 | 4,53 | |

*Tabla 4 .11: Cálculo de sección equivalente
Fuente: Elaboración propia*

4.4.3.3. Cálculo del módulo de elasticidad teórica para probetas reforzadas

Donde,

V_f : fracción volumétrica de las fibras

$$V_{fi} = \frac{h_f * b_f * l_f}{h_m * b_m * l_m} = \frac{0.12}{5.4}$$

$$V_{fi} = 0.022$$

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

$$E = 62271,95 * (1 - 0,02) + 1682531,75 * 0,02$$

$$E = 100395,71 \frac{kg}{cm^2}$$

Manteniendo constante los módulos de elasticidad de la fibra y de la madera ajustada al 12%, variando la fracción volumétrica tenemos el módulo de elasticidad del sistema mediante fórmula, presentando a continuación los resultados obtenidos:

| Probeta ref. | Vf | E (kg/cm ²) |
|---------------|------|-------------------------|
| 1,00 | 0,02 | 100395,71 |
| 2,00 | 0,02 | 101158,18 |
| 3,00 | 0,02 | 100395,71 |
| 4,00 | 0,02 | 100395,71 |
| 5,00 | 0,02 | 100395,71 |
| 6,00 | 0,02 | 101158,18 |
| Media | 0,02 | 100649,87 |
| Desv estándar | 0,00 | 393,74 |

Tabla 4.12: Módulo de elasticidad a partir de fracción volumétrica para probetas reforzadas

Fuente: Elaboración propia

4.4.3.4. Cálculo de la deflexión máxima teórica para probetas reforzadas

Posteriormente se calculó la deflexión máxima para probetas con carga puntual en el centro del tramo con la siguiente ecuación:

$$\delta = \frac{P * L^3}{48EI}$$

$$\delta = \frac{1564,73 * 70^3}{48 * 100395,71 \frac{kg}{cm^2} * 108,58cm^4}$$

$$\delta = 0,65 \text{ cm}$$

A continuación, se muestran y desplazamientos verticales para las probetas con refuerzo obtenidos mediante fórmula y en el ensayo a flexión hasta el límite elástico.

| Probeta | Def teórica(cm) | Def exp. (cm) |
|----------------|-----------------|---------------|
| 1,00 | 0,65 | 0,40 |
| 2,00 | 0,68 | 0,75 |
| 3,00 | 0,64 | 0,90 |
| 4,00 | 0,62 | 0,78 |
| 5,00 | 0,69 | 0,78 |
| 6,00 | 0,70 | 0,60 |
| Media | 0,67 | 0,73 |
| Desv. estándar | 0,03 | 0,18 |

Tabla 4.13: Deformaciones teóricas elásticas de probeta con refuerzo

Fuente: Elaboración propia

4.5 Determinación experimental

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el desarrollo del programa experimental, para luego realizar el análisis estadístico correspondiente lo que permite utilizar con confiabilidad y proponer los usos adecuados para la especie en estudio. En la parte de anexos se muestran los resultados de forma gráfica mediante curvas carga vs. desplazamiento y tablas de cada probeta. Inicialmente se indican los resultados obtenidos de los elementos sin reforzar, posteriormente, se presentan los resultados de los elementos reforzados.

El objeto de los ensayos es analizar el comportamiento de las probetas de madera sometidas a flexión y su ajuste al modelo teórico, además del incremento de la capacidad de carga y el valor de la deformación, es importante analizar otros aspectos importantes como son la transmisión de esfuerzos entre la madera y el material compuesto, es decir, el comportamiento de la superficie de unión entre ambos. También el modo de fallo de las piezas, que puede variar tras la aplicación del refuerzo, y el cambio de rigidez de los elementos reforzados con respecto a los no reforzados.

4.5.1. Determinación de las propiedades elásticas

Se aplicará una carga a la madera, mientras transcurre el tiempo la carga irá haciendo efecto y deformando la madera de forma simétrica. Una vez alcanzado su deformación máxima se detendrá la maquina universal. Se obtendrán las deformaciones y cargas de rotura ultima y al límite elástico que nos servirá como dato para poder determinar sus propiedades elásticas y el momento flector último experimental.

4.5.1.1. Probeta sin refuerzo

a) Módulo de flexión, elasticidad, o de Young (MOE)

Indica la capacidad de la madera para resistir deformaciones; es decir, entre más alto el valor del MOE, menor deflexión y más rígida será la madera.

Se la calcula con la carga al límite de proporcionalidad obtenida de la gráfica y la deflexión en centro luz correspondiente al límite de proporcionalidad.

$$\text{MOE} = \frac{P * L^3}{4\Delta b h^3}$$

$$\text{MOE} = \frac{458\text{kg} * (70\text{cm})^3}{4 * \Delta * 5\text{cm} * (5.4\text{cm})^3} = 58685.31 \text{ kg/cm}^2$$

b) Módulo de ruptura ó esfuerzo máximo (MOR)

Se la calcula con la carga alcanzada en el momento del fallo de la probeta.



*Figura 4.6: Momento del fallo en probeta sin refuerzo
Fuente: Elaboración propia*

$$\text{MOR} = \frac{3 * P_{\text{máx}} * l}{2bh^2}$$

$$\text{MOR} = \frac{3 * 866.76\text{kg} * 70\text{cm}}{2 * 5\text{cm} * (5.4\text{cm})^2}$$

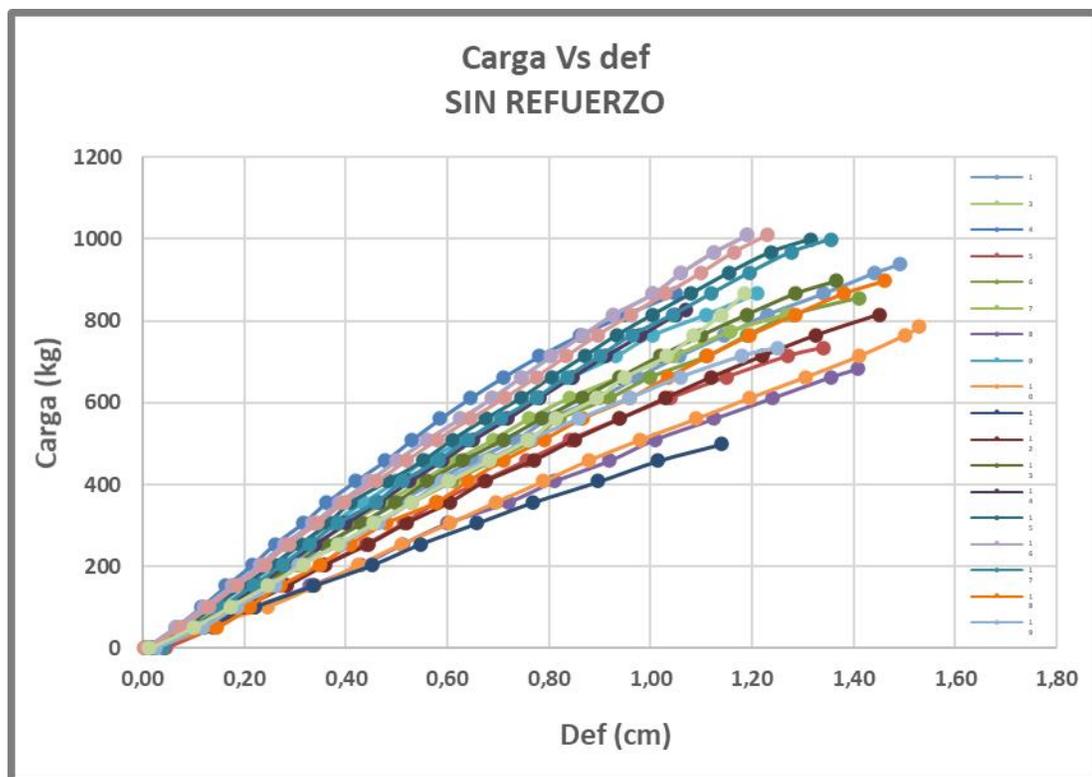
$$\text{MOR} = 624.21 \text{ kg/cm}^2$$

c) **Esfuerzo de las fibras en el límite elástico o proporcional (ELP)**

$$\text{ELP} = \frac{3 \cdot P \cdot l}{2bh^2}$$

$$\text{ELP} = \frac{3 \cdot 458\text{kg} \cdot 70\text{cm}}{2 \cdot 5\text{cm} \cdot (5,4\text{cm})^2} = 329.84 \text{ kg/cm}^2$$

A continuación, se muestra la gráfica obtenida del ensayo de las probetas de madera sin refuerzo y en la tabla 4,14 se presentan los datos numéricos de las cargas de rotura y al límite elástico de igual manera los resultados de los respectivos cálculos para las propiedades elásticas.



*Figura 4.7: Comportamiento mecánico de las probetas sin refuerzo
Fuente: Elaboración propia*

| Probeta | Pmáx (kg) | Pl (kg) | MOE (kg/cm2) | MOR (kg/cm2) | ELP (kg/cm2) |
|----------------|------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1,00 | 866,76 | 458,00 | 58685,31 | 624,21 | 329,84 |
| 2,00 | 734,20 | 407,00 | 62130,05 | 606,59 | 336,26 |
| 3,00 | 815,78 | 458,00 | 68458,82 | 659,95 | 370,52 |
| 4,00 | 682,98 | 407,00 | 69799,35 | 597,36 | 355,98 |
| 5,00 | 886,85 | 458,00 | 69662,68 | 716,03 | 369,78 |
| 6,00 | 856,27 | 458,00 | 77005,59 | 734,24 | 392,73 |
| 7,00 | 784,91 | 407,00 | 60691,64 | 621,30 | 322,16 |
| 8,00 | 499,49 | 356,00 | 59856,86 | 437,05 | 311,50 |
| 9,00 | 815,49 | 509,00 | 77419,87 | 658,42 | 410,96 |
| 10,00 | 897,04 | 509,00 | 75901,84 | 710,06 | 402,90 |
| 11,00 | 825,69 | 560,00 | 85177,07 | 666,65 | 452,13 |
| 12,00 | 998,98 | 509,00 | 83835,29 | 856,27 | 436,29 |
| 13,00 | 500,00 | 356,00 | 54148,28 | 403,69 | 287,43 |
| 14,00 | 937,82 | 509,00 | 85580,45 | 804,17 | 436,46 |
| 15,00 | 993,27 | 560,00 | 85177,07 | 946,47 | 452,13 |
| 16,00 | 921,17 | 458,00 | 65720,47 | 783,75 | 355,70 |
| 17,00 | 998,98 | 509,00 | 80547,64 | 822,69 | 419,18 |
| 18,00 | 897,04 | 458,00 | 75435,29 | 768,89 | 392,57 |
| 19,00 | 734,20 | 430,00 | 61702,62 | 570,20 | 333,95 |
| 20,00 | 700,00 | 509,00 | 82158,59 | 588,00 | 427,56 |

| | | | |
|--------------------------------------|----------|--------|--------|
| Media (kg/cm2) | 72187 | 679,21 | 380,91 |
| Desv. Estándar (kg/cm2) | 9276,08 | 105,72 | 44,12 |
| Media justado al 12% (kg/cm2) | 62271,95 | 640,17 | 362,98 |

*Tabla 4.14: Resultados de las propiedades elásticas sin refuerzo
Fuente: Elaboración propia*

Los valores ajustados al 12 % C.H. están determinados en función de la siguiente fórmula:

$$\log R_{12} = \log RSA + \frac{(HSA - H_{12})(HV - HSA)}{(HV - HSA)} * \log \frac{RSA}{HV}$$

Donde:

R12 = Resistencia mecánica al 12% en kg/cm²

RSA = Resistencia mecánica al en estado seco al aire en kg/cm²

H12 = Contenido de humedad al 12%

HSA = Contenido de humedad seco aire en %

HV = Contenido de humedad verde (C.H. =30%)

$$\log R_{12} = \log 72187 + \frac{(11.65 - 12)}{(30 - 11.65)} * \log \frac{72187}{30}$$

$$\log R_{12} = 4,79$$

$$R_{12} = 10^{4.79}$$

$$R_{12} = 62271.95 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Estos resultados ajustados al 12 % nos indican la resistencia de la madera en sus diversos ensayos tomando en cuenta que el contenido de humedad en la madera ensayada es de 11.65 % y la densidad básica es de 0.64 kg/cm³

4.5.1.2. Probetas reforzadas

a) Módulo de flexión, elasticidad, o de Young (MOE)

$$\text{MOE} = \frac{P * L^3}{4\Delta b h^3}$$

$$\text{MOE} = \frac{700\text{kg} * (70\text{cm})^3}{4 * \Delta * 5\text{cm} * (5,4)^3} = \frac{226251,59\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

b) Módulo de ruptura o esfuerzo a flexión (MOR)



Figura 4.8 : Comportamiento de las probetas sin refuerzo
Fuente: Elaboración propia

$$\text{MOR} = \frac{3.P_{\text{máx}}*l}{2bh^2}$$

$$\text{MOR} = \frac{3 * 1564,73\text{kg} * 70\text{cm}}{2 * 5\text{cm} * (5,4\text{cm})^2} = 1263,33 \text{ kg/cm}^2$$

c) Esfuerzo de las fibras en el límite elástico o proporcional (ELP)

$$\text{ELP} = \frac{3. P * l}{2bh^2}$$

$$\text{ELP} = \frac{3 * 700\text{kg} * 70\text{cm}}{2 * 5\text{cm} * (5,4\text{cm})^2} = 565,17 \text{ kg/cm}^2$$

| Probeta | P2 | P1 | Def | MOE | MOR | ELP |
|----------------------------|---------|---------|------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | (kg) | (kg) | (kg) | (kg/cm ²) | (kg/cm ²) | (kg/cm ²) |
| 1,00 | 1564,73 | 700,00 | 0,40 | 226251,59 | 1263,33 | 565,17 |
| 2,00 | 1585,12 | 900,00 | 0,75 | 161411,76 | 1305,39 | 741,18 |
| 3,00 | 1559,63 | 920,00 | 0,90 | 132159,66 | 1259,22 | 742,79 |
| 4,00 | 1523,96 | 900,00 | 0,78 | 146251,84 | 1206,29 | 712,40 |
| 5,00 | 1671,76 | 1100,00 | 0,78 | 182327,29 | 1349,75 | 888,12 |
| 6,00 | 1610,60 | 850,00 | 0,60 | 194366,67 | 1352,91 | 714,00 |
| Media | | | | 158547,48 | 1294,42 | 727,28 |
| Desviación estándar | | | | 26700,30 | 42,38 | 16,65 |

Tabla 4.15: Resultados de las propiedades elásticas probetas con refuerzo
Fuente: Elaboración propia

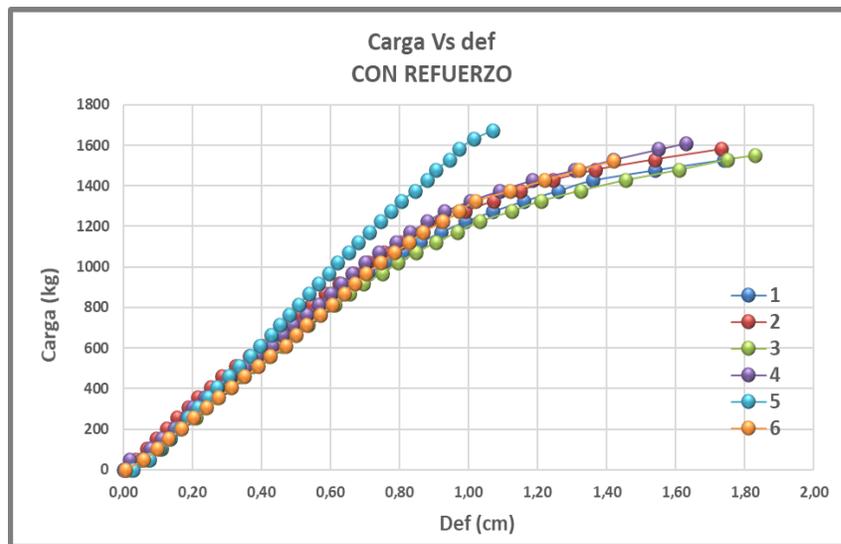


Figura 4.9: Comportamiento de las probetas con refuerzo
Fuente: Elaboración propia

4.6. Análisis estadístico de los resultados

El análisis estadístico se realizó en base a la norma COPANT 30:1-012 que establece el procedimiento y la presentación de los resultados para poder determinar las propiedades mecánicas de la madera de la especie *Aliso Alnus Jorullensis*.

Los datos estadísticos son:

$$N = \text{Total de probetas ensayadas} = 20$$

Donde:
$$N = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + \dots + l_k = \sum_{j=1}^k l_j$$

4.6.1 Valor promedio (\bar{X}) de los valores individuales por árbol

$$\bar{X} = \frac{1}{l} (x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + \dots + x_l) = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l x_i$$

(\bar{X}) es la variable que indica cada uno de los valores de los resultados obtenidos en cada probeta.

4.6.2 Estimación de la varianza

Para la estimación de las varianzas, se determinó en base a las relaciones indicadas más adelante para el cálculo de la varianza de valores individuales, estimación de la varianza promedio y la varianza total.

| | Grados de libertad | Suma de cuadrados de la desviación | Varianza |
|----------------------|---------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------|
| Entre los grupos | $n_1 = k - 1$ | $A_1 = II - I$ | $S_1^2 = \frac{A_1}{n_1}$ |
| Dentro de los grupos | $n_2 = k - 1$ | $A_2 = III - II$ | $S_2^2 = \frac{A_2}{n_2}$ |
| Total | $n_1 + n_2 = k - 1$ | $A_1 + A_2 = III - I$ | $S_T = \frac{A_1 + A_2}{n_1 + n_2}$ |

*Tabla 4.16. Fórmulas para determinar la varianza
Fuente: Norma COPANT Maderas 30:1-012*

Donde:

$$n_1 = k - 1 = 4 - 1 = 3$$

$$n_2 = N - k = 20 - 4 = 16$$

$$n_1 + n_2 = N - 1 = 20 - 1 = 19$$

Los números romanos son agrupadores de datos y/o fórmulas; para su desarrollo se presenta el siguiente ejemplo:

Donde:

N = 20 Número de probetas totales k = 4 Número de arboles

l = 5 Número de probetas dentro del árbol

X = 674,21

$$II = l \sum_{j=1}^k X_j^2 = \sum_{j=1}^k \frac{1}{l} \left(\sum_{i=1}^l x_i \right)^2 = 9120102,53$$

$$III = l \sum_{i=1}^N X_j^2 = 9404015,88$$

$$S_1^2 = \frac{II - I}{k - 1} = \frac{28868,67}{3} = 9622,96$$

$$S_2^2 = \frac{III - II}{N - k} = \frac{283913,35}{16} = 17744,58$$

$$S_T^2 = \frac{III - I}{N - 1} = \frac{312782,23}{19} = 16462,22$$

S_1^2 = Variación de los valores individuales entre los árboles S_2^2 = Variación promedio

S_T^2 = Variación de todos los valores individuales al rededor del promedio total

4.6.3 Determinación del coeficiente de variación

Para la determinación primeramente se desarrolla el cálculo de la desviación típica, que es la raíz cuadrada de los valores de variación donde se obtuvo:

$$S_1 = \sqrt{9622,96} = \pm 98,10$$

$$S_2 = \sqrt{17744,58} = \pm 133,21$$

$$S_3 = \sqrt{16462,22} = \pm 128,31$$

Para el coeficiente de variación (CV_1) de la varianza promedio de los valores individuales entre los (k) árboles se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$CV_1 = \frac{S_1}{X} * 100 = \frac{98,10}{674,21} * 100 = 14,55\%$$

Para el coeficiente de variación (CV_2) de la varianza promedio de los valores de las varianzas dentro de los (k) árboles se determinó mediante:

$$CV_2 = \frac{S_2}{\bar{X}} * 100 = \frac{133,21}{674,21} * 100 = 19,76\%$$

El coeficiente de variación total (CV_T) de la varianza de los valores individuales (x_i) alrededor del promedio total (\bar{X}) se obtiene:

$$CV_T = \frac{S_T}{\bar{X}} * 100 = \frac{128,31}{674,21} * 100 = 19,03\%$$

4.6.4 Cálculo del intervalo de confianza para el valor promedio total

Como el valor promedio total (\bar{X}) de un muestreo, es solamente una estimación del promedio (N) de la población, también se necesita presentar un análisis estadístico, el intervalo de confianza ($\pm q$) del valor promedio total (\bar{X}), para una seguridad estadística postulada (generalmente al 95%). El valor promedio total, es decir de todos los datos $\pm q$ (intervalo de confianza) incluye el valor promedio real de la población (N) con una probabilidad dada.

| | | | | | | | | | |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|--------------|
| k-1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 7 | 9 | 14 | 19 | & |
| t (k-1) | 4.3 | 3.18 | 2.78 | 2.57 | 2.37 | 2.26 | 2.15 | 2.09 | 1.96 |

Tabla 4.17 Cuadro de valores para la seguridad estadística

Fuente: Norma COPANT Maderas 30:1-012

$$q = \pm(k - 1) * \frac{S_1}{\sqrt{N}} = \pm(3.18) * \frac{98,10}{\sqrt{20}} = \pm 69,75\%$$

4.6.5 Determinación del valor relativo del intervalo de confianza ($\pm P$)

Los límites de valor promedio total, calculados según fórmula anterior, también se pueden expresar en forma relativa porcentual:

$$p = \frac{q}{\bar{X}} * 100 = \frac{69,75}{674,21} * 100 = 10,35\%$$

| N° de probetas | N° de árboles | | | | Σ lineal |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------|------------|------------|------------|------------|
| | 1,00 | 2,00 | 3,00 | 4,00 | |
| 1,00 | 624,21 | 734,24 | 666,65 | 783,75 | |
| 2,00 | 606,59 | 621,30 | 764,53 | 822,69 | |
| 3,00 | 659,95 | 437,05 | 403,69 | 768,89 | |
| 4,00 | 597,36 | 658,42 | 804,17 | 570,20 | |
| 5,00 | 716,03 | 710,06 | 946,47 | 588,00 | |
| \sum N | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 20,00 |
| $\sum_{i=1}^N x_i$ | 3204,14 | 3161,06 | 3585,50 | 3533,54 | 13484,24 |
| \bar{X} | 640,83 | 632,21 | 717,10 | 706,71 | 2696,85 |
| $\sum_{i=1}^N X^2$ | 2062660,58 | 2053824,63 | 2734375,00 | 2553155,66 | 9404015,88 |
| $\sum_{j=1}^k \frac{1}{l} \left(\sum_{i=1}^k x_i \right)$ | 2053302,10 | 1998463,20 | 2571162,82 | 2497174,41 | 9120102,53 |
| $\sum_{i=1}^N X_i^2 - \sum_{j=1}^k \frac{1}{l} \left(\sum_{i=1}^k x_i \right)^2$ | 9358,49 | 55361,43 | 163212,18 | 55981,25 | 283913,35 |

| Grados de libertad | | | | Varianza | | | Desviación típica | | |
|------------------------------------|-------|------|------------|-------------------------------|-----------|----------|------------------------|-----|--------|
| n1=k-1= | 3,00 | I= | 9091233,65 | A1= | 28868,87 | $S_1^2=$ | 9622,96 | S1= | 98,10 |
| n2=N-k=10 | 16,00 | II= | 9120102,53 | A2= | 283913,35 | $S_2^2=$ | 17744,58 | S2= | 133,21 |
| n3==N-1=14 | 19,00 | III= | 9404015,88 | A3= | 312782,23 | $S_3^2=$ | 16462,22 | S3= | 128,31 |
| Coefficiente de variación % | | | | Intervalo de confianza | | | | | |
| CV1= | 14,55 | | | q= ± 69,75 | | | p= ± 10,35 | | |
| CV2= | 19,76 | | | X±q= 674,21±69,75 | | | X ± p = 674,21 ± 10,35 | | |
| CVT= | 19,03 | | | | | | | | |

| | |
|-----------------------------------|-------|
| k = Número de árboles ensayados | 4,00 |
| L = Número de muestras por ensayo | 5,00 |
| N = Total de probetas ensayadas | 20,00 |

| | |
|-------------------------|--------|
| k-1 al 95% de seguridad | 3,18 |
| $\sqrt{20}$ | 4,47 |
| Media para cada cálculo | 674,21 |
| Constante | 100,00 |

Tabla N° 18 Análisis estadístico, propiedades mecánicas Flexión estática MOR

Fuente: Elaboración propia

4.7. Análisis de costo

El refuerzo CFRP y resina para la colocación tiene la desventaja de tener un alto costo de la materia prima comparado con los métodos tradicionales, pero de alguna manera el bajo costo de su equipamiento y mano de obra necesarios en el proceso de preparación, ensamblado y colocación del FRP en los elementos a reforzar puede ahorrar entre un 25 y 50% por su facilidad de instalación, compensando con creces un

coste superior del material.

El reforzamiento cuesta aproximadamente entre 400bs y 600bs el metro lineal, ya puesto en obra sin embargo, se estima que este costo bajará en los próximos años con motivo de la utilización masiva de productos compuestos de fibras de carbono, y a la alta competencia entre las empresas productoras. En el Anexo 4 se presenta un análisis unitario acerca de este ítem.

4.8. Contrastación de hipótesis

Se inicia el estudio con la siguiente hipótesis:

“La aplicación del refuerzo de fibras de carbono a las probetas incrementará su capacidad de carga entre un 20 a 40%, además se prevé esperar una mayor deformación en el orden del 9% en comparación con las probetas sin reforzar.”

En la siguiente tabla se coloca una síntesis de los resultados obtenidos.

| Cargas | Pm sin refuerzo (kg) | Pm con refuerzo (kg) |
|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Experimental | 830,12 | 1.566,77 |
| Teórico (Arguelles) | - | 1490,89 |

*Tabla 4.20. Carga última promedio experimental y teórico
Fuente: Elaboración propia*

Como se muestra en la tabla 4.20 la carga promedio experimental de la probeta con refuerzo sobrepasa en un 88,74% a las cargas experimentales de las probetas sin reforzar, llegando a rebasar la hipótesis en un 48,74%, esto debido al tipo de madera y a las diferentes características de las capacidades mecánicas resistentes de las fibras de carbono obtenidas de la ficha técnica utilizadas para el ensayo.

| Deformación | sin refuerzo (cm) | con refuerzo (cm) |
|--------------------|--------------------------|--------------------------|
| Experimental | 1,32 | 1,61 |
| Desv. estándar | 0,15 | 0,32 |

*Tabla 4.21 Deformación promedio experimental probeta con refuerzo y sin refuerzo.
Fuente: Elaboración propia*

En cuanto a las deformaciones reforzadas experimentales en el momento de rotura obtenidas de la prueba de ensayo éstas superan en un 22% a las probetas sin refuerzo, sobrepasando de esta manera a la hipótesis en un 13%, confirmando de esta manera que el uso de refuerzo convierte al sistema más dúctil.

4.9 Análisis y discusión de resultados

Luego de concluida la parte analítica y experimental, se procedió al análisis de los resultados obtenidos mediante gráficos y tablas en las que se muestran las medias de cada una de las propiedades, para cada grupo de probetas.

4.9.1. Análisis de rigidez a flexión experimental y teórico

Momento de inercia: Según bibliografía consultada el incremento de momento de inercia por el método teórico de sección transformada alcanzada con fibra de carbono para madera con densidad media es del 70%, en nuestro caso evidenciamos en la siguiente gráfica que se obtuvo un 97% de incremento.

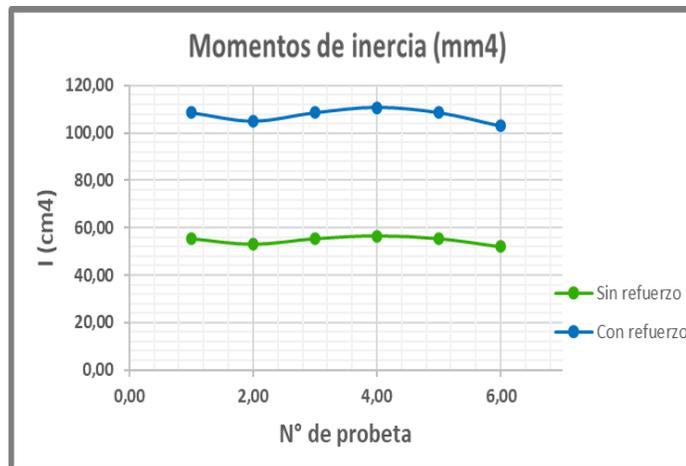


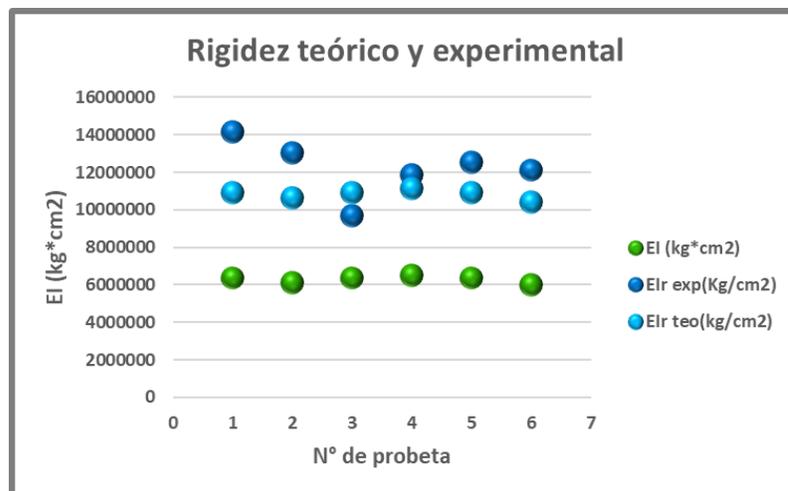
Figura 4.10: Momentos de inercia para probetas con y sin refuerzo

Fuente: Elaboración propia

La rigidez a flexión teórica de las probetas con refuerzo, está en función al módulo de elasticidad del sistema, multiplicado por el momento de inercia calculado con el modelo de la sección transformada. Y la rigidez experimental de las probetas con y sin refuerzo están en función de las cargas y deformaciones obtenidas experimentalmente para cada grupo.

| Probeta | EIr teo (kg*cm ²) | EIr exp (kg*cm ²) | EIr exp / EIr teo |
|---------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------|
| 1 | 10900772,29 | 14142823,16 | 1,30 |
| 2 | 10635626,19 | 13028567,22 | 1,22 |
| 3 | 10900772,29 | 9694508,88 | 0,89 |
| 4 | 11118787,73 | 11851663,04 | 1,07 |
| 5 | 10900772,29 | 12537479,42 | 1,08 |
| 6 | 10427084,50 | 12111858,65 | 1,16 |
| Media | 10813969,22 | 12227816,73 | 1,12 |
| Desv estándar | 243723,07 | 1481683,40 | 0,14 |

*Tabla 4.22: Comparación de rigidez teórica y experimental para probetas con refuerzo.
Fuente: Elaboración propia*



*Figura 4.11: Rigidez para probetas con y sin refuerzo
Fuente: Elaboración propia*

En el gráfico 4.11 el valor experimental de las probetas reforzadas se encuentran encima el valor teórico garantizando que el valor de la rigidez a flexión calculado por el método de sección transformada y módulo de fracción volumétrica se encuentra a favor de la seguridad, con un incremento promedio del 12%. en donde se evidencia que la probeta n°3 experimenta una menor rigidez experimental, esto debido a la poca deformación que experimento durante el ensayo.

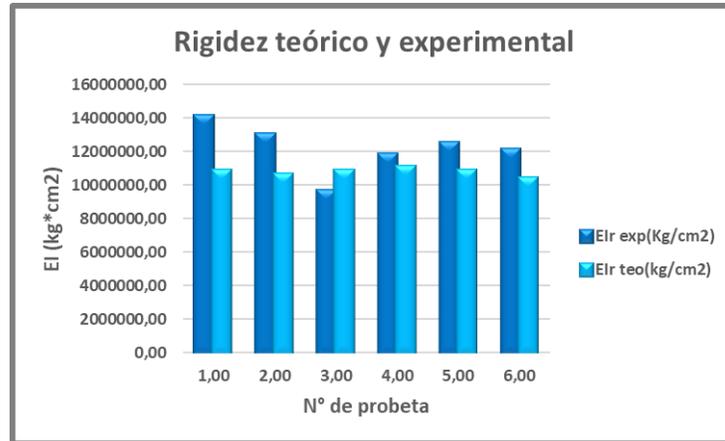


Figura 4.12: Rigidez teórica y experimental para probetas con refuerzo
Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, los resultados de la rigidez teórica reforzada presentan una buena concordancia en relación a la rigidez teórica sin reforzar estimada como el producto del módulo de la madera por la inercia de la probeta sin reforzar, como se muestra en la figura 4.13.

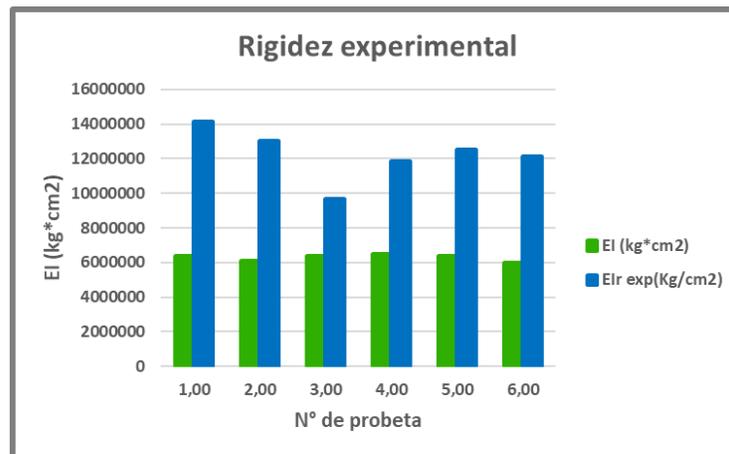


Figura 4.13: Rigidez experimental para probetas con y sin refuerzo
Fuente: Elaboración propia

4.9.2. Análisis del módulo de elasticidad

El módulo elástico para probetas con refuerzo o del sistema se lo obtuvo mediante la ecuación que considera el porcentaje de volumen de cada material multiplicado por el módulo elástico de cada material, obteniendo así un módulo promedio representativo del sistema en función a la fracción volumétrica de cada elemento. A continuación, se muestran los resultados alcanzados en donde se verifica el incremento del 60% en los módulos de elasticidad MOE obtenidos por fórmula con los datos del ensayo, los cuales se usaron para la obtención de la rigidez.

| Probeta | E teórica (kg/cm²) | Eexp (kg/cm²) |
|---------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| 1,00 | 100395,71 | 226251,59 |
| 2,00 | 101158,18 | 161411,76 |
| 3,00 | 100395,71 | 132159,66 |
| 4,00 | 100395,71 | 146251,84 |
| 5,00 | 100395,71 | 182327,29 |
| 6,00 | 101158,18 | 194366,67 |
| Media | 100649,87 | 158547,48 |
| Desviación estándar | 393,74 | 26700,30 |

*Tabla 4.23: Módulos elásticos teórica y experimental probetas con refuerzo
Fuente: Elaboración propia*

4.9.3. Análisis del momento de ruptura: experimental y teórico

La tabla siguiente muestra valores para el momento de ruptura experimental y teórica, esta última determinada según el modelo de rotura por tracción, ya que este esfuerzo es más crítico que la compresión, indicando proximidad entre los valores teóricos y experimentales. Se puede concluir que el modelo de cálculo propuesto es válido para evaluar probetas de madera reforzadas con fibra. Sin embargo, realizando un ajuste entre ambos grupos éstos no llevan una correlación debido a que dependen de distintas variables para su cálculo, siendo también como un motivo de su dispersión la variabilidad en las dimensiones de cada probeta (figura 4.14).

| Probeta | Mu teo Arguelles (kg*cm) | Mu exp (kg*cm) | Mu exp / Mu teo |
|---------------|--------------------------|----------------|-----------------|
| 1,00 | 26390,00 | 27.382,77 | 1,10 |
| 2,00 | 26005,00 | 27.739,55 | 1,12 |
| 3,00 | 25672,50 | 27.115,19 | 1,09 |
| 4,00 | 27547,10 | 26.669,22 | 1,14 |
| 5,00 | 26492,73 | 29.255,86 | 1,11 |
| 6,00 | 25892,65 | 28.185,52 | 1,10 |
| Media | 26333,33 | 27.418,45 | 1,11 |
| Desv estándar | 669,41 | 580,11 | 0,02 |

Tabla 4.24: Momento último experimental y teórico de probetas con refuerzo.

Fuente: Elaboración propia

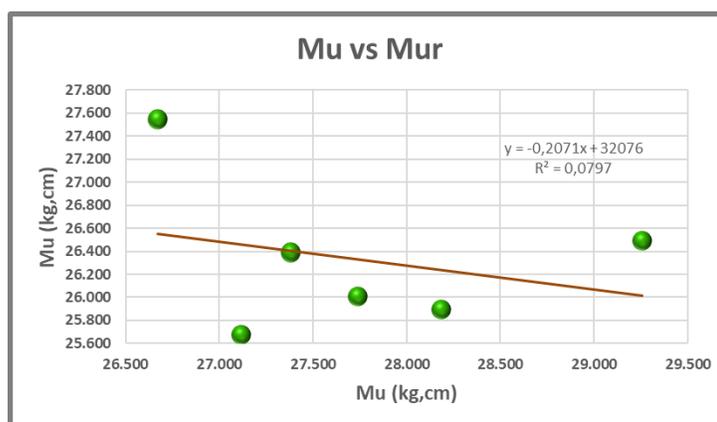


Figura 4.14: Mu experimental Vs Mu teórico de probetas con refuerzo.

Fuente: Elaboración propia

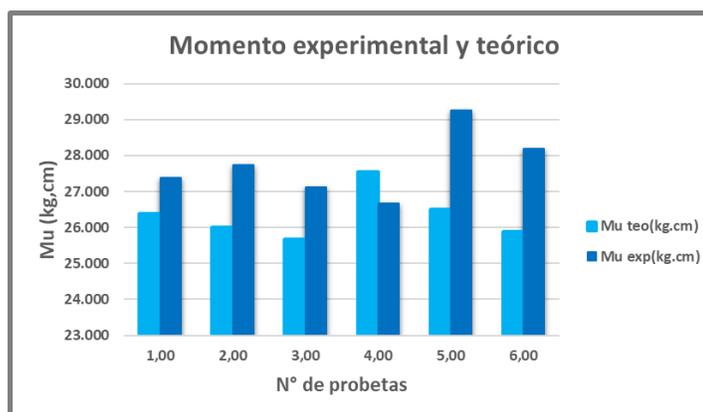


Figura 4.15: Comparación Mu experimental y teórico de probetas con refuerzo.

Fuente: Elaboración propia

El modelo teórico consigue predecir el comportamiento de manera satisfactoria. Los

valores determinados experimentalmente son aproximadamente el 10% superiores a los teóricos estando aportando a favor de la seguridad estructural.

En cuanto a los valores promedios obtenidos experimentalmente. el incremento del momento flector de ruptura es de aproximadamente 89%, en relación a las probetas sin refuerzo.

| | Mu (kg*cm) | Mu exp(kg*cm) | Mu exp / Mu |
|---------------|-------------------|----------------------|--------------------|
| Media | 14.537,19 | 27.418,45 | 1,89 |
| Desv estándar | 2.866,32 | 580,11 | 0,20 |

*Tabla 4.25: Momento último experimental de probetas reforzadas y sin reforzar
Fuente: Elaboración propia*

4.9.4. Análisis de deflexión

Un análisis de las deformaciones de las probetas evaluadas experimentalmente permite afirmar que, las deformaciones teóricas determinadas por el modelo de cálculo propuesto se acercan a las deformaciones experimentales, lo que demuestra la validez de la hipótesis del modelo. Las deformaciones medidas durante el ensayo hasta el límite elástico superaron a las deformaciones determinados mediante cálculo en un 21% las cuales se encuentran en función a las cargas en el límite elástico, las dimensiones de la probeta y al módulo de elasticidad obtenido mediante fracción volumétrica, los resultados muestran cierta homogeneidad.

| Probeta | Def. teórica(cm) | Def exper(cm) | Def exper./ Def. teórica |
|----------------|-------------------------|----------------------|---------------------------------|
| 1,00 | 0,65 | 0,40 | 1,27 |
| 2,00 | 0,68 | 0,75 | 1,32 |
| 3,00 | 0,64 | 0,90 | 1,43 |
| 4,00 | 0,62 | 0,78 | 1,18 |
| 5,00 | 0,69 | 0,78 | 1,07 |
| 6,00 | 0,70 | 0,60 | 1,00 |
| Media | 0,67 | 0,73 | 1,21 |
| Desv standar | 0,03 | 0,18 | 0,11 |

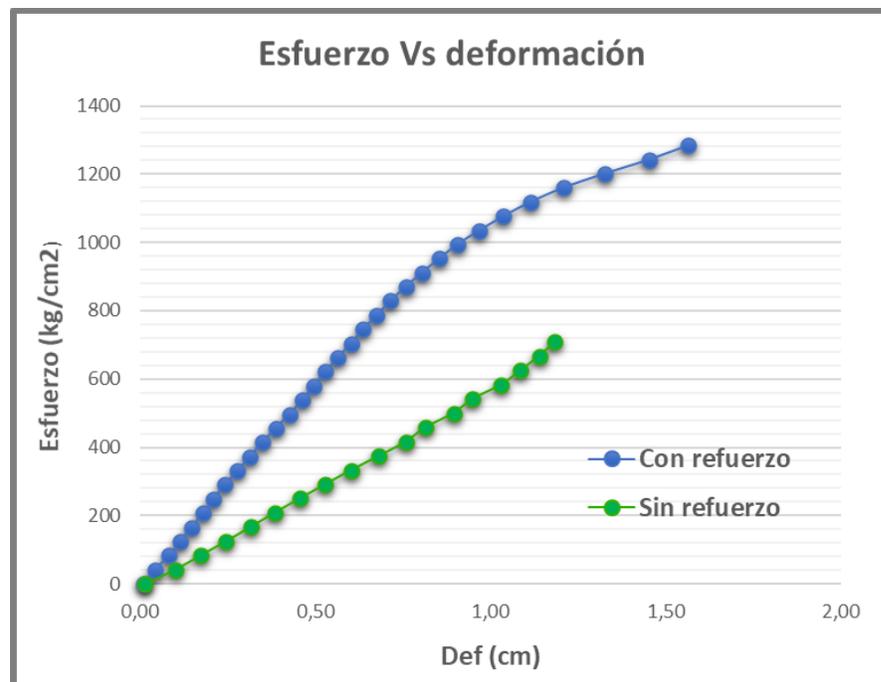
*Tabla 4.26: Comparación de deformaciones experimental y teórico de probetas con refuerzo.
Fuente: Elaboración propia*

4.9.5. Análisis del comportamiento mecánico

En este caso la fibra otorgaría al elemento de mayor capacidad de carga y mejorara su comportamiento haciéndolo más dúctil ya que estudios previos demostraron que la fibra de carbono tiene la capacidad de mejorar la ductilidad de probetas de madera.

A continuación, se puede evidenciar que las probetas reforzadas, se desempeñan mejor que las que son sin refuerzo, éstas experimentan deformaciones más allá del límite elástico sin reducir de manera significativa su resistencia o rigidez. Desde que la probeta sobrepasa el límite elástico, la curva que define su comportamiento empieza a cambiar su inclinación acercándose a la orientación del eje horizontal. Observamos que las deformaciones ya no son proporcionales a la magnitud de los esfuerzos aplicados (Cargas) y su relación Desplazamiento-Fuerza es mayor que antes de entrar en el límite elástico.

Se inicia una progresiva degradación en el módulo de elasticidad (La pendiente de la curva disminuye) y por tanto, la rigidez.



*Figura 4.16: Comparación del comportamiento de las probetas con y sin refuerzo.
Fuente: Elaboración propia*

En la figura 4.14 se puede apreciar que mejoran propiedades como la ductilidad, la deflexión y sobre todo el módulo de elasticidad que aumenta considerablemente. Además, la deflexión elástica se hace mayor en las probetas reforzadas, es decir que estos elementos se deforman mucho más antes de llegar al colapso. En cuanto a la zona elástica del material compuesto, se hace mucho más alta que los especímenes en solo pino, entonces el laminado de los elementos mejora el comportamiento elástico, haciendo que cada espécimen soporte más carga y luego de retirarla vuelve a su estado inicial con mayor facilidad y sin presentar ninguna clase de falla o quedar con esfuerzos remanentes.

La trayectoria de cada probeta evidencia que la zona plástica de las probetas reforzadas es más prolongada, de tal forma que la falla de los elementos es lenta y por lo menos da un tiempo prudencial para evacuar si llega a existir el riesgo de colapso.

A continuación, se muestra un resumen con los valores promedios de las propiedades elásticas de las probetas con y sin refuerzo, para todos los casos se observa una clara mejora con incremento del módulo de elasticidad del 119%, para el esfuerzo a flexión máximo del 90,27% y para el esfuerzo a flexión en el límite elástico de 91,01%.

| Método | P2 | P1 | Def | MOE | MOR | ELP |
|----------------|---------|--------|------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | (kg) | (kg) | (kg) | (kg/cm ²) | (kg/cm ²) | (kg/cm ²) |
| Sin refuerzo | 830,12 | 464,25 | 0,68 | 72187,00 | 679,21 | 380,91 |
| Con refuerzo | 1566,77 | 892,50 | 0,75 | 158547,48 | 1292,37 | 727,59 |
| Incremento (%) | 88,74 | 92,25 | 11 | 119,63 | 90,27 | 91,01 |

*Tabla 4.27: Promedio de las propiedades elásticas de probetas con y sin refuerzo.
Fuente: Elaboración propia*

4.9.6. Modos de fallo o de rotura

Establecer el modo de fallo que predomina permite conocer el comportamiento a flexión del conjunto. A pesar de que la madera a flexión no tiene un modo de rotura claro en todos los casos, en los ensayos realizados se pueden englobar en 2 grupos

diferenciados frecuentemente: Rotura a flexión y rotura a cortante.

Notar que las roturas iniciales, tanto para las probetas sin refuerzo como para las probetas reforzadas ocurren en la zona traccionada posicionada en la región de momento flector máximo, y después de un incremento de carga en las probetas reforzadas ocurre la ruptura final de la probeta, debido a la separación de las fibras longitudinales de la madera en forma paralela al grano, las fracturas se origina en el centro de las probetas y luego se propagan con un ángulo aproximado de 45° hacia uno de sus extremos. Las siguientes figuras ilustran algunos tipos de ruptura observadas en el ensayo.



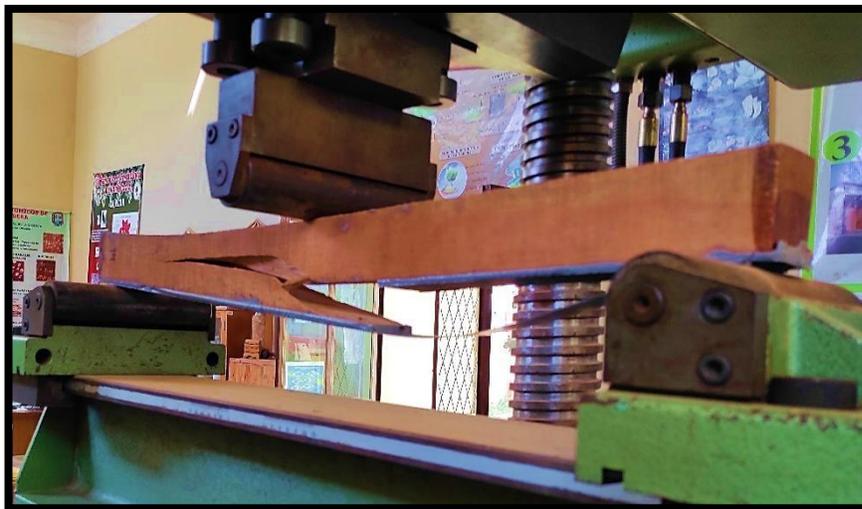
*Figura 4.17: falla por flexión probeta sin refuerzo.
Fuente: Elaboración propia*

Casi todas las probetas de madera sin refuerzo presentan un comportamiento frágil ante rotura, precisamente en la primera probeta a ensayar se observó una distorsión natural del grano no visible que se encontraba en uno de los lados de dicha probeta de ensayo como se muestra a continuación figura 4.18, acto que influyó negativamente en la capacidad de la probeta provocando un fallo prematuro.



*Figura 4.18: falla por desviación de fibra en probeta sin refuerzo
Fuente: Elaboración propia*

Solo para las probetas con refuerzo se observó una segunda ruptura, por un valor mayor de la carga aplicada, el fallo más común que se evidenció en las probetas reforzadas fue la delaminación, se producen desde el inicio de la grieta en la cara inferior hasta el final del refuerzo (zona de apoyos inferiores). ; Este fallo es principalmente producido por la diferencia de deformaciones que existe entre la fibra de carbono y el elemento base, en este caso la madera, para un mismo estado tensional.



*Figura 4.19: falla por flexión probeta con refuerzo.
Fuente: Elaboración propia*

La fibra de carbono confiere al elemento de madera un comportamiento dúctil o, dicho de otro modo, el elemento no falla de una forma frágil, el mecanismo de falla empezaba en la madera con pequeños crujiidos posteriormente sujetándose al esfuerzo de la fibra donde después de un momento llegaba a fallar por tracción en la madera simultáneamente a la delaminación, haciendo que la fibra se desprenda del adhesivo, pero sin presentar ningún daño.

Se definieron los modos de falla de las vigas ensayadas en la tabla 4.28, donde se indican las características del fallo de cada viga y esquema correspondiente de acuerdo con el anexo 1. En la primera columna se muestra la referencia de cada viga. Se señala con una x la columna correspondiente al tipo de esfuerzo que ha producido el fallo: tracción, compresión y/o cortante.

Cuando aparece una columna “centro de vano” significa que la fractura por tracción o compresión se localiza en dicha zona, lo cual indica que no se ha producido el desplazamiento de un lado al otro del centro por la presencia de nudos. En cuanto a las columnas referidas a la influencia de defectos en las piezas, se indica con una x, al igual que la columna final donde se expresa el esquema de fallo referido en el anexo1.

Tal y como se observa en la tabla, casi el 100% de las probetas ensayadas a flexión fallaron por esfuerzo de tracción solo en el primer caso el fallo aparece como combinación de esfuerzo cortante debido a la excesiva desviación de la fibra con respecto al eje de la pieza, el fallo por compresión es insignificante, las probetas reforzadas que experimentaron el despegue produjeron la rotura de la madera y no del material compuesto.

| Modo de fallo | Tracción de fibras inferiores | Compresión de fibras superiores | Cortante | Centro del vano | Influencia de la inclinación de fibras | Despegue de refuerzo | Esquema de fallo |
|---------------|-------------------------------|---------------------------------|----------|-----------------|----------------------------------------|----------------------|-----------------------------|
| 1 | | | x | | x | | Cortante |
| 2 | X | | | X | | | Tracción grano entrecruzado |
| 3 | X | | | X | | | Tracción simple |
| 4 | X | | | X | | | Tracción simple |
| 5 | X | | | X | | | Tracción simple |
| 6 | X | | | X | | | Tracción simple |
| 7 | X | | | X | | | Tracción grano entrecruzado |
| 8 | X | | | X | | | Tracción grano entrecruzado |
| 9 | X | | | X | | | Tracción grano entrecruzado |
| 10 | X | | | X | | | Tracción simple |
| 11 | X | | | X | | | Tracción simple |
| 12 | X | | | X | | | Tracción simple |
| 13 | X | | | X | | | Tracción grano entrecruzado |
| 14 | X | | | X | | | Tracción grano entrecruzado |
| 15 | X | | | X | | | Tracción grano entrecruzado |
| 16 | X | | | X | | | Tracción grano entrecruzado |
| 17 | X | | | X | | | Tracción grano entrecruzado |
| 18 | X | | | X | | | Tracción simple |
| 19 | X | | | X | | | Tracción simple |
| 20 | X | | | X | | X | Tracción grano entrecruzado |
| 21 | X | | | | X | X | Tracción grano entrecruzado |
| 22 | X | | | | | X | Tracción grano entrecruzado |
| 23 | X | | | | X | X | Tracción grano entrecruzado |
| 24 | X | | | | X | X | Tracción grano entrecruzado |
| 25 | X | | | | | X | Tracción grano entrecruzado |
| 26 | X | | | | | X | Tracción grano entrecruzado |

Tabla 4.28: Características del tipo de fisuras

CONCLUSIONES

En esta sección se presentan las principales conclusiones obtenidas de la revisión bibliográfica y de los análisis teóricas y experimentales efectuadas, de acuerdo a los resultados y cumpliendo los objetivos planteados.

- Se elaboraron las probetas según la norma de diseño de maderas COPANT, realizando el ensayo a flexión satisfactoriamente en el laboratorio de maderas.
- Para la especie Aliso (*Alnus Jorullensis*) se obtuvo una densidad básica de 0.64 gr/cm³, según normativa llega a clasificarse como una madera liviana, la duración para el proceso de secado al aire libre fue alrededor de 70 días, el promedio del contenido de humedad inicial de las 26 probetas es de 60% llegando a un contenido de humedad final promedio de 11.65 %, ajustándose posteriormente los cálculos para un contenido de humedad del 12%.
- El incremento de la capacidad de carga experimental soportada por las probetas reforzadas en el ensayo, han superado la hipótesis planteada en un 48,74% llegando a incrementar en un 88,74% a las cargas de las probetas sin refuerzo, de la misma manera se obtuvo un desplazamiento experimental mayor en las reforzadas en el orden de 22%, es preferible un bajo módulo elástico en la fibra ya que el uso de fibras muy rígidas para el refuerzo de vigas de madera no resulta efectivo. En cuanto a las deformaciones calculadas teóricamente éstas difieren en un 21% menor a las deformaciones experimentales lo que podría señalar como válida la teoría elástica lineal de la fórmula general de la deformación por encontrarse del lado de la seguridad.
- Al evaluar la rigidez a la flexión por el método sección transformada se observó una diferencia alrededor del 12% de incremento con la hallada experimentalmente, esta diferencia irá en descenso conforme vaya en aumento el peralte o densidad de la viga.
- El módulo de elasticidad experimental de probetas reforzadas supera al módulo teórico del sistema hallado con la ecuación de fracción volumétrica en un 60%.
- El momento último teórico hallado por el método de Arguelles para probeta reforzadas fue menor alrededor del 10% en comparación con los momentos obtenidos con los datos experimentales. En cuanto al incremento de momento experimental con las probetas reforzadas y sin refuerzo fue de 89%.

- Aplicando la fórmula general de deformación para probetas reforzadas se obtiene una diferencia del 21% menor que las deformaciones halladas en el ensayo hasta el límite elástico comprobando de esta manera la teoría elástica de la fórmula.
- La mejora del MOR (módulo de ruptura) para las probetas reforzadas es del 81.45%, la mejora del MOE (módulo de elasticidad) es 128.98% y la mejora de ELP (límite de elasticidad) 91.87%, respectivamente.
- Se concluyó que el 96% de las probetas reforzadas y sin reforzar presentan una falla a tracción en las fibras, a excepción de una que falló a cortante, el 73% de las probetas presentaron la falla exactamente en el centro del vano y en el 15% se observó la influencia de la inclinación de las fibras tratándose en su mayoría de las probetas reforzadas, la delaminación del refuerzo se observó en todas las probetas reforzadas, finalmente el 32% experimentaron un esquema de fallo a tracción simple y el 68% tracción a grano entrecruzado.
- Para las probetas con refuerzo se presentaron fallas dúctiles evidenciando un comportamiento elástico más pronunciado hasta llegar a su carga de ruptura donde se presenta la falla por la combinación de esfuerzo a tracción, cizallamiento y delaminación o despegue del adhesivo, debido a que los esfuerzos en las fibras del material fueron tan altos, que el pegante no alcanza a soportar estos esfuerzos y deja que las capas unidas se desprendan. Si se elige el adhesivo apropiado se posibilita que la pieza llegue a su total resistencia sin que previamente se produzca delaminación.
- Con la carga experimental hallada al reforzar la probeta fue posible determinar una posible nueva sección equivalente, adoptando la sección de 6,5cmx14cm para todas las probetas reforzadas a excepción de la probeta número cuatro a la cual correspondería una sección de 4x16.5cm debido a su menor capacidad de carga.
- La madera es un material que favorece la combinación de esfuerzos presentes en un ensayo de flexión, pero hay algunas especies que fallan, como el Aliso que es frágil y presenta deformaciones muy pequeñas en presencia de cargas. Por esta razón las vigas reforzadas se desempeñan mucho mejor, ya que las deformaciones aumentan, la falla de los elementos se presenta muy lentamente y en casos en que se necesite evacuar una edificación, hay el tiempo suficiente para hacerlo.

RECOMENDACIONES

- Es importante proteger la fibra de refuerzo contra la intemperie, con el objetivo de minimizar los efectos de las altas temperaturas en la fibra en caso de incendio, además de proporcionar un agradable efecto estético.
- Se recomienda utilizar adhesivos de baja densidad para la obtención de mejores resultados, debido a la mayor capacidad de penetración y mejor impregnación de los poros y fibras de la madera, de esa manera se produciéndose una correcta transmisión de esfuerzos entre los diferentes materiales.
- Se sugiere como porcentaje máximo de refuerzo 3.3% en relación a la altura del elemento estructural, considerando que a partir de este valor la ganancia proporcionada por la armadura no es significativa.
- Preparar el adhesivo de la manera como el fabricante lo recomienda como, por ejemplo, mezclar las proporciones exactas, aplicar la cantidad especificada, dejar secar el tiempo indicado para que el desempeño sea el esperado.
- Se recomienda que para todo tipo de análisis de costos se considere los costos indirectos que permiten tener un mayor alcance sobre los posibles gastos a realizar en el paquete de trabajo.
- Se recomienda que, al no tener una norma establecida para el reforzamiento estructural, continuar empleando nuevas alternativas de reforzamiento moderno y demostrando el impacto y viabilidad en proyectos en los diferentes elementos estructurales. También debe tenerse en cuenta que, en estructuras reales, se aplican cargas cíclicas, por lo que las relaciones tensión-deformación variarán a partir del segundo ciclo. Por esta razón, es importante desarrollar modelos de elementos de madera reforzados que permitan predecir la carga de rotura ante patrones de cargas cíclicas.