

## **1. ANTECEDENTES**

### **1.1. Problema**

Necesidad de cubrir grandes luces sin apoyos intermedios con elementos estructurales seguros, confortables y estéticamente admirables que armonicen con la naturaleza.

En los últimos años, la ciudad de Tarija está confrontando un desarrollo importante que conlleva a incrementar considerablemente la construcción de obras civiles como parqueos, campos deportivos, piscinas, salones de eventos, auditorios, iglesias de grandes capacidades provistas de cubiertas de grandes luces y agradables a la vista de los nuestros y sobre todo de los visitantes. Sin embargo, el conocimiento y el empleo de nuevos materiales y las tecnologías de la construcción se desarrollaron muy poco y es necesario abrir nuevas opciones.

Usando la madera aserrada de la forma tradicional será imposible diversificar diseños debido a que la principal limitante es la escuadría y la longitud, mismas que están en función de tamaño del árbol.

#### **1.1.1. Planteamiento**

En nuestro medio, las construcciones, en un alto porcentaje, tienen el mismo aspecto físico, es decir, son de acero, ladrillo y cemento. Desde años no se tienen la iniciativa de incorporar nuevos materiales y/o técnicas que traen muchos beneficios estructurales y arquitectónicos, permitiendo la construcción de obras singulares que den identidad propia a nuestra ciudad.

En muchos casos se hacen necesarios ambientes de gran luz (sin molestosas columnas intermedias) y que brinden seguridad y confort térmico, acústico, visual.

Los tinglados metálicos no cubren las expectativas de un buen aislamiento térmico y acústico, además que tienen muy baja presencia estética.

Las estructuras de madera presentan un aspecto armonioso con la naturaleza y agradable a la vista. Sin embargo, sin la industrialización se tiene dimensiones limitadas y un alto porcentaje de desperdicio, que con la técnica del laminado encolado puede ser utilizado en la conformación de los elementos.

Por lo tanto, como sucede en varios países, debemos buscar, estudiar y documentar alternativas ecológicas sostenibles para optimizar a lo máximo el uso de los recursos madereros en la construcción y especialmente en cubiertas.

### **1.1.2. Formulación.**

**¿Por qué actualmente en nuestro medio no se usa elementos estructurales de madera laminada?**

En Tarija y en el país, en la actualidad no se incursionó en el uso de maderas laminadas porque que se tiene reducido conocimiento de este producto en el campo estructural, aunque en estos últimos años se desarrolló un avanzado crecimiento en la fabricación de maderas terciadas, aglomeradas y similares para carpintería y encofrados.

En tiempos pasados se usaba madera maciza para la construcción ya que se contaba con bosques de buena calidad y eran explotados sin control, generando altos porcentajes de desperdicio y nadie se preocupaba por el impacto ambiental. En la actualidad es un tema prioritario la explotación sostenible.

### **1.1.3. Sistematización.**

**¿Deberíamos de usar madera laminada?**

Deberíamos de usar madera laminada por que ofrece múltiples ventajas como la obtención de elementos estructurales de geometrías y dimensiones muy generosas, construcciones admirables, variedad ilimitada de diseños según el proyectista imagine.

A demás permite el aprovechamiento a lo máximo de la madera de cada árbol explotado, mejora la relación beneficio - impacto ambiental.

Al ser obtenida de un recurso natural renovable, con un adecuado plan de explotación, se garantiza la disponibilidad de este material durante el tiempo caso que no ocurre con los aceros, plásticos u otros derivados de los minerales o del petróleo por que en algún momento se van agotar.

### **¿Por qué usar elementos en arco de madera laminada para cubiertas?**

Se podría usar cualquier otro elemento, pero como el objeto es cubrir grandes luces, el arco es la mejor opción para este propósito. Se trabajará con arcos funiculares y semicirculares ya que tienen la característica de estar sometidos esencialmente a compresión axial y los materiales tienen mejor respuesta estructural ante este tipo de esfuerzo.

### **¿Qué especie de maderable usar?**

La bibliografía recomienda madera liviana y no resinosa para que permitan el ingreso del pegante a sus poros y no afecten la acción de adherencia respectivamente.

En países industriales de madera laminada se utiliza generalmente las especies de pino radita y Oregón. En nuestro medio se dispone de esta especie en pequeñas reforestaciones. El radita y la casuarina podrían ser la materia prima ideal para ser aprovechadas de plantaciones cultivables en el futuro.

Años atrás, el pino del cerro era el favorito para dinteles (“umbrales”) y vigas redondas (“costaneras”) por su costo reducido, durabilidad y disponibilidad en bosques naturales propios de nuestra provincia.

En consecuencia con lo mencionado se propone el trabajo de instigación “Madera Laminada Encolada - Aplicación en arcos para cubierta” utilizando la especie “Pino del Cerro” disponible en nuestro medio.

## **1.2. Objetivos:**

### **1.2.1. General.**

Demostrar que es posible el uso estructural de la madera laminada encolada de pino del cerro y su aplicación en arco para cubiertas de gran luz; mejorar las prestaciones de la madera diversificando dimensiones y geometrías.

### **1.2.2. Específicos.**

- Determinar los valores del esfuerzo resistente en condiciones últimas para las propiedades mecánicas de cizallamiento en la línea de cola, compresión paralela a las fibras y flexión estática bajo los procedimientos y consideraciones estadísticas exigidas por las normas COPANT MADERAS 463, 464, 465 y ASTM D-143.
- Determinar los esfuerzos admisibles y los módulos de elasticidad de diseño para la madera laminada de pino del cerro encolada con resina de poliéster.
- Contrastar y analizar el comportamiento mecánico de la madera laminada encolada con respecto a la madera maciza de una misma especie.
- Plantear un método constructivo de curvado, encolado y prensado con su respaldo teórico-práctico.
- Proponer de forma ilustrativa el diseño de cubierta sustentada en arcos de madera laminada encolada.
- Realizar el diseño estructural de la cubierta de la iglesia católica de la comunidad de San Andrés sustentada en arcos semicirculares de madera laminada.
- Analizar los costos de la cubierta en arco de madera laminada para la iglesia de San Andrés.

## **1.3. Justificación:**

### **1.3.1. Teórica**

La madera laminada tiene un gran potencial para ser utilizada en la construcción como elemento de cubierta de gran luz. Por lo que se debe estudiar las características y

propiedades físico mecánicas de este tipo de madera para conocer sus prestaciones y sus limitaciones.

A demás, el presente trabajo de investigación fomentará al uso optimizado de madera favoreciendo a las políticas de medio ambiente que en la actualidad son preocupación del mundo entero. Es importante aclarar que la explotación de bosque es necesaria pero de manera sostenible ya que todo ser vivo, como también lo son los árboles, tiene un ciclo de vida donde al final envejecen y mueren; por tal motivo necesitan ser renovados. Con este enfoque se plantea la obtención de madera laminada a partir de árboles maduros que si no son aprovechados pasaran a ser desperdicio.

### **1.3.2. Metodológica**

Es necesario realizar una investigación teórica experimental ya que los criterios y la información recopilada debe ser validada mediante pruebas de laboratorio. Los resultados de laboratorio se contrastan con la bibliografía disponible para aceptar o rechazar y proponer nuevos valores.

### **1.3.3. Práctica**

Las cubiertas de gran luz son muy útiles, pero construirlas con reducido peso propio y estéticamente aceptables, muchas veces es complicado; por lo que la Madera Laminada Encolada (sobre todo en arcos) es una alternativa bastante atrayente ya que se puede obtener grandes claros con diversidad de secciones y geometrías, reducir la sección auto soportante, reducir tiempos de construcción entre otros aspectos. Por tal motivo es necesario estudiar y ganar dominio sobre las características, propiedades, comportamiento estructural y normativas de los elementos de madera laminada.

## **1.4. Hipótesis**

Mediante el encolado de láminas de pino de cerro con resina de poliéster (madera laminada) se obtienen elementos estructurales rectilíneos y/o curvos de dimensiones transversales y longitudinales que no se podría obtener con elementos macizos; conservando o mejorando las características físico-mecánicas respecto a la madera maciza.

## **1.5. Alcance**

Se realizará un estudio de la madera laminada encolada elaborada de una sola especie forestal siendo el pino del cerro el elegido por su disponibilidad en nuestro medio y sus características de densidad, duración, resistencia y precio frente a otras maderas.

De las colas epóxicas disponible en nuestro medio, se selecciona aquella que más se adecue a nuestro objetivo. Se verifica el comportamiento inmediato frente al incremento de calor, intemperismo, exposición a los rayos solares y la adherencia en la línea de encolado.

Se elaborará 20 probetas para cada ensayo de acuerdo a las normas COPANT MADERAS 463, 464, 465. Los ensayos a realizar son de cizalladura en la línea de encolado, compresión paralela a la fibra y flexión estática para madera laminada encolada.

Los datos de las propiedades mecánicas de la madera maciza aserrada de Pino del Cerro se obtendrá de la tesis “Estudio para Determinar las Propiedades Mecánicas de la especie Pino del Cerro (*Podocarpus Parlartorei*)” desarrollado por Lilian Karina Castro Garcia en el año 2005, información disponible en la biblioteca central de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Se diseña la cubierta en arco para la iglesia católica de la Comunidad de San Andrés que actualmente se encuentra en construcción de la planta baja.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. La madera**

Es un material sólido, poroso, heterogéneo y de estructura celular conformado por unidades estructurales básicas denominadas células vegetales. Tales células tienen un aspecto tubiforme<sup>1</sup>.

La madera se considera como el material de los troncos y ramas de árboles y arbustos desprovistos de corteza. Independientemente de la especie, la madera puede ser considerada como un material biológico, anisotrópico e higroscópico<sup>2</sup>.

#### **2.1.1. La madera como materia prima**

La madera es históricamente uno de los materiales más utilizados por el hombre.

La madera como materia prima para la industrialización tiene muchas ventajas frente a otros materiales ya que es un recurso renovable que mediante un manejo sostenible, es decir, armonizando su aprovechamiento con su velocidad de renovación, se puede explotar y dar valor agregado en varios tipos de manufactura.

#### **2.1.2. Formación y estructura de la madera**

Durante cada período de crecimiento se forman típicas células del inicio del crecimiento en el período de primavera, que son denominadas células de madera temprana o células de madera de primavera y posteriormente típicas células del término del período de crecimiento anual, que son denominadas células de madera tardía o células de madera de verano. Así anualmente los árboles que crecen en las zonas templadas, es decir, con estaciones bien marcadas, forman una zona de madera constituida por madera temprana y otra de madera de verano. Estos dos tejidos de madera formadas por un mismo año constituyen un anillo de crecimiento anual.

---

<sup>1</sup> Messer Soubelet, 2007 – ‘Ananias, 1993’

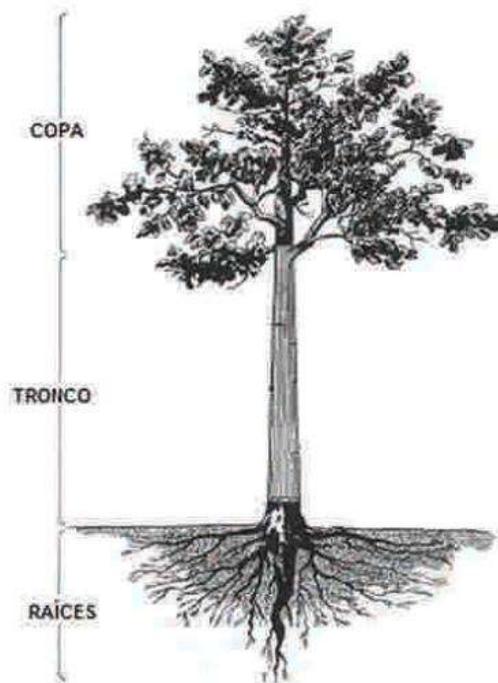
<sup>2</sup> Messer Soubelet, 2007 – ‘Fritz, 2004’

Los anillos anuales se pueden apreciar como bandas concéntricas en la sección transversal de un tronco o rama. Cada anillo de crecimiento anual corresponde a un año de crecimiento, el número de anillos de crecimiento puede determinar la edad de un árbol.

Además, en las secciones transversales de los troncos se puede observar dos zonas diferentes de coloración. La zona interior, normalmente más oscura, se denomina duramen o pellín. La zona externa, se llama albura o hualle.

El proceso de transformación de la albura en duramen, duraminización, implica cambios en la composición química de la madera, que le sirven de tóxicos naturales y la hacen más resistente a la biodegradación. La duraminización puede reducir la permeabilidad de la madera afectando los futuros procesos de secado e impregnación.

### 2.1.3. Las partes del árbol



*Figura 1: el árbol y sus componentes*

a) **Copa.-** ramas y hojas que forman la parte superior. A través de las hojas los árboles respiran y realizan la fotosíntesis. Las flores y frutos son reproductores.

b) **Tronco o fuste.-** constituido por millones de células leñosas como las fibras, radios y vasos que desempeñan diferentes funciones como, sostén, conducción y almacenamiento de sustancias de reserva.

c) **Raíz.-** penetra el suelo, absorbe agua y nutrientes

La madera que se produce en las ramas de los árboles presenta algunas diferencias con la madera del tronco como la densidad de la madera, el largo de las fibras dependiendo de la especie.

#### **2.1.4. Componentes del tronco:**

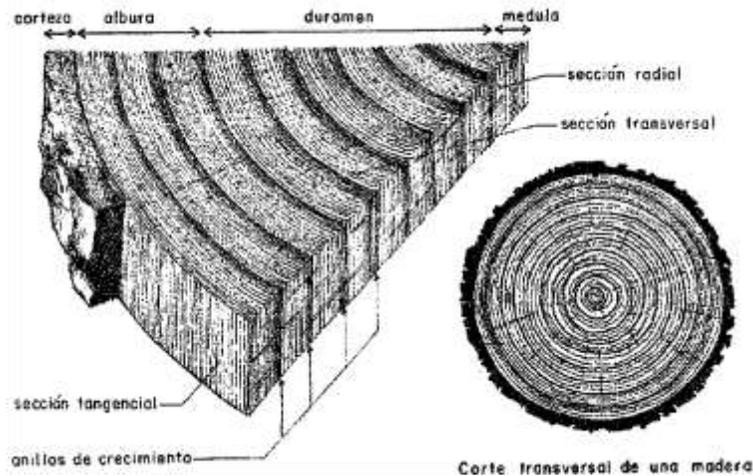
a) **Médula.-** situada en el centro del tronco, constituida por células muertas, tiene forma cilíndrica, es más blanda que el resto de la madera que la circunda, de ella parten los radios medulares hacia la corteza, diámetro varía desde menos de un milímetro hasta varios centímetros según la especie.

b) **Duramen.-** es la parte que más se emplea en la construcción. Es llamada corazón, rodea la médula, es más oscura que el resto, su proporción depende de la especie y edad del árbol.

c) **Albura.-** capa de color claro, es la parte viva del árbol donde circula la sabia bruta. Es la madera más joven que con el tiempo se convierte en duramen. Mientras más joven es el árbol más abundante es la albura.

d) **Cambium.-** es la capa que engendra la madera, es difícil de observar a simple vista. Origina el crecimiento en grosor del tronco formando capas concéntricas de células de madera en gran proporción hacia el interior y células de corteza hacia el exterior. Periódicamente conforma los anillos de crecimiento.

e) **Corteza.**- capa exterior llamada suber o corcho, compuesta por células muertas y cumple función protectora. Su capa interior se llama liber que está formada por células vivas por las cuales se realiza el traslado y depósito de las sustancias.



*Figura 2: componentes del Tronco*

### 2.1.5. Microscopía de la madera

La madera crece en la naturaleza en condiciones climáticas, geográficas y de suelos muy diversos. Esta diversidad de factores afecta el crecimiento y las características de la madera en relación con su estructura celular.

La madera está conformada por células alargadas y dispuestas en la dirección del eje longitudinal del árbol, que cumplen esencialmente la función de sostén del propio árbol y conductora de savia.

A nivel de estructura celular, se pueden clasificar las especies arbóreas en dos grandes grupos de árboles:

- Coníferas
- Latifoliadas

### a) Coníferas

Las especies que forman el grupo de las coníferas tienen un plan leñoso ordenado y simple, constituido aproximadamente en un 90% por traqueidas longitudinales, ordenadas en filas radiales.

Son las especies más antiguas de bosques desarrollados en zonas frías y templadas, presentan un tronco recto, cónico hasta su ápice (extremo superior) y revestido de ramas. Se caracterizan por la homogeneidad de las especies (pinos, cipreses, abetos).

### b). Latifoliadas

Las latifoliadas se distinguen por la diversidad de tipos de células presentes lo que da lugar a planes leñosos más complejos por lo cual no se diferencian claramente los anillos de crecimiento. La madera de las latifoliadas es heterogénea.

#### 2.1.6. Anisotropía e higroscopia de la madera

Según sea el plano o dirección que se considere respecto a la dirección longitudinal de sus fibras y anillos de crecimiento, el comportamiento tanto físico como mecánico de la madera, presenta resultados diferentes.

Debido a este comportamiento estructural desigual, es necesario establecer tres ejes: eje radial, eje tangencial y eje longitudinal. Estos ejes son ortogonales entre, por tal motivo también puede denominarse la anisotropía como ortotropía.

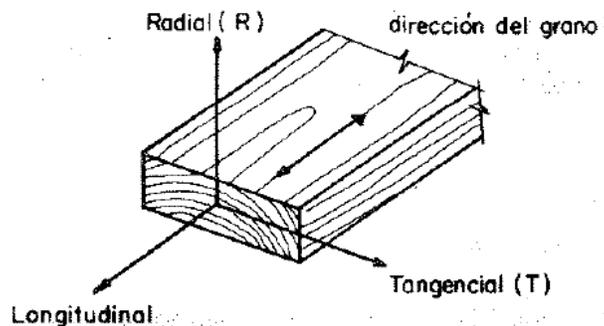


Figura 3: Direcciones ortogonales de la madera

Se considera material higroscópico por que tiene la capacidad de captar y ceder humedad del ambiente.

## **2.2. La Madera Laminada Encolada (MLE)**

### **2.2.1. Definición de la madera laminada**

Madera laminada es la unión de tablas a través de sus cantos, caras y extremos, con su fibra en la misma dirección, conformando un elemento no limitado en escuadría ni el largo, y que funciona como una sola unidad estructural<sup>3</sup>.

### **2.2.2. Generalidades de la madera laminada**

Es un material acumulador natural de energía solar, poco necesitado de energía de transformación, no productor de agentes contaminantes y completamente reutilizable o reciclable

Los elementos de madera laminada están formados por un determinado número de láminas, dependiendo del sistema de unión, se tienen tres diferentes tipos de madera laminada. Si el elemento de unión es clavo, será madera laminada clavada; si es perno, será madera laminada apernada y si es por medio de cola, ésta se llamará madera laminada encolada, la cual es más conocida comúnmente como "madera laminada"<sup>4</sup>.

Si las láminas son paralelas al plano neutro de flexión del elemento, se dice que la laminación es “horizontal, y cuando las láminas son normales al plano neutro de flexión, se dice que la laminación es “vertical”

---

<sup>3</sup> Manual de Madera Laminada – ‘Pérez, V. A. 1979’

<sup>4</sup> Barreto Castañeda,2013 – ‘Perez 1992’

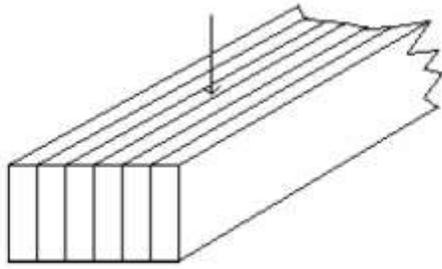


Figura 4a: Laminado vertical

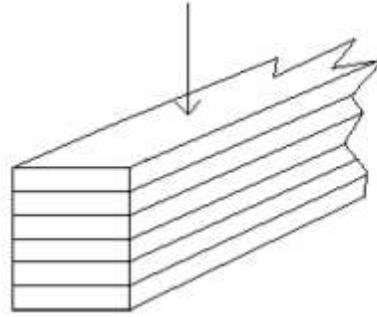


Figura 4a: Laminado horizontal

Es una alternativa para producir y vender un insumo con valor agregado ya que posibilita contar en obra con piezas de largo y sección inusual, incluso curvas o de sección variable.

### 2.2.3. Historia de la madera laminada encolada estructural

La madera laminada es una tecnología constructiva con un amplio desarrollo en el mundo. La técnica de laminar madera ha sido utilizada durante muchos años en la fabricación de muebles, artículos deportivos y otros productos. Sin embargo, su aplicación en estructuras data desde que el carpintero de la corte prusiana Otto Hetzer, quien el 22 de Junio de 1906 obtuvo la primera patente mundial de su invento “el encolado de láminas de madera de tablas para ejecutar vigas y arcos, el procedimiento de encolado lo realizaba con un producto ligante no disoluble por la humedad.

Los primeros casos conocidos los encontramos en el antiguo Egipto, alrededor de 3500 a. C., cuando los artículos de madera sólida se hicieron con chapas pegadas transversalmente, ocasionado por la falta de buenas maderas en esa zona. Esto ocasionó que se crearan tableros con un sustrato de madera de baja calidad, y maderas finas en las vistas, con el agregado de una mejor resistencia estructural. Otro antecedente conocido en la antigüedad es la elaboración de los Scutum romanos.

**Scutum:** era el término en latín para referirse al escudo de forma semicilíndrica que llevaban los legionarios romanos.

El arquitecto Francés Philibert Delorme quien construyó el Palacio de las Tullerías en el siglo XVI, tuvo por primera vez la idea de utilizar madera laminada para dar acabados curvos.

El desarrollo de la madera laminada está íntimamente relacionado con el avance de la tecnología de los adhesivos. La caseína fue introducida alrededor del año 1900. En 1912 fue introducido el fenol formaldehído, en el año 1930 la urea formaldehído, que no fue usada en forma intensiva hasta la segunda guerra mundial, época en que apareció el resorcinol formaldehído.

Durante la primera guerra mundial, se empleó laminados de madera en la industria de la aviación. Durante la segunda guerra mundial, se desarrollaron adhesivos sintéticos, los cuales permitieron dar un nuevo impulso a la madera laminada y su aplicación se extendió a la fabricación de puentes y construcciones marinas, en donde las condiciones de uso exigen alto grado de resistencia a condiciones ambientales muy difíciles.

La compañía de Havilland, en 1936 presento a la Real Fuerza Aérea Británica una propuesta de construir un avión de guerra en su mayor parte de madera encolada muy resistente y ligera de caoba o abedul. El 25 de noviembre de 1940 realiza las pruebas de vuelo el avión de madera encolada denominado “Mosquito”.

Actualmente, las estructuras de madera laminada constituyen un importante elemento de construcción, especialmente para edificios de grandes luces, iglesias, gimnasios, hangares, fábricas, bodegas, coliseos cubiertos, puentes, entre una extensa gama de aplicaciones, ya que permite la creación de estructuras estéticamente agradables y de grandes posibilidades de diseño arquitectónico y buena construcción.

#### **2.2.4. Ventajas y desventajas de la madera laminada encolada**

##### **a) Ventajas:**

- 1) **FLEXIBILIDAD:** El adhesivo permite el uso de tablas cortas y angostas que, unidas eficientemente, pueden conformar piezas estructurales de cualquier espesor, largo, ancho y de formas no restringidas. Se consiguen vigas curvas, arcos de sección variable.
- 2) **SECADO:** La laminación en tablas menor de 2" permite secar la madera fácilmente al contenido de humedad deseado evitando defectos de secado tanto en las láminas como en la estructura en cuestión.
- 3) **OPTIMIZACIÓN:** El método de fabricación permite el uso de láminas de menor calidad en las zonas de "bajo esfuerzo de trabajo", con la consiguiente economía y utilizar madera de mejor calidad sólo en las zonas de mayor sollicitación (mayor esfuerzo). Además es posible usar combinaciones de distintas especies.
- 4) **ESTETICA:** La madera laminada permite diseñar elementos que son prácticos y artísticos, en los cuales la sección transversal puede variar según los esfuerzos a que queda sometido el elemento. El elemento terminado no necesita estar oculto o tener una caja de ubicación, debido a que es estéticamente agradable.
- 5) **RESISTENCIA AL FUEGO:** Los elementos de madera laminada se queman más lentamente y resisten la penetración del calor. Esto no significa que la madera laminada no sea combustible (el avance de la combustión es muy lento, 0.6 mm/ minuto)<sup>5</sup>.
- 6) **LIVIANIDAD:** Los elementos laminados tienen una baja razón peso/resistencia, por lo cual pueden ser levantados y puestos en servicio con un bajo costo, además de necesitar muy poco de la sección para auto soportarse.
- 7)  **AISLACIÓN TÉRMICA:** la madera tiene una transmisión térmica inferior a los materiales tradicionales (acero y hormigón), lo que significa excelentes propiedades aislantes.

---

<sup>5</sup> Manual de madera laminada – ‘Pérez, V. A. 1979’

8) **RESISTENCIA QUÍMICA:** En ambientes ácidos o alcalinos no reacciona con agentes oxidantes o reductores.

**b) Desventajas:**

- 1) Comparadas con la madera sin laminar, son más costosas. El factor económico comprende tres ítems adhesivo, mano de obra y madera.
- 2) El adhesivo debe estar condicionado al uso que se va a dar al elemento. Los adhesivos que se requieren para estructuras que van al exterior son de elevado costo y no se produce en nuestro medio.
- 3) No siempre se pueden producir en obra, lo cual implica un costo adicional por transporte, especialmente cuando son elementos de gran longitud y gran curvatura son difíciles de manipular y transportar, lo que incide en el costo final del elemento de madera laminada.
- 4) La resistencia puede verse afectada por el contenido de humedad. La durabilidad de estos elementos puede disminuirse por las presencia de hongos. Se hace necesario tratamientos preventivos y mantención al elemento.

**2.2.5. Los adhesivos**

Se entiende por adhesivo, todas aquellas sustancias o mezclas, capaces de mantener materiales unidos, mediante una ligazón de sus superficies de contacto.

La adherencia es un estado en que dos superficies se mantienen unidas por medio de fuerzas interfaciales, que pueden consistir en fuerzas de valencia o por acción de interconexión.

El encolado es la vinculación más efectiva, no acarrea disminución de sección y su efectividad aumenta en algunos casos la resistencia nominal de las secciones.

### **a) Adherencia mecánica**

El criterio más antiguo y ampliamente aceptado dice que la cola a un principio es fluida, se introduce en las cavidades de la estructura de la madera y luego se solidifica. La resistencia resultante se debe al entrelazamiento o trabazón mutua de dos sólidos fuertes: la madera y el adhesivo, en un breve periodo empieza a gelatinizarse, transformándose en un semi sólido y finalmente, la capa superficial o película, se endurece constituyendo un sólido de suficiente resistencia, que permite mantener la ligazón así constituida.

### **b) Adherencia específica**

Puede demostrarse que una unión encolada entre dos superficies lisas puede tener una resistencia a la tracción mucho más grande que una película independiente de la misma cola. Este hecho indica claramente que existe otro tipo de adherencia, que recibe el nombre de adherencia específica y que se debe a las fuerzas de atracción molecular, entre el adhesivo y las superficies unidas, y que es independiente de cualquier porción de adhesivo que penetre en los cuerpos que se van a unir.

Esta distinción ayuda a entender mejor el proceso de encolado pero no es una distinción muy marcada puesto que la adherencia mecánica es inseparable de la adherencia específica.

## **2.2.6. Adhesivos para madera laminada**

Los adhesivos comúnmente utilizados en la fabricación de madera laminada estructural son:

**a) Resorcinol Formaldehido.** De color oscuro, alta resistencia a la exposición directa a la intemperie (humedad) y temperaturas elevadas, pudiendo usarse para todas las condiciones de servicio.

**b) Urea Formaldehido.** Menor resistencia a exposiciones prolongadas a la intemperie, se limita su uso a ambientes interiores, línea de cola casi invisible, económica y de mezclado fácil.

**c) Fenol Formaldehido.** Adhesivo para encolar en caliente (110-140 grados centígrados), adecuado para la fabricación de tableros de madera con líneas de cola de color marro oscuro.

**d) Caseína.** Usado solamente en las primeras estructuras, reemplazándose más tarde por resinas sintéticas. Es limitado a ambientes interiores.

**e) Melamina formaldehido.** De menor duración, se aplican adecuadamente para servicio interior, en donde no están sometidos a exposiciones prolongadas a la intemperie y a condiciones de humedad. Se les conoce como del tipo termo fraguado, a pesar de que curan a la temperatura ambiente, debido a que no se pueden refundir o ablandar con el calor una vez curados.

**f) Resinas sintéticas termoplásticas.** Basada en emulsiones de acetato de polivinilo, partículas disueltas en agua y endurecidas por evaporación, de resistencia muy elevada en condiciones normales pero resistencia muy reducida en condiciones adversas.

En los últimos años se observa una clara tendencia a utilizar combinaciones de adhesivos con el fin de aprovechar las mejores propiedades de cada uno de los componentes.

### **2.2.7. La resina de poliéster**

El poliéster es un polímero cuya consistencia es líquida y algo viscosa que pasa a estado sólido al agregarlo un acelerador y un catalizador. La resina de poliéster es sumamente resistente a condiciones de presión, a productos químicos, a la humedad y al calor.

**a) Acelerador de cobalto.-** Cuando se agrega el acelerador de cobalto a la resina, no se causa ninguna reacción de endurecimiento. Sólo se produce resina de poliéster pre acelerada que puede ser guardada por un tiempo moderado.

**b) catalizador de la resina de poliéster.-** también conocido como Peróxido de Metil Etil Cetona o Peróxido de Mek es un peróxido orgánico que en contacto y mezcla con una resina acelerada y con el empuje de la temperatura ambiente adecuada, se descompone en radicales libres. Esos radicales libres son los que provocan la reacción de endurecimiento.

Las proporciones de mezcla recomendadas para climas templados son para cada 100 g de resina, utilizar 1,5% de acelerador de cobalto y 2% de catalizador. Es importante que los ingredientes queden bien integrados ya que, de lo contrario, podrían quedarse sectores sin solidificar.

Existen varios tipos de resina como resina transparente, clara, uv. Sus características referenciales son:

Tabla 1: Propiedades de la resina de poliéster

PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
Densidad	1,1 – 1,2	(g/cm <sup>3</sup> )
Viscosidad a 25°C	150 – 750	(cP)
Resistencia a tracción	50 – 75	(Mpa)
Resistencia a Flexión	80 – 150	(Mpa)
Módulo a Flexión	3500 – 4500	(Mpa)
Tiempo comienzo de endurecido	10	(min)

*Fuente: Gazechim Composites Ibérica*

### 2.2.8. Proceso de fabricación de la madera laminada a nivel industrial

La madera laminada tiene un proceso relativamente sencillo pero muy sensible en cada uno de sus pasos, por lo tanto es importante controlar factores como la humedad ambiental, el tamaño de láminas; cantidad y tipo de adhesivo a utilizar.

Este proceso consiste en pasos muy específicos que cuales son: dimensionamiento de la madera en láminas, secado, bonificado de la madera, fabricación de las uniones dentadas o

*finger joints*, encolado y la aplicación de presión. Cada uno de estos procesos se detalla a continuación.

**a) Dimensionamiento de láminas.-** Se desorilla (cuadra) la madera aserrada procedente del bosque. Se elabora tablones tomando en cuenta que el espesor no sea mayor de 5 cm para obtener un secado en menor tiempo y de mejor calidad. Dimensiones menores de 3 cm son antieconómicas pues se debe utilizar mayor tiempo de máquina y mayor número de líneas de cola conforme se sugiere en investigaciones y prácticas constructivas.

Este proceso se realiza en un aserrío horizontal que realiza los cortes con mucha precisión.

**b) Bonificado.-** El proceso de bonificado consiste en seleccionar y desechar los nudos y la madera podrida, lo que permite que este material tenga menos incertidumbre en sus propiedades mecánicas.

En el bonificado se descartan los nudos que exageren su dimensión respecto a la de la madera además se debe garantizar que los nudos sanos aceptados no queden en zonas críticas de esfuerzos.

**c) Secado.-** El secado es uno de los aspectos más importantes en el proceso de la madera laminada, ya que de un buen secado se deriva un buen producto. Los beneficios de la madera seca son:

- **Reducción del peso:** la madera seca puede pesar entre un 25 % y 50 % menos que en estado verde.

- **Estabilidad dimensional:** Cuando la madera está en la humedad de equilibrio no sufre cambios apreciables en sus dimensiones.

- **Resistencia mecánica:** Cuando el agua libre ha sido eliminada por completo hasta llegar a una humedad cercana al 10 %, variando este valor entre especies, la resistencia mecánica sube aproximadamente un 33 %.

- **Adhesivos:** Con un secado adecuado se obtienen líneas de colas más estables y resistentes.

El secado para la fabricación de madera laminada en lo posible debe ser por métodos artificiales ya que estos garantizan secados más uniformes y con mejor calidad en tiempos relativamente cortos.

Hay que tener especial cuidado con las diferencias de humedades de cada lámina, esta no debe ser superior al 4% entre tablas contiguas. Se debe tener un contenido de humedad que se sitúe dentro de los límites aptos para su encolado. Las láminas deben tener un contenido de humedad menor del 15% para su óptimo funcionamiento<sup>6</sup>.

Si el contenido de humedad es diferente a la humedad de equilibrio habrá cambios dimensionales, estos producirán tensiones dañinas que si ocurren durante el periodo en el cual el adhesivo está en el estado de gel suave quedará permanentemente fisurado y por consecuencia habrá una unión débil.

**d) Uniones.-** Las láminas se empalman unas con otras en dirección horizontal mediante un proceso conocido como *finger joints* o de uniones dentadas, que son entalladuras múltiples en sus extremos.

El largo efectivo de los dientes del empalme debe ser de 15 mm asegurando el área suficiente de encolado para una adecuada unión estructural<sup>7</sup>.

Las uniones dentadas pueden ser verticales u horizontales, siendo las verticales las de principal uso en Europa y las horizontales en Estados Unidos, Canadá y Australia. El perfil

---

<sup>6</sup> Messer Soubelet, 2007

<sup>7</sup> Arbelaez Alzate, 2013 – ‘Demkoff, 2003’

vertical es un 9 % más resistente que el horizontal ya que presenta más área de encolado<sup>8</sup>.  
(Cumple para casos donde el ancho es mayor que el alto)

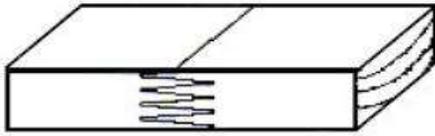


Figura 5a: Unión endentada horizontal

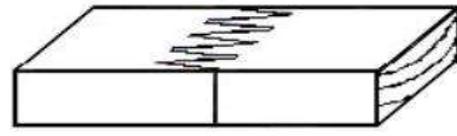


Figura 5b: Unión endentada vertical

**e) Cepillado.-** El cepillado es el proceso de preparación de las láminas para el encolado, este asegura una superficie uniforme. Las láminas se deben cepillar con una tolerancia que depende del tipo de cola a utilizar.

Se recomienda no dejar pasar más de veinticuatro horas entre cepillada y encolada para evitar la contaminación de la superficie de encolado.

**f) Encolado.-** Se agrega adhesivo en las caras superior e inferior de las láminas con un espesor constante de cola que varía de acuerdo con el tipo de pegante. La cantidad de cola, el tiempo de fraguado y el tiempo de aplicación depende de las especificaciones del fabricante.

El gramaje utilizado se puede verificar que está en la cuantía es correcta si al aplicar la presión se nota un leve lagrimeo en las uniones a lo largo de la línea de cola. Un lagrimeo excesivo indica presiones muy altas o cuantías muy altas de adhesivos o combinación de estos factores.

**g) Prensado.-** Se colocan la pieza con las láminas encoladas en una prensa y se aplica presión constante a lo largo de ella. Es importante monitorear las condiciones ambientales ya que los adhesivos son muy sensibles a cambios en la temperatura y humedad.

---

<sup>8</sup> Arbelaez Alzate , 2013 – ‘Batista, Rodrigo, Calil, & Mariano, 2002’

La presión se debe ejercer de forma uniforme aplicando al centro de la pieza y avanzando simétricamente hacia los extremos, de lo contrario, la viga quedará con presiones localizadas, lo que puede generar un decremento significativo en sus propiedades mecánicas.

La presión de prensado depende del espesor de las láminas y del tipo de madera; cuando se usa madera blanda se requiere una presión entre 0,6 y 0,8 MPa para láminas con espesores de 33 mm, mientras que con láminas de 45 mm se requiere entre 0,8 y 1 MPa. Para maderas duras se requiere mínimo 1 MPa<sup>9</sup>.

Controlar la presión es muy importante ya que una presión excesiva puede generar lagrimeo excesivo lo que lleva a una línea de cola pobre, y poca presión genera pobre contacto entre las superficies.

### **2.2.9. Aplicaciones de la madera laminada**

**a) Vigas.-** La viga es un elemento básico de un sistema estructural que se puede conseguir de madera aserrada pero se ve limitado el ancho, alto y largo por las características de especie maderable. Es ahí donde radica la importancia de las vigas de madera lámina ya que se pueden fabricar a gusto y necesidad del proyectista. Son ideales para cubrir grandes luces ya que con la técnica de la madera laminada se consigue fácilmente vigas de 30 m.

Una viga trabaja principalmente a la flexión y corte pudiendo también estar sometida a esfuerzos de tipo axial (tracción o compresión) que varían en las diferentes secciones de la luz. Con el empleo de madera laminada se puede optimizar la forma de la sección según los requerimientos. De esta manera se consigue un mejor aprovechamiento del material.

“Las vigas de sección variable, son muy agradables desde el punto de vista arquitectónico y prácticas desde el punto de vista estructural”.

---

<sup>9</sup> Arbelaez Alzate , 2013 – ‘AkzoNobel, 2009’

**b) Marcos.-** Es una opción muy atractiva de la madera laminada, desde el punto de vista arquitectónico. El marco triarticulado de madera laminada en los países anglosajones, es usado para iglesias y es llamado corrientemente marco Tudor<sup>10</sup>.

Al momento de diseñar se debe dar especial importancia al Momento flector y pandeo lateral.

**c) Arcos.-** La gran ventaja que ofrece el encolado para este tipo de estructuras, es que hace posible la construcción de arcos muy eficientes, partiendo de laminaciones delgadas. Estas no tienen competencia en cuanto a belleza y luz.

Resultan elementos esbeltos ya que su forma asemeja mucho el diagrama de momento Flector (funicular). Tomando en consideración la dificultad de transporte, los arcos se diseñan dependiendo de la luz, en arcos de una, dos, tres, cuatro o más partes.

El ensamble entre unidades se hace por medio de planchas metálicas. Esta solución arquitectónica es usada en todo el mundo, especialmente en Dinamarca, Bélgica, Holanda y Estados Unidos, país en el cual se han construido edificios con arcos de madera laminada que cubren más de 100 metros de luz<sup>11</sup>.

### **2.3. Propiedades físicas y mecánicas de la madera**

El aprovechamiento de una especie maderera como materia prima de cualquier proceso industrial depende, entre otros factores, de las propiedades físicas y mecánicas.

La madera es un material poroso y heterogéneo en su estructura y que presenta un comportamiento anisotrópico e higroscópico, sus propiedades físicas son variables.

#### **2.3.1. Propiedades físicas de la madera**

---

<sup>10</sup> Messer Soubelet, 2007 - 'Ortiz, 2004'

<sup>11</sup> Messer Soubelet, 2007 - 'Ortiz, 2004'

El conocimiento de las propiedades físicas básicas de la madera tales como contenido de humedad, densidad, permite aprovecharla de la mejor manera.

### 2.3.1.1. Contenido de humedad (CH)

La presencia de agua es indispensable para la vida de las plantas, por lo tanto es lógico que también se encuentre en la madera como agua ligada (savia embebida) en las paredes celulares y como agua libre, en el interior de las cavidades celulares.

Para determinar la humedad en la madera, se establece una relación entre masa de agua contenida en una pieza y masa de la pieza anhidra, expresada en porcentaje.

El contenido de humedad de la madera se calcula con la expresión siguiente:

$$CH = \frac{m_{H_2O}}{m_0} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Dónde:

*CH*: Contenido de humedad.

$m_{H_2O}$ : Masa de agua presente en la madera.

$m_0$ : Masa anhidra, es decir, sustancia madera al 0% contenido de humedad.

La masa de agua se puede escribir como:

$$m_{H_2O} = m_{húmeda} - m_0$$

Reemplazando en la ecuación anterior, obtenemos la siguiente fórmula, expresada como porcentaje:

$$CH = \frac{m_{húmeda} - m_0}{m_0} * 100 (\%) \quad (\text{Ecuación 2})$$

Esta ecuación se conoce como el “Contenido de humedad en base seca”, lo cual significa que la masa de agua que la madera contiene es superior a la masa de la pieza en estado anhidro,

en cambio cuando el denominador de dicha expresión matemática, se sustituye por la masa húmeda, se conoce con el nombre de “Contenido de humedad en base verde”<sup>12</sup>.

La cantidad de agua existente en la madera puede variar mucho según la especie, el tipo de madera (albura o duramen) y la edad de la madera (madera juvenil o madera adulta). Algunas especies livianas como la balsa y el mapajo pueden contener hasta 300% ó 400% de contenido de humedad; otras muy pesadas como el quebracho colorado llegan hasta un 50% a 60% como máximo.

### **2.3.1.1.1. Métodos medición contenido de humedad**

#### **a) Método gravimétrico**

Para determinar el contenido de agua en la madera, se utiliza con frecuencia el método gravimétrico. Se corta una probeta de un largo de 3 a 4 cm en la dirección de las fibras y se pesa con una precisión de 0,1 g. En seguida, la probeta se seca en una estufa a una temperatura de  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  por 24 horas y se pesa nuevamente. Finalmente se calcula el porcentaje del contenido de agua por la fórmula antes mencionada. Para obtener un buen resultado se deben tomar varias precauciones: La probeta debe cortarse no menos de 15 cm de los extremos de la tabla. No se debe dejar pasar más de algunos minutos entre el corte y la primera pesada de la probeta. De no poder realizar el pesado en el momento se debe envolver la probeta en una bolsa o película de polietileno y mantener en un congelador bajo  $0^\circ\text{C}$ .

Para determinar la distribución de agua en el espesor de la madera (gradiente de humedad), se divide una probeta en tres secciones dos superficiales y una central; cada sección se pesa, se seca en estufa a  $103^\circ\text{C}$  hasta peso constante.

#### **b) Métodos eléctricos**

Es un método más rápido para determinar la humedad de la madera. Se lo realiza con un instrumento llamado xilohigrómetro.

---

<sup>12</sup> norma chilena NCh176/1

El xilohigrómetro de resistencia es un instrumento que mide la resistencia eléctrica de la madera mediante dos electrodos que uno emite y el otro recibe una señal de corriente y por los algoritmos de su software determina el porcentaje de contenido de humedad. Para utilizarlo bien, es conveniente conocer el principio de su operación y sus limitaciones.

La madera tiene una resistencia eléctrica que varía fuertemente con el contenido de humedad y en menor grado con la temperatura. Además depende de la especie. En el estado seco (a 9% de humedad y 20°C) la madera es un muy buen aislante eléctrico con una resistencia eléctrica aproximada de 1.000 millones de ohm. En cambio, a 30% de humedad la resistencia eléctrica es de 200 mil ohm, y a 80% de humedad la resistencia eléctrica de la madera es de 11 mil ohms. La relación entre resistencia eléctrica cambia entre 20% y 10% de humedad por un factor aproximado de 4 mil, mientras que entre 50% y 40%, cambia solamente por un factor de 2. Se desprende entonces, que la sensibilidad del instrumento es mucho más grande a bajas humedades que a altas humedades de la madera. No obstante, a contenidos de agua por debajo de 8%, la resistencia eléctrica es tan alta (más de 10.000 millones de ohm) que la medición es casi imposible, como consecuencia de corrientes parásitas pasando por el material aislante que separa los electrodos del instrumento

Se debe tener mucho cuidado al interpretar los resultados fuera del rango de 8% a 25%, ya que se pueden indicar valores muy imprecisos<sup>13</sup>.

#### **2.3.1.1.2. Comportamiento de la humedad en la madera**

Como la madera es un material higroscópico absorbe o entrega agua de acuerdo a las condiciones ambientales, lo cual hace variar el contenido de humedad dependiendo del ambiente en que se encuentre.

Si se ha iniciado el proceso de pérdida de humedad, la madera entrega al ambiente el agua libre contenida en sus lúmenes celulares hasta alcanzar el punto de saturación de las fibras

---

<sup>13</sup> Messer Soubelet, 2007 - `Ananias 1993`

(PSF), que corresponde al contenido de humedad en el cual se ha eliminado toda el agua libre del interior de los lúmenes celulares y las paredes celulares se mantienen completamente cubiertas de agua. El contenido de humedad en el PSF depende de varios factores y es variable para las diversas especies. Sin embargo, para fines prácticos se acepta en general un 28% como promedio.<sup>14</sup>

Por debajo del punto de saturación de las fibras y al continuar el proceso de pérdida de humedad, la madera comienza a perder agua contenida en sus paredes celulares, hasta alcanzar un contenido de humedad en el cual el proceso se detiene. Este estado se designa como contenido de humedad de equilibrio (CHE). El contenido de humedad de equilibrio de la madera depende fundamentalmente de la especie, la temperatura y la humedad relativa del ambiente en que se encuentre la madera.

La pérdida de humedad por debajo del contenido de humedad de equilibrio solo puede lograrse mediante secado artificial, el que permite finalmente extraer, si se desea, toda el agua contenida en la madera, es decir llegar al estado anhidro, lo cual es teórico ya que es imposible de obtener madera seca al 0% de contenido de humedad, por 2 razones principalmente, primero porque al sacarla de la cámara captaría humedad y segundo que la madera es incapaz de soportar tales tensiones de secado.

### **2.3.1.2. Densidad de la madera**

La densidad de la madera es la relación entre la masa de los distintos tipos de elementos que forman la madera y el volumen que ocupan.

El contenido de humedad de la madera influye sobre la relación madera-volumen, es decir, es afectado el peso y las dimensiones de la madera. Por ello se conocen distintos tipos de densidad, entre ellas destacan la densidad básica y la densidad de referencia.

**a) La densidad básica.** Considera masa anhidra y volumen de la madera saturada con agua, lo que se expresa como:

---

<sup>14</sup> Messer Soubelet, 2007 - `Ananias 1993`

$$D_{0,g} = \frac{m_0}{V_g} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

$D_{0,g}$ : Densidad Básica

$m_0$ : Masa anhidra, es decir al 0% de contenido de humedad

**b) La densidad de referencia.** Considera masa y volumen en las mismas condiciones de humedad. Se expresa como:

$$D_{a,a} = \frac{m_a}{V_a} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

$D_{a,a}$ : Densidad de referencia

$m_a$ : Masa al “a” de contenido de humedad

$V_a$ : Volumen al “a” de contenido de humedad

Dependiendo del contenido de humedad, se pueden distinguir las siguientes densidades de referencia:

- **Densidad Normal:** Aquella que relaciona la masa y el volumen de la madera con un contenido de humedad del 12%.
- **Densidad Nominal:** Es la que relaciona la masa anhidra de la madera y su volumen con un contenido de humedad del 12%.

De acuerdo a la densidad normal las maderas pueden clasificarse técnicamente en maderas livianas, semi-pesadas y pesadas

### 2.3.2. Propiedades mecánicas de la madera

Las propiedades mecánicas de la madera determinan la capacidad o aptitud para resistir fuerzas o sollicitaciones externas que traten de alterar su tamaño, dimensión (deformarle).

El conocimiento de las propiedades mecánicas de la madera se obtiene a través de ensayos de laboratorio que se aplican al material.

El esfuerzo necesario para solicitar un material hasta llegar al límite elástico, determina el esfuerzo en el límite de proporcionalidad al cual se puede someter a la madera sin que se produzcan deformaciones plásticas.

La rigidez de un cuerpo se define como la propiedad o capacidad que tiene para resistir la deformación al ser solicitado por fuerzas externas. La medida de rigidez de la madera se conoce como módulo de elasticidad o coeficiente de elasticidad, calculado por la relación entre esfuerzo por unidad de superficie y deformación por unidad de longitud.

### **2.3.2.1. Ensayos**

Los ensayos se pueden realizar para dos estados de contenido de humedad, uno con probetas de humedad superior al 30% (estado verde), y el segundo con probetas de humedad 12% (estado seco al aire).

#### **a) Cizalle**

Es el ensayo de la capacidad de la pieza para resistir fuerzas que tienden a causar deslizamiento de una fibra sobre de la otra en la pieza. La probeta es de sección 5 x 5 cm y altura 6,5 cm con una entalladura de 1,8 x 1,5 cm. de fondo y altura respectivamente como lo establece la norma COPANT 463. Dependiendo de la orientación de los anillos, se diferencia dos tipos de cizalle paralelo:

- **Cizalle paralelo tangencial**

La sollicitación es paralela a las fibras y produce un plano de falla, tangente a los anillos de crecimiento.

- **Cizalle paralelo radial**

La sollicitación es paralela a las fibras y produce un plano de falla perpendicular a los anillos de crecimiento.

**b) Compresión paralela a las fibras**

Ensayo la resistencia de la madera a una carga en dirección paralela a las fibras, la que se realiza en columnas cortas para determinar la tensión de rotura, tensión en el límite de proporcionalidad y módulo de elasticidad. La probeta debe ser de sección transversal 5x5 cm y longitud de 20 cm. Conforme a la norma COPANT 464.

**c) Flexión estática**

Ensayo la resistencia de la viga a una carga puntual, aplicada en el centro de la luz para determinar la tensión en el límite de proporcionalidad, tensión de rotura y el módulo de elasticidad. La probeta establecida en la norma COPANT 465 es de sección de 5 x 5 centímetros y longitud de 75 cm.

**2.3.2.2. Factores que afectan las propiedades mecánicas de la madera laminada**

La madera laminada encolada se ve afectada por defectos de la materia prima utilizada y por las falencias incurridas durante la manufactura.

Por tal motivo se debe de verificar los defectos propios de la madera basados en la clasificación visual por defectos para madera estructural propuesta en el capítulo 3.4 del Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino:

- a) **Nudos sueltos.-** Abertura de sección relativamente circular, originada por el desprendimiento de un nudo.
  
- b) **Grietas.-** Separación de elementos constitutivos de la madera, cuyo desarrollo no alcanza a afectar dos superficies opuestas o adyacentes de una pieza.
  
- c) **Perforaciones.-** Orificios producidos por la presencia de insectos taladradores. En cualquier caso, la madera con este defecto debe ser desechada.

d) **Pudrición.-** Degradación, descomposición y destrucción de madera por presencia de hongos en ambiente húmedo. La presencia parcial de putrefacción implica una creciente reducción de la resistencia. No se debe utilizar como material estructural.

e) **Bolsillo de corteza.-** Presencia de masa de corteza total o parcial comprendida en la pieza. Se conoce también como corteza incluida.

f) **Bolsillo de resina.-** Presencia de una cavidad bien delimitada que contiene resina. Se conoce también como bolsa o lacra.

Otros factores muy importantes que se debe de tomar en cuenta, para no afectar las propiedades mecánicas de la madera laminada, en el proceso de fabricación son: la distribución uniforme de cola, el prensado adecuado, el tiempo de inicio y fin de curado de la resina y el contenido de humedad de las láminas a ser encoladas.

#### **2.4. Secado de la madera**

El secado de la madera es un proceso necesario para poderla usar en la construcción ya sea con fines estructurales o de carpintería.

La utilización de madera seca brinda una serie de beneficios, entre los que se destaca:

- Mejora sus propiedades mecánicas. La madera seca es más resistente que la madera verde.
- Mejora su estabilidad dimensional.
- Aumenta la resistencia al ataque de agentes destructores (hongos).
- Aumenta la retención de clavos y tornillos.
- Aumenta la resistencia de las uniones de maderas encoladas.
- Disminuye considerablemente su peso propio
- Mejora su ductilidad y facilita la manipulación de herramientas para cortar y pulir.

El secado de la madera puede ser realizado a través de dos métodos:

**a) Secado al Aire.-** Se efectúa simplemente colocando la madera bajo cubiertas protectoras contra el sol directo, permitiendo la circulación de aire en forma expedita y, según las condiciones de temperatura y humedad relativa del ambiente, el secado de la madera. Tiene la desventaja de ser un proceso lento y poco efectivo.

**b) Secado convencional en horno.-** Consiste en secar la madera en cámaras especiales (hornos), en los cuales se manejan variables de presión, humedad y temperatura (80 a 90 °C). Este proceso tiene la ventaja de ser rápido, además de establecer el grado de humedad deseado.

## **2.5. Mantenimiento a la madera laminada**

La madera por ser materia orgánica es susceptible al ataque de seres vivos, a la acción de agentes bióticos que pueden provocar su degradación. En contra parte, la madera frente al oxígeno del aire no reacciona como sucede con los metales que se oxidan. No se deteriora con el sol como le sucede a los plásticos.

Si bien la madera se degrada, se debe tener presente en qué condiciones ocurre esto, ya que existen un sin número de protectores que garantizan su durabilidad.

Para que los agentes biológicos se desarrollen y subsistan se requiere que existan ciertas condiciones como son: Fuente de material alimenticio para su nutrición. Temperatura para su desarrollo. El intervalo de temperatura es de 3° a 50°, siendo el óptimo alrededor de los 37 °C. Humedad entre el 20 % y el 140 %, para que la madera pueda ser susceptible de ataques de hongos. Por debajo del 20 %, el hongo no puede desarrollarse y por sobre 140 % de humedad, no existe el suficiente oxígeno para que pueda vivir.

También existe una gran cantidad de insectos que usan la madera para reproducirse y vivir alimentándose de la celulosa que ésta contiene. El daño se produce debido a que sus larvas,

orugas y adultos abren galerías para obtener alimento y protección. Dentro de estos insectos están las termitas.

El espectro ultravioleta de la luz descompone la celulosa de la madera produciendo su degradación. La acción de la luz es lenta y a medida que transcurre el tiempo la degradación no aumenta, dado que los primeros milímetros afectados sirven de protección al resto. La degradación por la luz es más rápida si se combina con el deslavado que puede producir la lluvia, que arrastra la celulosa descompuesta de la superficie, produciendo la degradación denominada “madera meteorizada”.

El espectro infrarrojo afecta en la medida que calienta la madera. Este calor puede producir secado y agrietamientos en dirección de las vetas por las cuales penetra la humedad, favoreciendo la invasión de los hongos xilófagos.

La humedad atmosférica produce deterioro por los repetidos cambios de dimensiones que se producen en las capas superficiales de las piezas que se encuentran a la intemperie, hinchándose con clima húmedo y contrayéndose en los períodos de sequía lo que origina tensiones alternas de compresión y dilatación que se traducen en una desintegración mecánica de las capas superficiales.

A bases de las anteriores causas que puedan afectar a la madera en servicio se puede planificar mantenimientos con:

- **Insecticidas:** protegen frente a la acción de los insectos xilófagos, destacan el tipo Piretrinas o Clorpirifos<sup>15</sup>.
- **Fungicidas:** protegen frente a la acción de hongos xilófagos. Si es pudrición se emplean productos con contenidos de cromo, cobre y arsénico<sup>16</sup>.

---

<sup>15</sup> Manual La Construcción de Viviendas en Madera

<sup>16</sup> Manual La Construcción de Viviendas en Madera

- **Protectores de la luz:** Pinturas con pigmentos metálicos que sellan la vena de la madera.
- **Ignífugos o retardadores de fuego:** protegen frente a la acción del fuego convirtiendo a la madera desde un material combustible, a uno difícilmente combustible.
- **Impermeabilizantes:** Que evitarán la penetración del agua hacia las fibras interiores.

Adicional a ello se debe de realizar limpiezas periódicas, barnizados y cuanto sea necesario para evitar las acciones degradantes.

## **2.6. Curvado de la madera**

La técnica, cuyo principio básico propone curvar piezas de madera macizas, sin quebrarlas, estirando sus fibras del lado convexo y comprimiéndolas las del lado cóncavo, es una práctica antigua empleada en la fabricación de instrumentos musicales, que con el tiempo abarcó exitosamente los campos de la carpintería que ahora pretendemos usarlo en el campo estructural.

Este es un proceso especial que demanda paciencia para manipular y conocimientos sobre el comportamiento, las posibilidades y los límites de la madera.

Es importante mencionar que en la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho tuvo una experiencia en el trabajo de grado Caracterización del Curvado de la especie Ochoó donde se demostró que la madera es curvadle.

### **2.6.1. Los métodos de curvado**

Existen dos formas principales de doblar madera:

#### **a) Método del Calentamiento**

La madera puede curvarse tanto verde o muy seca, pero está comprobado que cuando contiene una humedad en el orden de 18%, los resultados son superiores y el riesgo de rotura y de deformaciones secundarias es menor.

El curvado de la madera sólida implica ablandar las piezas para después doblarlas, y esto se logra sometiendo la madera a una etapa de vaporizado. Previo a este paso, es necesario fabricar un molde con la forma que demanda el diseño del producto.

El procedimiento inicia con sumergir la pieza en agua a 80°C por 10 minutos en los cuales se logra un aumento del contenido de humedad ya que el agua contenida facilita el calentamiento interno de la madera.

Después, para lograr un contenido de humedad entre 30 a 35 %, se coloca la pieza en una caja de vaporización, esta recibe la inyección de vapor a una temperatura de 100°C a partir de una falca calentada por una estufa. Está demostrado que con mayores temperaturas no se produce un mejor curvado, como tampoco con la introducción de vapor a presión<sup>17</sup>.

Se debe mantener la pieza de madera bajos los efectos del vapor un tiempo aproximado de 1,8 minutos por cada milímetro de espesor y luego someterle a presión sobre el molde para dar la forma<sup>18</sup>.

Se extrae del molde cuando esté realmente seca, es decir, cuando la madera estabilice su contenido de humedad con respecto a la humedad del ambiente, de lo contrario la pieza será inestable y buscará recuperar su forma original.

Para el proceso de curvado de madera, en general se utilizan maderas duras, dado que gracias a sus propiedades físicas y mecánicas se logran curvados con mejores resultados.

## **b). Método del laminado**

---

<sup>17</sup> revista M&M El mueble y la Madera

<sup>18</sup> Investigación para empresa Delma Ltda. en asociación con la empresa Lamino Mobel

Gracias a la flexibilidad que se logra en las láminas delgadas por la disminución del peralte y por ende de la inercia. Estas se curvan individualmente y posteriormente se cola entre sí, dando lugar a piezas de espesores relativamente gruesos. Es recomendado para maderas muy duras, de fibras largas.

Trabajando de forma artesanal, esta técnica es mucho más dispendiosa que el doblado por calor pues demanda cerca de cuatro veces su tiempo. La razón es que mientras la madera maciza trabaja una sola pieza, es un solo corte y no necesita pegante, el laminado requiere de varias piezas delgadas, tiempo para que el adhesivo seque entre ellas y la fabricación de moldes y contra moldes.

Se genera mayor desperdicio si se trata de fabricar una pieza curva de radios pequeños ya que necesita láminas de menor espesor. En el proceso de cortado el disco desecha 3 mm en promedio.

A diferencia del método del calor, el método del laminado es mucho más permisivo con el uso de gran variedad de maderas, exceptuando aquellas de tipo oleoso que por su condición grasa no admiten el pegante correctamente. Por lo general, son pocas las piezas defectuosas que arroja el proceso y cuando esto ocurre, las causas pueden ser tiempos imprecisos de secado o el uso de un pegante inadecuado. Lo ideal es respetar los tiempos de secado, dejar la pieza en el molde cuanto sea necesario para evitar que se desestabilice y se despegue

Trabajando a nivel industrial se debe combinar las técnicas de calor y laminación, en un proceso que comprime las láminas de madera con moldes metálicos provistos de sistemas a vapor, calentándolas para facilitar su curvatura y luego se unen utilizando pegantes. Con estos métodos se logran óptimos resultados, piezas idénticas entre sí, en poco tiempo.

Terminado el proceso de curvado se debe verificar que no haya fallas que afecten el uso estructural de la madera. Como los mostrados en el grafico siguiente:

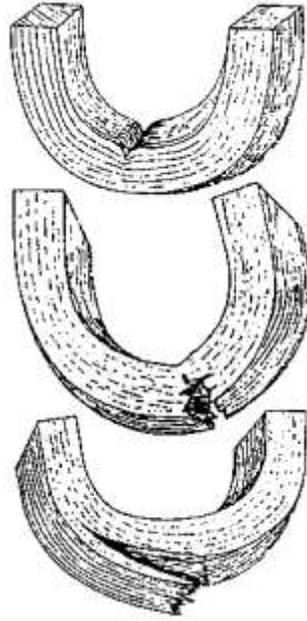


Figura 6: Fallas en el curvado

Existen otros métodos de curvado basados en el tratamiento químico de la madera, tal como sumergir durante unos minutos la madera en un baño de amoníaco anhidro líquido ( $T < -30$  °C). La madera así tratada puede doblarse hasta que el amoníaco se evapora, momento en el que la madera se endurece. El problema de este sistema es el costo<sup>19</sup>.

### 2.6.2. Espesor de láminas

La norma chilena Nch 1198 indica que el espesor máximo de las láminas en función de los radios de curvatura, para evitar fracturas, daños estructurales y obtener madera estructural de directriz curva de similares características a la madera aserrada rectilínea, debe cumplir la siguiente proporcionalidad:

$$R \geq 200 * e \quad \text{(Ecuación 5)}$$

#### Dónde:

R: radio de curvatura en [m]

e: espesor de lámina individual en [m]

---

<sup>19</sup> Investigación para empresa Delma Ltda. en asociación con la empresa Lamino Mobel

Por razones de secado y economía, se ha llegado a la conclusión de que el espesor de las láminas no debe ser inferior a 3/4", ni sobrepasar las 2"<sup>20</sup>.

### 2.6.3. Factor de modificación a la resistencia.

En la norma chilena NCh 1198 "Madera - Construcción en Madera – Cálculo" y la Norma Técnica Colombiana NTC 2500 "Ingeniería Civil y Arquitectura Uso de la Madera en la Construcción" establece que la resistencia de un elemento con directriz curva disminuye debido a las tensiones que se induce al doblar las láminas en función del radio de curvatura y del espesor de la lámina y esta comandada por la siguiente ecuación:

$$Kc = 1 - 2000 \left( \frac{e}{R} \right)^2 \quad (\text{Ecuación 6})$$

Tomando en cuenta la relación mínima aceptable entre el radio de curvatura y el espesor de la lámina y para ella calculando el factor de modificación, se obtendrá el valor máximo

$$R \geq 200 * e \rightarrow \frac{R}{e} \geq 200$$

$$e = \frac{R}{200}$$

$$Kc = 1 - 2000 \left( \frac{\frac{R}{200}}{R} \right)^2 \rightarrow Kc = 1 - 2000 \left( \frac{R}{200 * R} \right)^2 \rightarrow Kc = 1 - 2000 \left( \frac{1}{200} \right)^2$$

$$Kc = 1 - 2000(0,005)^2 \rightarrow Kc = 1 - 2000 * 0,00005 \rightarrow Kc = 1 - 0,05$$

$$Kc = 0,95$$

Por lo que concluimos que la máxima pérdida de resistencia mecánica por efecto de la curvatura de la madera es del 5% y para fines de diseño lo adoptamos como valor constante para todas las relaciones radio-espesor iguales o mayores a 200.

## 2.7. Los arcos y su diseño

---

<sup>20</sup> Barreto Castañeda, 2013 - `Pérez, V. A. 1979`

Se llama arco a la estructura de eje curvo que cargada verticalmente produce reacciones oblicuas en los apoyos<sup>21</sup>.

Si se invierte el trazado del funicular de un cable se obtiene el anti funicular en un arco

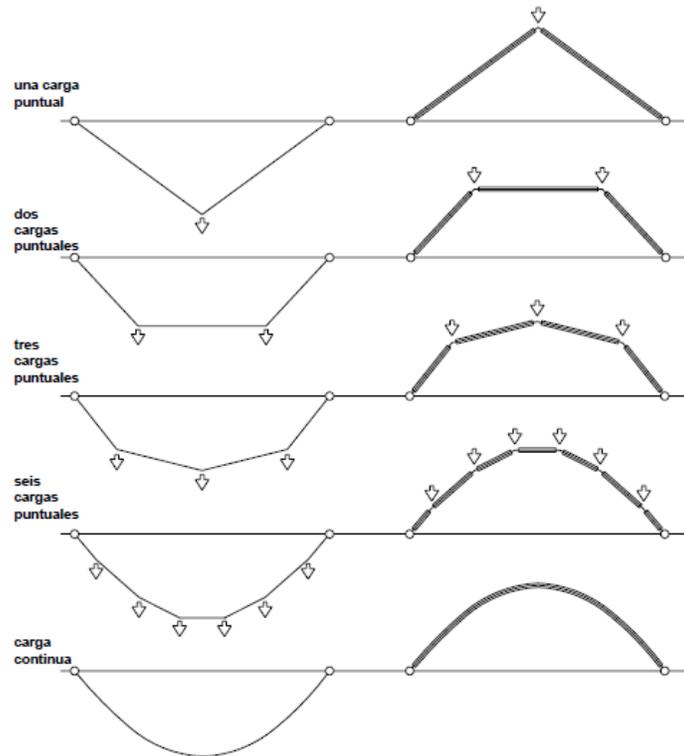


Figura 7: Representación gráfica de la anti funicular de las cargas - Método de Gaudi

El arco es en esencia una estructura comprimida utilizada para cubrir sobre todo grandes luces y puede considerarse como uno de los elementos estructurales básicos en todo tipo de arquitectura.

Cuando no es necesaria una cubierta plana para satisfacer las exigencias funcionales de la estructura, las cubiertas de elementos con simples o doble curvaturas son más económicas, debido a la capacidad de absorber las cargas con intervención mínima de flexión y corte.

<sup>21</sup> Davila Baz, 1997 “Los Arcos y Método de Cross Aplicado al Cálculo de estructuras”

El uso de arcos es el método estructural más antiguo empleado para puentes cuando las luces son demasiado grandes y es anti económico el uso las vigas rectas.

Los esfuerzos en los arcos son proporcionales a las cargas y a la luz, e inversamente proporcionales a la altura del arco. Para minimizar los esfuerzos a una luz entre apoyos dada, el arco debe ser lo más liviano posible.

En los apoyos los arcos generan un empuje hacia fuera (fuerzas horizontales) que debe ser absorbido por los cimientos o mediante contrafuertes que pueden ser doblemente empotrados o doblemente articulados. Los últimos permiten la rotación de los contrafuertes. Son relativamente flexibles y ante variaciones de temperatura o asentamientos del suelo, no desarrollan tensiones elevadas de flexión. Los arcos empotrados son más rígidos y en consecuencia, más sensibles a las tensiones provocadas por variaciones de temperatura y por asentamiento de los apoyos.

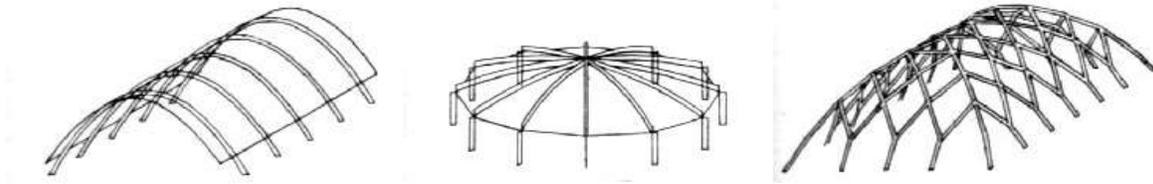
Si los cambios de temperaturas causan muchos problemas se puede introducir una tercera articulación en el tramo, el cual permite deformaciones y no introduce esfuerzos adicionales<sup>22</sup>.

### **2.7.1. Usos de arcos en cubiertas**

Generalmente, los arcos don usados en una variedad de combinaciones para techos curvos, de luces entre 25 a 70 m, uno de las más simples es la de los techos con arcos paralelos con elementos transversales y placas como techo. También pueden ser colocados de forma diagonal y radial.

---

<sup>22</sup> Medina Jorge, 2013 – ‘Salvadori y Heller, 1963, 1998’



*Figura 8: Esquema de sistemas de arcos paralelos, radiales y diagonales.*

### **2.7.2. Criterios para diseño de un arco**

Para construir arcos reales eficaces, hay dos recursos:

- 1.- Dotar al arco de un grueso suficiente como para que el antifunicular siga pasando por dentro de la sección del mismo y así garantizar un buen comportamiento ante solicitaciones imprevistas.
  
2. Dotar al arco de rigidez a flexión. Este procedimiento no puede hacerse si se tratan de arcos de mampostería de piedra o ladrillo pero sí en arcos de hormigón armado, acero o madera.

Cuando no se puede dar la directriz ideal al arco ya sea por condiciones arquitectónicas, constructivas u otras, se recomienda una relación entre el 20% al 33% de la luz, es decir,  $L/5 < h < L/3$ .

### **2.7.3. Diferencia entre arco y viga curva**

No toda estructura curva es un arco, un ejemplo puede ser el pescante, un voladizo curvo o una simple viga curva empotrada (ménsula): todas ellas son falsos arcos. Siendo estructuras curvas o poligonales, no transmiten empuje horizontal y se consideran más bien una estructura isostática.

Por lo que la diferencia radica en el tipo de vinculación. Los arcos tienen restricciones al desplazamiento horizontal en ambos arranques mientras que las vigas curvas permiten el movimiento horizontal.

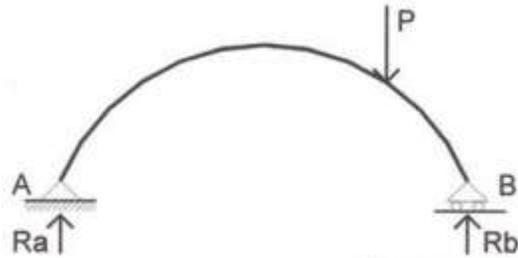


Figura 9: Vinculación de viga curva

## 2.8. Disponibilidad de maderas en nuestro medio

Los bosques en Bolivia abarcan un área de 53.4 millones de hectáreas, representando 48% de la superficie del país y el 1.28% mundial, Las grandes reservas forestales se encuentran en la amazonia boliviana, Pre Andino amazónico, Chore, Guarayos, Bajo Paragua, los Yungas y otros más de menor cobertura.

Bolivia en la actualidad presenta una gran variedad de especies tropicales de interés comercial tanto para el mercado nacional como internacional.

La principal riqueza que tiene Tarija en cuanto a los recursos naturales renovables son los bosques. En la actualidad Tarija tiene una superficie cubierta de bosque de 23759,4 km<sup>2</sup> que representa el 63% de la superficie departamental. Sin embargo. Se carece de información e inventarios forestales, por el momento sólo existen estimaciones del potencial para el aprovechamiento forestal, teniendo un aproximado de 350000 has. De bosque para ser aprovechadas a través de planes de manejo forestal.

En el valle central existe aproximadamente 5000 has. Para el desarrollo de plantaciones forestales (reforestación).

Entre las especies más representativas de flora en Tarija se encuentran: el pino de cerro (*Podocarpus parlatorei*), el barroso (*Blepharocalyx salicifolius*), la guayabilla (*Myrcianthes*

pseudo-mato), el cedro (*Cedrela lilloi*), el nogal (*Juglans australis*), el sauce (*Zanthoxylum coco*), varias especies de laurel (*Phoebe porphyria*, *Ocotea puberula* y *Nectanra* sp.), el arbolillo (*Viburnum seemannii*) y la caña brava (*Chusquea lorenziana*).

El Bosque Serrano Chaqueño se caracteriza por ser un bosque xerófilo caducifolio, el horco quebracho (*Schinopsis haenkeana*), el quebracho colorado (*Schinopsis quebracho-colorado*), el quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho-blanco*), el urundel (*Astronium urundeuva*), el roble (*Amburana cearensis*), el cebil (*Anadenanthera colubrina*), el torobochi (*Chorisia*), lapachos, queñua, aliso y yaretas.

## **2.9. El pino del cerro**

El *Podocarpus parlatorei* o “Pilger”. más conocido en nuestro medio como “pino de cerro”, “pino del monte”. Es una especie arbórea perteneciente a la familia de las Podocarpaceas. Coníferas autóctonas de Argentina, Bolivia y Perú.

Árbol dioico con tronco recto y ramificado, alcanza alturas de hasta 20 m y un diámetro de hasta 1,50 cm. La corteza es rugosa, de color pardo oscuro. Tiene follaje persistente.

La madera es liviana y blanda, con una densidad de 0,48 g/cm<sup>3</sup>, es de textura fina y homogénea, con veteado poco notable, fácil trabajabilidad. Ha sido calificada de excelente para desbobinar en mueblería y carpintería fina. Es apta para chapas.

Entre todas las especies, la madera de pino es la que proporciona la mejor aceptación de los tratamientos necesarios para durar.

### **2.9.1. Características de la madera de pino del cerro**

#### **a) La madera de pino se impregna fácilmente**

El pino combina un buen nivel de penetración y de retención para los tratamientos ya que presenta albura impregnable y duramen parcialmente impregnable.

**b) La madera de pino ofrece buenos niveles de resistencia mecánica**

Si bien la madera de pino no es la mejor representación de densidad, dureza, contracción, flexión, elasticidad es la que tiene mejor combinación entre ellas.

**c) La madera de pino es fácilmente transformable y procesable**

Se trata de una madera liviana, poco nerviosa (fibra recta), la cual es apta para el chapado, de fácil cepillado, torneado, moldurado, taladrado, se puede clavar, atornillar con facilidad. Responde muy bien al encolado. Además es una madera de color claro que ofrece posibilidad de pinturas para todos los gustos.

**2.9.2. Propiedades mecánicas de la madera aserrada del pino del cerro**

Los valores de las propiedades mecánicas utilizadas para la comparación son extraídas de la tesis “Estudio para la Determinación de las Propiedades Mecánicas de la Especie Pino del Cerro (*Podocarpus Parlatorei*)” realizada por Lilian Karina Castro Garcia en junio de 2005, en la carrera de Ingeniería Forestal de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho. Dicho documento se encuentra en impreso en la biblioteca central de la UAJMS.

**a) Cizallamiento longitudinal.-** muestra los esfuerzos promedios resultado de 20 probetas ensayadas bajo la norma COPANT 463 Expresados en [Kg/cm<sup>2</sup>].

Tabla 2: Valor promedio de cizallamiento

<b>ESTADO</b>	<b>EUM RADIAL</b>	<b>EUM TANGENCIAL</b>
Seco aire(7,8)	102,7	94,3
Verde 107,9	68,2	68,1
Al 12%	95,7	93,1

*Fuente: Estudio para la Determinación de las Propiedades*

**b) Compresión Paralela a las fibras.-** muestra los esfuerzos promedios resultado de 20 probetas ensayadas bajo la norma COPANT 464 Expresados en [Kg/cm<sup>2</sup>].

Tabla 3: Valor promedio de esfuerzo y módulo de elasticidad en compresión paralela

ESTADO	ELP	RUM	MOE
Seco aire(8,4)	256,7	367,3	36177,2
Verde 65,3	143,6	191,3	20740,3
Al 12%	246,7	350,7	34829,9

Fuente: Estudio para la Determinación de las Propiedades  
Mecánicas de la Especie Pino del Cerro - Tesis UAJMS

**c) Flexión estática:** muestra los esfuerzos promedios resultado de 20 probetas ensayadas bajo la norma COPANT 465 Expresados en [Kg/cm<sup>2</sup>].

Tabla 4: Valor promedio de esfuerzo y módulo de elasticidad en flexión

ESTADO	ELP	MOR	MOE
Seco aire(8,6)	203,8	437,9	43632,2
Verde 83,7	199,4	388,3	32650,7
Al 12%	206,7	435,2	43134,4

Fuente: Estudio para la Determinación de las Propiedades  
Mecánicas de la Especie Pino del Cerro - Tesis UAJMS

Del mencionado trabajo de investigación adicionalmente se obtiene que el valor de extracción de clavos para estado seco al aire, en la cara radial (cara más desfavorable) es de 49,9 kg., dato que más adelante servirá para el diseño ilustrativo propuesto.

## 2.10. Teja Shingle

La Teja Tipo Shingle es un elemento plano y flexible disponible en varios modelos que sin lugar a duda es un material atractivo y conveniente para la construcción de cubiertas ya que logra juntar su gran belleza con su alta resistencia.

Ofrece varias ventajas como:

**a) Aspecto estético.-** la cubierta es una de las zonas más visibles en una construcción. Esta teja le da a todo el inmueble un estilo único y un acabado impecable.

**b) Resistencia.-** estas tejas son mundialmente conocidas por ser unas de las más resistentes a todo tipo de condiciones climáticas o ambientales. Pueden durar más de 20 años y se pueden pisar durante el montaje.

**c) Conservación del color.-** la coloración de estas tejas se mantiene en el tiempo porque su tonalidad se obtiene a través de procesos de mineralización cerámica.

**d) Cubiertas de bajo peso.-** en los casos en los que las cubiertas no deban ser muy pesadas, la teja shingle es una opción bastante atractiva, debido a que son muy livianas. El peso propio por unidad de área esta entre 7 a 10 Kg/m<sup>2</sup>.

**e) Cubiertas muy Inclınadas.-** La teja shingle resulta mucho más fácil de fijar frente a otras opciones como la teja de arcilla. Es compatible con cualquier tipo de estructura.

**f) Resistencia al viento.-** tienen una cinta auto adhesiva que permite resistencias a vientos de hasta 100 km/h.



*Figura 10a: Imagen de teja shingle*



*Figura 10b: teja shingle dispuesta en cubierta*

## **2.11. Bases de cálculo**

El cálculo se basa en el análisis lineal y elástico. El diseño se debe de hacer por cargas de servicio (método de los esfuerzos admisibles), es decir, esfuerzos aplicados tienen que ser siempre menores que los esfuerzos admisibles.

Las deformaciones deben de evaluarse para cargas de servicios. Se debe tomar en cuenta las deformaciones diferidas por acción de las cargas. Por lo que la deformación final es la suma de la inmediata más la diferida y tiene que ser menor a la deformación admisible.

Para el cálculo estructural se considera a la madera como un material ortotrópico con sus direcciones definidas de acuerdo a la orientación de sus fibras y se supone un comportamiento lineal como se lo hace con otros materiales.

### **2.11.1. Cargas**

Para el diseño se debe tomar en cuenta las cargas:

- a) cargas muertas o peso propio de los elementos de la edificación ya sean estructurales o no estructurales. Se estima mediante la densidad del material.
- b) Cargas vivas o cargas de servicio o son las que actuaran durante la vida útil de la edificación.

Cuando la carga viva o de servicio permanezca aplicada de forma continua en un periodo considerablemente largo respecto a la vida útil de la estructura, esta se la debe considerar como carga muerta para fines de cálculo de la deformación diferida. Siendo la deformación diferida del orden del 80% de la deformación instantánea.

La limitada información que se tiene sobre la madera no permite considerar por separado la incertidumbre de las cargas como ocurre con el acero y el hormigo donde se hace combinaciones de cargas para optimizar el diseño (diseño de resistencia ultima o diseño límite).

c) Sobre cargas de sismos, viento, granizo o nieve que se estima de acuerdo a las condiciones climatológicas de la zona donde se emplazará la obra.

**-Viento:** La carga ejercida por la acción del viento está en función de la velocidad de diseño y el coeficiente de forma de la cubierta. Se determina con la siguiente ecuación:

$$P = 0,00483 * C * V^2 \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

P: Presión o succión del viento en [Kg/cm<sup>2</sup>]

C: Coeficiente de Forma adimensional obtenido de tablas o ábacos

V: Velocidad de diseño en [Km/h]

La velocidad de diseño se obtiene a partir de la velocidad básica del viento. Mediante la siguiente expresión:

$$V_h = V \left( \frac{h}{10} \right)^{0,22} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

V<sub>h</sub>: Velocidad de diseño en [km/h] para una altura h

V: Velocidad básica en [km/h]

h: Altura del terreno en [m]

La velocidad básica del viento es aquella medida a 10 metros de altura respecto a la superficie terrestre.

Para alturas menores a 10 metros se considera como velocidad de diseño a la máxima velocidad básica del viento en la región y no menos de 75 Km/h.

La velocidad básica del viento es obtenida de la tabla propuesta en el anteproyecto de norma de vientos de Bolivia la misma que se basa en los datos de SENAMHI

Tabla 5: Velocidad básica del viento para ciudades capitales

CIUDAD	VELOCIDAD [m/s]
Cochabamba	44,3
La Paz	29,5
Oruro	29,4
Potosí	30,2
Santa Cruz	42,6
Sucre	32,4
Tarija	24,0
Trinidad	40,0
Cobija	26,5

Fuente: IBNORCA anteproyecto de norma boliviana APNB 1225003-1

El coeficiente de forma para cubiertas en arco se puede determinar por regiones conforme a la gráfica:

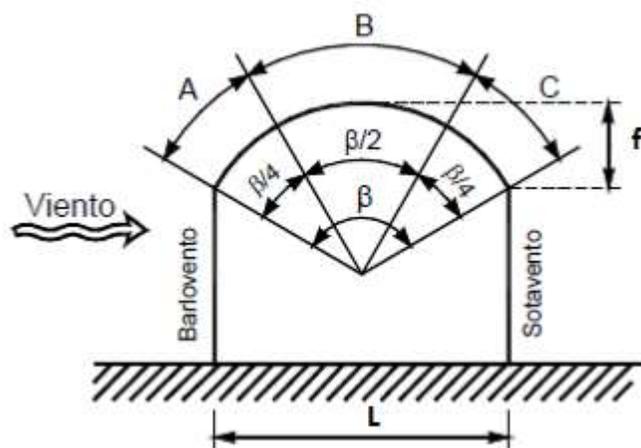


Figura 11: Tramos para coeficiente de forma para cubierta en arco

Tabla 6: Valores del coeficiente de forma para cubiertas en arco

Relación R=f/L	A	B	C
r<0,2	-0,9	-----	-----
0,2<r<0,3	3r-1	-0,7-r	-0,5
r>0,3	1,42r	-----	-----

Fuente: Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Viento

**-Granizo:** La carga de granizo se la estima de acuerdo a la pendiente del techo y a la altura h del granizo acumulado sobre la cubierta:

$$C_g = \delta * h_g * \left( \frac{45^\circ - \alpha}{45^\circ} \right) \quad (\text{Ecuación 9})$$

Dónde:

C<sub>g</sub>: Carga de granizo en [kg/m<sup>2</sup>]

h<sub>g</sub>: Altura acumulada de granizo en [m]

γ: Peso específico del granizo aproximado 900 [Kg/m<sup>3</sup>]

α: Inclinación de la cubierta en grados

### 2.11.2. Esfuerzos últimos

Si bien la resistencia de la madera presenta una variabilidad natural que depende de la región y de las condiciones de desarrollo del árbol. Mediante ensayos de laboratorio y la estadística se puede determinar su resistencia última para cada tipo de esfuerzo.

Es esfuerzo resistente último es aquel correspondiente al quinto percentil de la muestra. Es decir, se acepta que del total de la población un 5 % tengan un valor menor.

Para identificar la posición del límite de exclusión en una serie de datos ordenado estadísticamente se la siguiente ecuación: E<sub>u</sub>=0,05\*N donde N es el número de probetas ensayadas.

Es por este motivo que el número de probetas mínimas para cada ensayo debe de ser 20 para que pueda fallar una (1 es el 5% de 20) y en caso de realizar más probetas se recomiendan que sean en un numero múltiplo de 20.

### **2.11.3. Esfuerzos admisibles**

Los esfuerzos admisibles o de diseño se obtienen minorando la resistencia última con el factor de reducción por calidad (F.C.), Factor de reducción por tamaño (F.T.), Factor de servicio y de seguridad (F.S.), Factor de duración de cargas (F.D.C.).

Se estima mediante la siguiente Formula:

$$E_{admisible} = \frac{F.C.*F.T.}{F.S.*F.D.C.} * E_{último} \quad (\text{Ecuación 10})$$

#### **a) Factor de reducción por calidad (F.C.)**

Las probetas al tener un tamaño estandarizado y pequeño pueden ser elaboradas con maderas totalmente libres de defectos mientras que en una pieza en obra es complicado alcanzar esos niveles de calidad. La forma de obtener el F.C. es realizando varios ensayos tanto de probetas como de piezas reales y la relación entre los resultados previo un análisis estadístico da el Factor de reducción por calidad.

#### **b) Factor de servicio y de seguridad (F.S.)**

Los esfuerzos últimos son reducidos para que el elemento estructural trabaje siempre por debajo del límite de proporcionalidad cumpliendo con las hipótesis de linealidad y elasticidad sin olvidar que la pieza puede tener defectos no detectados, deterioro por el uso, aumento de cargas por el cambio de diseños, etc.

#### **c) Factor de reducción por tamaño (F.T.)**

El cambio del peralte de la viga real en relación a la probeta ensayada genera un comportamiento resistente diferente frente a esfuerzos de tracción y flexión. El tamaño de la pieza no afecta a las condiciones de corte ni de compresión.

#### d) Factor de duración de cargas (F.D.C.)

Trabajando en el campo elástico, como es en el caso de la madera que se diseña con el método de los esfuerzos admisibles, la afectación de la permanencia de la carga es mínima

El Manual de Diseño para Madera del Grupo Andino en el caso de madera maciza presenta los siguientes factores de reducción los mismos que serán usados en el diseño para madera laminada encolada debido a las limitaciones del presente trabajo de investigación

Tabla 7: Factores de reducción

	flexión	Compresión Paralela	Corte paralelo	Compresión perpendicular
<b>F.C.</b>	0,8	_____	_____	_____
<b>F.T.</b>	0,9	_____	_____	_____
<b>F.S.</b>	2	1,6	4,00 *	1,6
<b>F.D.C</b>	1,15	1,25	_____	_____

\* incluye factores por concentración de esfuerzos = 2

*Fuente: Manual de Diseño de Maderas del Grupo Andino*

#### 2.11.4. Módulo de elasticidad

Se obtiene de forma análoga al esfuerzo de rotura. Para el diseño se usa el módulo de elasticidad mínimo, es decir, aquel que corresponde al valor del 5% de exclusión. No se afectan por factores de reducción ya que la seguridad está considerada en las limitaciones de deflexión.

#### 2.12. Cálculo de madera aserrada

Para el cálculo de elementos de madera maciza se utiliza el procedimiento, los esfuerzos admisibles y módulos de elasticidad propuestos en el Manual de Diseño de Maderas del Grupo Andino.

Tabla 8: Esfuerzos admisibles y módulos de elasticidad para maderas del grupo andino

Propiedades	GRUPO		
	A	B	C
kg/cm <sup>2</sup>			
E0,05 o Emin	95000	75000	55000
Eprom	130000	100000	90000
fm	210	150	100
fc	145	110	80
fc.	40	28	15
fv	15	12	8
ft	145	105	75

Fuente: Manual de Diseño de Maderas del Grupo Andino

Para el diseño de entablados se toma en cuenta la acción conjunta de la serie de elementos resistentes, por lo que para el cálculo se debe utilizar el módulo de elasticidad promedio e incrementar las resistencias admisibles en un 10%.

Verificación de estabilidad.- Para evitar pandeos laterales debe arriostrarse adecuadamente, En la sección 8.2 de Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino, se propone criterios empíricos a utilizarse en vigas viguetas y elementos similares:

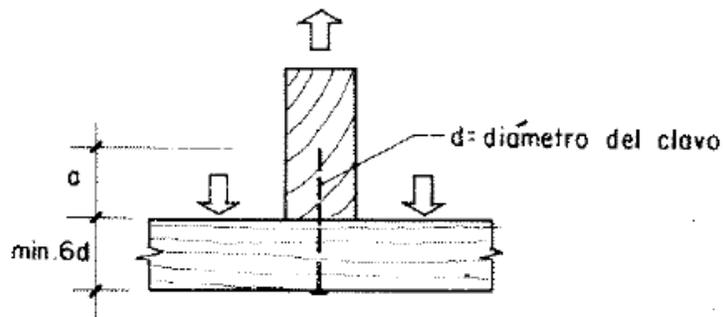
Tabla 9: Requisitos de arriostramiento para elementos de sección rectangular

RELACIÓN: ALTO/ANCHO: h/b	REQUISITOS DE ARRIOSTRAMIENTO
2	No necesita apoyo laterales
3	Restricción de desplazamiento lateral en apoyos (traslación y rotación)
4	Restricción de desplazamiento lateral en apoyos; elementos mantenidos en posición por correas o viguetas.
5	Restricción de desplazamiento lateral en apoyos; borde de compresión conectado directamente con entablado o viguetas.

	6	<p>Adicionalmente para los requisito de <math>h/b = 5</math> colocar arriostramiento cruzado entre elementos a distancias menores a ocho veces su ancho.</p>
--	---	--

*Fuente: Manual de Diseño de Maderas del Grupo Andino*

Cargas admisibles para extracción de clavos.- El Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino en la sección 12.1.4 presenta la tabla 12.5 con valores de cargas admisibles para extracción de clavos y se define el espesor mínimo del elemento a sujetarse con el clavado.



*Figura 12: Clavo sometido a fuerza de extracción y espesor mínimo  
(Fuente: Manual de Diseño de Maderas del Grupo Andino)*

Tabla 10: Carga admisible de extracción de clavo

GRUPO	CLAVO PERPENDICULAR AL GRANO (Kg)
A	$8ad$
B	$6ad$

C	4ad
Los coeficientes pueden duplicarse si se trata de madera seca.	
a, d deben considerarse en cm.	
El espesor del entablado debe ser mínimamente 6 veces el diámetro del clavo .	

*Fuente: Manual de Diseño de Maderas del Grupo Andino*

### **3. MARCO PRÁCTICO**

#### **3.1. Elección de la cola o resina alternativa**

Las resinas convencionales utilizadas en la industria de la madera laminada son costosas y desconocidas en los principales comercios y distribuidoras del país. Sólo las fábricas

ubicadas en Santa Cruz como CIMAL y SOBOLMA realizan la importación de estos productos en embaces de 200 litros para su uso propio pero no comercializan al público.

La empresa AkzoNobel con asiento en diferentes partes del mundo es la principal fabricante de pinturas decorativas, industriales, barnices, resinas, productos químicos especializados. Las resinas más conocidas y utilizadas de esta marca, en países vecinos dedicados a la industrialización de la madera como Chile y Colombia, son: EPI 1974 con su diluyente Hardener 1993 siendo este un producto más económico pero en contrapartida menos resistente al prolongado intemperismo. MUF 1242 (Melanina Urea Formaldehido) con el diluyente Hardener 2542 muy resistente a climas adversos.

En Bolivia la representación de akzonobel la tiene Monopol. Monopol Tarija en su generalidad comercializa productos para el área automotriz desconociendo por completo de resinas y de información sobre ellas. En contacto con akzonobel en Buenos Aires Argentina, se obtiene la información de que las resinas no son fabricados en sud américa, sino son importadas desde la sede central en Ansterdam (Paises Bajos).

Al existir la dificultad de adquisición de las resinas convencionales, se decide probar otras alternativas de pegamentos disponibles en nuestro medio.

Se realiza un análisis previo de los posibles pegantes, descartando de entrada aquellos que son termoplásticos, es decir de aquellos que fluyen cuando se incrementan la temperatura, como es el caso de los acetatos de polivinilo o poliuretano conocidos como cola blanca de carpintero. Sin embargo por recomendaciones y experiencias de carpinteros se presentó especial atención y experimenta con Ribecola Forte 3D.

De los productos Sika se selecciona el sikadur 32 gel que es un epóxico de doble componente utilizado generalmente para puentes de adherencia de hormigones y anclajes de pernos a hormigones pero también está indicado en la ficha técnica del producto que puede ser usado como adhesivo para madera.

Un tercer producto de encolado que presenta características recomendadas para la fabricación de madera encolada es la resina de poliéster. Este tipo de resina lo utilizan en los talleres que trabajan con fibra de vidrio. Es un producto acuoso que al ser acelerado y luego catalizado endurece fuertemente dando como resultado un producto sólido y termoestable.

Seleccionadas las tres alternativas de pegantes, se realizó pruebas de encolado y delaminación siguiendo las técnicas sugeridas en las normas relacionadas (JAS: Japanese Agricultural Standard; APA: American Plywood Association; BS: British Standards Institution). La técnica consiste en realizar el encolado a la madera, esperar el tiempo de endurecimiento de las líneas de cola, someter las probetas a un baño en agua hirviendo por 1 hora e inmediatamente después se introduce a un baño de agua fría. Terminado este procedimiento se deja que las probetas sequen al aire libre para luego inspeccionar el grado de delaminación de la pieza.

Adicional a lo sugerido en la bibliografía, se sometió al microondas con el fin de conocer el comportamiento de la madera laminada encolada frente al calor, simulando un incendio leve.

Se verificó el efecto causado por la exposición directa a los rayos del sol y la degradación de las líneas de cola, simulando intemperismo.

### 3.1.1. Comparación de comportamiento de adhesivos alternativos

Tabla 11: Comparación de comportamiento de adhesivos alternativos

Tipo de cola/prueba	Ribecola	Sikadur 32 Gel	Resina de Poliester
Baño de agua Hirviendo	en las líneas de cola aparece burbujas de color blanco que se estiran como chicle	Presenta leves contracciones en algunas regiones de la probeta separándose el	Se mantiene intacta a la acción del agua hirviendo.

		pegamento de alguna de la caras contiguas de la madera	
<b>Baño de agua Fría</b>	Las burbujas que aparecieron se solidifican en forma de plástico blanco presentándose concentraciones en zonas discontinuas. La pieza falla al ejercer una pequeña fuerza con las manos	La madera en las regiones de desprendimiento sufre pequeños cambios dimensionales y alabeos	La línea de cola no presenta cambios. La madera tiende a hincharse y desaparece las fisuras que originó el agua hirviendo.
<b>Microondas</b>	NO SE REALIZA	Soporta adecuadamente	Soporta sin sufrir ninguna alteración
<b>Exposición solar</b>	NO SE REALIZA	Soporta adecuadamente con pequeños reajustes de la madera en las zonas delaminadas.	No cambia en nada la línea encoladas durante los dos meses de exposición. Al no existir delaminación también no hay ningún reajuste de la madera.

*Fuente: Elaboración propia*

### 3.1.2. Conclusiones:

#### a) Ribecola.-

La cola no es termoestable. No puede ser usada en elementos estructurales ya que durante la vida útil de la obra se puede producir un incendio o presentar cualquier otro evento que

produzca calor desembocando en la falla de las líneas de cola y el colapso de toda la estructura.

**b) Sikadur 32 Gel.-**

Presenta un buen comportamiento frente al envejecimiento, la adherencia y la delaminación. Para definir si es totalmente adecuada para fines estructurales se debería determinar su capacidad mecánica. Pero analizando el costo resulta anti económico ya que su precio oscila entre los 200 bolivianos el kilogramo y su rendimiento aproximado de 1Kg para cada 2 metros cuadrados.

**c) Resina de Poliéster.-**

Es la mejor opción para desarrollar el proyecto. Su comportamiento es muy bueno, su precio está por debajo de los 30 bolivianos el kilogramo y su rendimiento próximo 0,25 kg/m<sup>2</sup>.



*Figura 13a y 13b: Fotografías de prueba de resistencia del encolado en el microondas.*

### **3.2. Materiales y equipo**

La madera utilizada es del pino del cerro (*Podocarpus Parlatorei*) la misma que se adquiere de los aserraderos de la ciudad de Tarija generalmente tiene procedencia de la zona de Narváez. Para el laminado en las dimensiones solicitadas se hace uso de una sierra sinfin.



*Figura 14: Laminado de la madera en la sierra sinfín*

El cepillado se lo hace de forma manual con garlopa y cepillo en un taller artesanal de carpintería. Se necesita como herramientas de apoyo escuadras, sierras, amoladora, taladro.



*Figura 15: Cepillado manual de la madera*

Para el encolado se usa envases descartables, en nuestro caso vasos plásticos y cucharillas de capacidades conocidas, palillos para el mezclado. Prensas mecánicas artesanales. Accesorios de protección personal.



*Figura 16: Preparado de la resina*

Para los ensayos en el laboratorio de Tecnología de la Madera de la facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales perteneciente a la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho se usa la prensa universal Amsler de 40 toneladas y sus complementos para diferentes ensayos, medidor de deformación, xilohigrómetro y jarras medida y balanza de precisión.



*Figura 17a: Prensa universal AMSLER*



*Figura 17b: Extensómetro*

Entre los materiales usados, es importante destacar la resina de poliéster elegida como pegante para el desarrollo del proyecto. Todos los componentes se los adquiere de la empresa Durex ubicada en la ciudad de Tarija la misma que importa el producto desde México en

turrones de 200 Kg. Este producto es comercializado a 24 bolivianos el kilogramo, el acelerante a 220 Bs. el Kg y el catalizador a 120 Bs. el Kg.



*Figura 18: Resina de poliéster*

### **3.3. Elaboración de probetas**

Se limita el presente trabajo a la determinación de las respuestas estructurales de la madera laminada de pino del cerro encolada con resina de poliéster, frente a solicitudes de compresión axial, corte horizontal y flexión siendo estas las necesarias para el diseño de elementos en arco.

Para este fin se elabora probetas conforme a las normas COPANT MADERA 463, 464, 465 que guardan directa relación a lo indicado por la Normas ASTM D143 y similitud con las NCh (Normas Chilenas)

Para la elaboración de las probetas se toma en cuenta los siguientes aspectos importantes:

- El corte de las láminas debe ser uniforme en toda la longitud, por lo tanto realizado por un operador con experiencia. En caso de almacenar las láminas se deberá realizar de manera adecuada para evitar deformación.

- La preparación de la resina cobalto y catalizador tiene que estar en las proporciones adecuadas. Para todas las probetas se realiza en vasos plásticos de capacidad conocida, se agrega 1,5% de cobalto (acelerador), se mezcla hasta alcanzar la homogeneidad, luego se

añade 2% de catalizador removiendo por aproximadamente 20 segundos. Inmediatamente después se aplica a las caras de la madera a colar teniendo en cuenta de distribuir uniformemente y no tardar más del tiempo de trabajabilidad próximo a 10 minutos. Posterior a este lapso de tiempo la resina comenzará a endurecer.

- El aprensado se lo realiza con prensas “hechizas”. Se usa un torcómetro para uniformizar la presión de todas. Se comienza a ajustar del centro hacia los extremos para permitir un reacomodo.



*Figura 19: Prensado de las probetas.*

- Para obtener anclajes exactos de las uniones longitudinales se utiliza una plantilla endentada vertical. Se codifica para no confundir la posición de la pieza. Las probetas disponen de uniones a las diferentes láminas teniendo la precaución de evitar que se repitan en la misma sección de la pieza o se presenten en regiones de máximas solicitaciones.



*Figura 20a: Preparado de juntas dentadas*

*Figura 20b: Disposición de las uniones en las probetas*

### **3.3.1. Probetas para ensayo de cizalle**

Con la premisa que la parte vulnerable al corte horizontal de la pieza es en la línea de encolado, se diseñó probetas haciendo que la línea de encolado coincida con la línea de corte, es decir, a 1,8 cm de una de las caras de la pieza de sección 5 x 5 cm y altura 6,5 cm con una entalladura de 1,8 x 1,5 cm. de fondo y altura respectivamente como lo establece la norma COPANT 463.



*Figura 21: Probeta para ensayo de cizalle en la línea de encolado*

### **3.3.2. Probetas para ensayo de compresión paralela**

Se elaboró el encolado de 10 probetas de 3 láminas y de 10 probetas de 5 láminas. En ambos casos se conformó una pieza de sección 5 x 5 centímetros y altura 20 centímetros conforme a la norma COPANT 464.



*Figura 22: Probeta para ensayo de compresión paralela*

### **3.3.3. Probetas para ensayo de flexión**

Conforme a la norma COPANT 465, se preparó probeta de sección de 5 x 5 centímetros y longitud de 75 cm. Teniendo cuidado que el número de láminas sea impar para evitar que la línea de encolada coincida con el eje neutro donde el esfuerzo de corte horizontal es mayor. Se dispone de uniones endentadas en posiciones no críticas.

A todas las piezas, después del encolado, se les practicó un cepillado final para eliminar el lagrimeo de la cola y aristas sobre salidas.



*Figura 23: Probeta para ensayo de flexión estática*

El objeto de realizar la mitad de probetas usando 3 láminas y la otra mitad usando 5 láminas es evaluar la factibilidad, el comportamiento, las ventajas y/o desventajas de la madera laminada encolada obtenida en función al número de líneas de encolado.

### **3.4. Desarrollo de los ensayos en laboratorio**

Los ensayos se desarrollaron tomando en cuenta lo sugerido en la normas COPANT MADERAS.

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 comprobó en la zona próxima a la falla, que la humedad este dentro del parámetro establecido.

Se debe tener cuidado que el contacto metálico de la parte posterior del xilohigrómetro quede sobre la madera y no sobre la cola. Si se lo posiciona sobre la cola los datos se dispararan hacia arriba. También se debe tener cuidado de ejercer una cierta presión del instrumento sobre la madera caso contrario las lectura será baja.



*Figura 24a: Medición del contenido de humedad antes del ensayo*



*Figura 24b: Medición del contenido de humedad después del ensayo*

### **3.4.1. Cizallamiento en la línea de cola**

Para este ensayo se usa un accesorio adicional metálico donde se sujeta la probeta dejando libre la parte de la entalladura y con una placa metálica se aplica la carga a una velocidad uniforme aproximada a 0,6 mm/min hasta la ruptura.

Los datos obtenidos en laboratorio se registran en la planilla del anexo 1.



*Figura 25a: Ejecución del ensayo de cizalle en la prensa universal universal*



*Figura 25b: Medición del esfuerzo resistente último en la escala de la prensa*

### **3.4.2. Compresión paralela a la fibra**

Se coloca la probeta sobre la base fija de la prensa y en la parte superior se utiliza un plato móvil para compensar las fallas de escuadría de la sección transversal en el caso de haberlas. Se aplica la fuerza de forma continua a una velocidad de 0,6 mm/min hasta producir la rotura de la probeta. Se lectura un extensómetro dispuesto para medir las deformaciones que corresponden a las diferentes cargas. Los datos registrados se presentan en las planillas del anexo 2.



*Figura 26: ejecución del ensayo de compresión paralela*

### **3.4.3. Flexión estática**

Se utiliza la prensa universal equipada de un tren sumamente rígido que dispone de apoyos cilíndricos separados a 70 cm. donde se coloca la probeta y se aplica una carga al medio de la longitud a velocidad constante de 2,5 mm/min. Se mide la deflexión ocasionada para las diferentes cargas en intervalos iguales. Se registra la carga máxima y la imagen del tipo de falla. Los datos son presentados en la planilla del anexo 3.



*Figura 27a: ejecución del ensayo de flexión estática*



*Figura 27b: Medición de la deflexión*

### 3.5. Procesamiento de datos

El cálculo se presenta en las planillas en anexos 1, 2 y 3 respectivamente.

#### 3.5.1. Cizallamiento en la línea de cola

Para la obtención de la capacidad de la cola al cizalle EUM (esfuerzo unitario máximo) se divide la carga máxima (última) que es capaz de soportar la probeta entre el área de desgarre. Se toma en cuenta que la escala de la prensa universal nos da la carga en KN por lo que se debe multiplicar por un factor de conversión igual a 101,94 para obtener el esfuerzo en Kg/cm<sup>2</sup>.

$$EUM = \frac{P_{max}}{A} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde:

EUM: Esfuerzo unitario máximo, en [kg/cm<sup>2</sup>]

Pmax: Carga máxima, en [kg]

A: área resistente, en [cm<sup>2</sup>]

#### 3.5.2. Compresión paralela a la fibra

Del ensayo de compresión paralela a las fibras se obtendrá el Esfuerzo en el Límite Proporcional (ELP), el módulo de resistencia máxima (RUM) y el módulo de elasticidad (MOE) en esta dirección de la madera. Para este cometido se grafica la curva Esfuerzo-deformación dividiendo todas las cargas entre el área de la sección resistente para el eje de las ordenadas. Para el eje de las abscisas se resta a cada una de las deformaciones lecturas el valor de la primera de ellas (lectura cuando el instrumento está perfectamente apoyado sobre la probeta y aun sin ejercer presión).

##### a) Esfuerzo al límite de proporcionalidad (ELP)

Se obtiene al dividir la carga aplicada que corresponde al límite de proporcionalidad sobre el área que se lo aplica, es decir la sección transversal de la probeta.

$$ELP = \frac{P}{A} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde:

ELP: Esfuerzo al límite proporcional, en [kg/cm<sup>2</sup>]

P: Carga al límite de proporcionalidad, en [kg]

A: área resistente, en [cm<sup>2</sup>]

\*Al contar ya con la gráfica Esfuerzo-deformación, se identifica visualmente el límite de proporcionalidad en la curva y es el valor del esfuerzo ELP.

### **b) Resistencia última de la madera (RUM)**

Para calcular el esfuerzo último se utiliza el dato de carga última (P<sub>u</sub>) y se divide entre el área.

$$RUM = \frac{P_u}{A} \quad (\text{Ecuación 13})$$

Donde:

RUM: Resistencia última de la madera, en [kg/cm<sup>2</sup>]

P<sub>u</sub>: Carga última, en [kg]

A: área resistente, en [cm<sup>2</sup>]

### **c) Módulo de elasticidad (MOE)**

Para el cálculo del módulo de elasticidad se toma en cuenta la ecuación de la deformación

$$\sigma = E * \varepsilon$$

Despejando el módulo de elasticidad, denominando como E = MOE y tomando en cuenta

que para compresión simple  $\sigma = \frac{P}{A}$  y la deformación unitaria  $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$

Obtenemos:

$$MOE = \frac{P * L}{A * \Delta L} = (ELP) * \frac{L}{\Delta L} \quad (\text{Ecuación 14})$$

Donde:

MOE: Módulo de elasticidad, en [kg/cm<sup>2</sup>]

P: Carga al límite de proporcionalidad, en [kg]

A: área resistente, en [cm<sup>2</sup>]

L: Longitud inicial de la probeta, en [cm]

ΔL: Deformación de la probeta correspondiente al límite de proporcionalidad, en [cm]

### 3.5.3. Flexión estática

Del ensayo de flexión estática se obtendrá el Esfuerzo Unitario al límite de proporcionalidad (ELP), Módulo de Ruptura (MOR) y el Módulo de Elasticidad (MOE)

Se grafica la curva carga-deflexión ubicando la carga en el eje de las ordenadas y las deflexiones en el eje de la abscisas. En el grafico se identifica el punto límite de proporcionalidad, se obtiene la carga y la deflexión en dicho punto.

#### a) Esfuerzo al límite de proporcionalidad (ELP)

El esfuerzo Unitario en el límite de proporcionalidad se obtiene a partir de un análisis de la resistencia de los materiales.

En la viga de sección rectangular de base b, altura h y longitud L

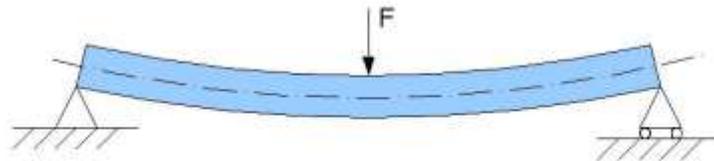


Figura 28: Deformada de una viga simplemente apoyada

El esfuerzo de tracción y compresión debido a la flexión es:  $\sigma = \frac{M \cdot y}{I}$

El esfuerzo máximo tanto de tracción como de compresión se produce en las fibras extremas

de la sección:  $y = \frac{h}{2}$

El momento de inercia será:  $I = \frac{bh^3}{12}$

El momento interno máximo debido a la carga puntual tendrá un valor igual a  $M = \frac{Pl}{4}$

Ordenando las ecuaciones y adecuando la nomenclatura obtenemos:

$$\sigma = ELP = \frac{3}{2} * \frac{P_1 * L}{b * h^2} \quad (\text{Ecuación 15})$$

Donde:

ELP: Esfuerzo al límite de proporcionalidad, en [kg/cm<sup>2</sup>]

P<sub>1</sub>: Carga al límite de proporcionalidad obtenida de la gráfica, en [kg]

b: Base de la sección, en [cm]

h: Altura de la sección, en [cm]

L: Longitud de apoyo a apoyo, en [cm]

#### **b) Módulo de Rotura (MOR)**

Se usa la misma consideración que para ELP, pero en este caso cambiando la fuerza externa del límite de proporcionalidad a la fuerza última que resiste la pieza y su correspondiente deflexión.

$$MOR = \frac{3}{2} * \frac{P_2 * L}{b * h^2} \quad (\text{Ecuación 16})$$

Donde:

MOR: Módulo de ruptura, en [kg/cm<sup>2</sup>]

P<sub>2</sub>: Carga última, en [kg]

b: Base de la sección, en [cm]

h: Altura de la sección, en [cm]

L: Longitud de apoyo a apoyo, en [cm]

### c) Módulo de elasticidad (MOE)

Para obtener el módulo de elasticidad se hace uso de la ecuación de la deflexión máxima para

una viga simplemente apoyada con carga en centro luz:  $y_{max} = \frac{P*L^3}{48EI}$

→ De esta se despeja el módulo de elasticidad E y se la representa por MOE y a la deflexión

lectura en centro luz por  $\Delta$ :  $MOE = \frac{P*L^3}{48*\Delta*I}$

Dejando el momento de inercia en función de la base y la altura

$$MOE = \frac{P*L^3}{4*\Delta*b*h^3} \quad (\text{Ecuación 17})$$

Donde:

MOE: Módulo de elasticidad, en [kg/cm<sup>2</sup>]

P: Carga al límite de proporcionalidad obtenida de la gráfica, en [kg]

b: Base de la sección, en [cm]

h: Altura de la sección, en [cm]

L: Longitud de apoyo a apoyo, en [cm]

$\Delta$ : Deflexión en centro luz correspondiente al límite de proporcionalidad, en [cm]

### 3.6. Densidad referencial

Para estimar el peso propio de la madera laminada, se determinó la densidad referencial a partir de muestras obtenidas de las mismas probetas pos ensayos mecánicos.

Se obtuvo el peso en una balanza de precisión 0,01 g y luego se determinó volumen por inmersión en agua previendo de barnizar la muestra para evitar la absorción. La planilla y el proceso de datos se presentan en el anexo 5.



*Figura 29a: Pesado en balanza de precisión*



*Figura 29b: determinación del volumen por inmersión*

### **3.7. Control de duración al intemperismo**

Una parte de las probetas ensayadas fueron expuestas directamente al sol y la otra parte sumergidas en agua durante 50 días para observar su comportamiento en estas situaciones extremas



*Figura 30a: Exposición al sol de las probetas*



*Figura 30b: Inmersión al agua las probetas*

### **3.8. Curvado de la madera**

Para el curvado de la madera de forma rápida y efectiva se fusionó la técnica del laminado con la del calentamiento obteniendo curvaturas inmediatas sin afectar en absoluto la estructura de la madera. Se varió los espesores y la cantidad de calor tratando de encontrar un equilibrio ya que excesivo calor quemaría la madera y una excesiva fuerza la agrietaría.



*Figura 31: Curvado de la madera después de someter a calor*

### **3.9. Diseño de cubierta con elementos en arco de madera laminada**

Como complemento al trabajo de investigación se realiza una propuesta de la cubierta en arco para la iglesia católica de la comunidad de San Andrés que a la fecha se encuentra en construcción en la etapa de muro de planta baja. Se dispone de los planos en planta presentado en el anexo 8.



*Figura 32: fotografía de la iglesia de San Andrés en construcción*

Se define que la cubierta estará sustentada sobre una serie de arcos paralelos vistos desde el interior de la nave. En la parte superior, sobre todo el desarrollo de la curva, se dispondrá de

entablado (machimbrado) de forma transversal al arco. El entablado servirá de base para la teja shingle y de cielo raso.

Se realiza un análisis de carga actuantes teniendo en cuenta el efecto ocasionado por el viento y el granizo:

### Carga de viento:

La velocidad del viento para la ciudad de Tarija es de 24 m/s por lo que expresada en kilómetros por hora es  $V = 86,4$  [Km/h].

La altura máxima de la cubierta (medida desde el nivel del piso hasta el punto clave) es de 13,63 m respecto al nivel del suelo. La velocidad del viento calculada para dicha altura será la que se asuma para toda la cubierta.



Figura 33: Vista de frente iglesia con techo en arco propuesto

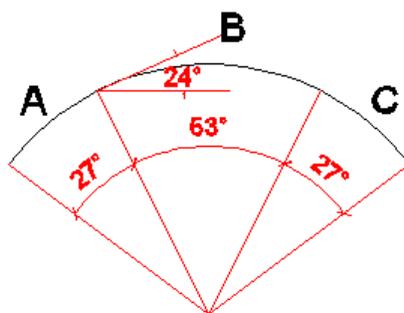
Cálculo de la velocidad de diseño del viento utilizando la ecuación 8:

$$V_h = 86,4 * \left[ \frac{13,63}{10} \right]^{0,22} = 92,49 \text{ [Km/h]}$$

Cálculo del coeficiente de forma con ayuda de la figura 11 y tabla 6 en función de la relación flecha/luz para los arcos de la nave principal:

$$r = \frac{f}{L} = \frac{5,38}{21,51} = 0,25$$

Zonas de la cubierta semicircular de los arcos de la nave principal:



Cálculo del coeficiente de forma:

Relación $r=f/L$	A	B	C
0,25	$3r - 1$	$-0,7 - r$	- 0,5
<b>Coefficiente de forma</b>	- 0,25	- 0,95	- 0,50

Cálculo de Presión: El coeficiente de forma calculado en el paso anterior, al ser negativo indica que en todas las zonas de la cubierta en arco se produce succión, siendo el valor máximo en el tramo central y donde se determina el valor de fuerza por unidad de área conforme a la ecuación 7.

$$P_h = 0,00483 * C * V_h^2$$

$$P_h = 0,00483 * (-0,95) * 92,49^2 = -39,25 \text{ Kg/m}^2$$

La carga exterior ejercida por el viento se supondrá perpendicular a la superficie sobre la cual se actúa. Analizando estáticamente las cargas en el punto más crítico (extremos de la zona B donde el ángulo de inclinación de la recta tangente respecto a la horizontal es 24°) tenemos que el peso del entablado más la teja shingle suma 23,5 Kg/m<sup>2</sup> (conforme a los cálculos subsiguientes: peso propio teja shingle = 10 Kg/m<sup>2</sup>, peso propio del entablado 13,5 Kg/m<sup>2</sup>) que actúan en dirección gravitacional, a partir de este dato obtenemos que la carga en dirección perpendicular negativa a la superficie del entablado será igual a 23,5 \* cos (24°) = 21,47 Kg/m<sup>2</sup>. En sentido contrario actúa los 39,25 kg/cm<sup>2</sup> correspondientes a la succión. Esta

última supera en 17,78 kg/m<sup>2</sup> al peso muerto y este excedente debe ser controlado por los clavos dispuestos en cada extremo del tramo.

Los 17,78 kg/m<sup>2</sup> actúan sobre una tabla de ancho 0,14 m. (machimbre comercial) y longitud 1,27 m, por lo tanto, la fuerza resultante y necesaria que entre los dos extremos deben evitar la succión del viento es:

$$F = 17,78 * 0,14 * 1,27 = 3,16 \text{ Kg}$$

La carga admisible de extracción en Kg es de 4 veces la penetración por el diámetro del clavo en cm. (de la tabla 12)

$$F = 4 * 2,5 * 3,2 = 32,5 \text{ Kg (para madera seca este valor se puede duplicar)}$$

Por lo tanto, basados en la generosa diferencia demanda – capacidad (3,16 Kg. a 2 veces 32,5 Kg.), concluimos que estructura es segura frente a la acción del viento. Una validación, es el dato experimental de 49,9 Kg para el ensayo de extracción de clavos de 25 mm de diámetro e hincado 32 mm en madera seca al aire presentado Estudio para la Determinación de la Propiedades Mecánicas de la especie Pino del Cerro (Podocarpus Parlatorei).

Se verifica que el espesor del entablado cumple con el mínimo de 6 veces el diámetro del clavo: 6\*25 mm = 150 mm. (Ver figura 12)

Los arcos con la acción del peso propio y el empotramiento en la estructura de hormigón armado garantizan su buen comportamiento frente al viento.

### **Carga de granizo:**

Por la geometría semicircular es poco probable que se acumule granizo sobre la cubierta. Para tener una idea del orden de las cargas, realizamos una observación en la clave del arco donde la recta tangente es igual a la recta horizontal ( $\alpha=0$ ) y suponiendo que en este punto se podría acumularía masa de granizo, a partir de la ecuación 9, determinamos la altura hg que representaría la sobre carga de 50 Kg/m<sup>2</sup> que se contempla en el diseño:

$$C_g = \delta * h_g * \left( \frac{45^\circ - \alpha}{45^\circ} \right)$$

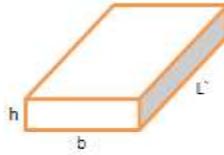
$$h_g = \frac{C_g}{\delta * (1)}$$

$$h_g = \frac{50}{900} = 0,056 [m]$$

Prácticamente son 5,6 cm de altura de granizo considerados de forma implícita en el cálculo de la estructura y ubicados en el punto más desfavorable. Valor que no se supera fácilmente en una cubierta de este tipo y para un evento característico en nuestro medio.

### 3.9.1. Cubierta de la nave principal:

#### Cálculo de entablado nave principal:



Carga del peso propio entablado:

Madera del grupo C			
PP	13,50	Kg/m <sup>2</sup>	De la tabla 8.10 Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino
Eprom	90000,00	Kg/cm <sup>2</sup>	De la tabla 13.2 Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino
b	15,00	cm	Asumido para el calculo iterativo
h	1,50	cm	Asumido para el calculo iterativo
L	1,27	m	En función de la distribución en planta de los arcos
I	0,0000000422	m <sup>4</sup>	

Peso de la cubierta:

Teja shingle	10,00	Kg/m <sup>2</sup>	De la ficha técnica de tejas shingle distribuidas por Synergy
--------------	-------	-------------------	---

CARGA MUERTA:

PP+Teja	23,50	Kg/m <sup>2</sup>	* CARGA EQUIVALENTE PARA DEFLEXIÓN: Se mayor la carga permanente en un 80% para el control de la deflexión diferida (secc.8.1.1 Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino)
CM	3,525	Kg/m	
CM Mayorada	6,345	Kg/m	

SOBRE CARGA DE DISEÑO:

SC	50	Kg/m <sup>2</sup>	De la tabla 13.2 Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino
SC	7,5	Kg/m	

DEFLEXIÓN MÁXIMA: para total de las cargas q=CM+S' DEFLEXIÓN ADMISIBLE: Sin cielo raso de yeso

Ec. Para elemento continuo

$$Y_{max} = \frac{1 * q * L^4}{185 * EI}$$

$$Y_{adm} = \frac{L}{250}$$

Ymax=	0,50	cm	≤	Yadm=	0,51	cm
<b>Correcto</b>						

DEFLEXIÓN MÁXIMA: para la cargas viva q=SC

DEFLEXIÓN ADMISIBLE: sólo para la sobre carg

Ec. Para elemento continuo

$$Y_{max} = \frac{1 * q * L^4}{185 * EI}$$

$$Y_{adm} = \frac{L}{350}$$

Ymax=	0,27	cm	≤	Yadm=	0,36	cm
<b>Correcto</b>						

Cálculo del momento máximo:

$$M_{max} = \frac{ql^2}{8}$$

M <sub>max</sub> =	2,21	Kg*m
--------------------	------	------

Cálculo del cortante máximo:

$$V_{max} = \frac{ql}{2}$$

V <sub>max</sub> =	6,97	Kg
--------------------	------	----

Control de los esfuerzos axiales máximos:

$$\sigma_{max} = \frac{M * y}{I}$$

Datos para madera aserrada (Tabla 13,2 Manual de diseño para maderas del Grupo Andino)

f <sub>m</sub>	100	Kg/m <sup>2</sup>
----------------	-----	-------------------

\*En entablados por la acción conjunta se puede incrementar en 10% el esfuerzo admisible

σ <sub>max</sub> =	39,21	Kg/m <sup>2</sup>	≤	f <sub>m</sub>	110	Kg/m <sup>2</sup>
Correcto						

Control de los esfuerzos cortantes:

$$\tau = \frac{3 * V}{2 * b * h}$$

Datos para madera aserrada (Tabla 13,2 Manual de diseño para maderas del Grupo Andino)

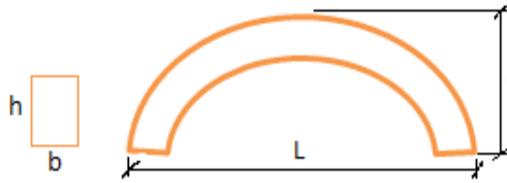
f <sub>v</sub>	8	Kg/m <sup>2</sup>
----------------	---	-------------------

\*En entablados por la acción conjunta se puede incrementar en 10% el esfuerzo admisible

τ <sub>max</sub> =	0,46	Kg/m <sup>2</sup>	≤	f <sub>m</sub>	8,8	Kg/m <sup>2</sup>
Correcto						

**Cálculo del arco de la nave principal:**

Espaciamiento entre arcos	1,27	m
Luz (L)	21,50	m
Flecha (f)	5,38	m
Base (b)	5,00	cm
altura (h)	25,00	cm
Radio de curvatura ( R )	13,44	m
Inercia	6510,42	cm <sup>4</sup>



Espesor de láminas (e): 
$$e \leq \frac{R}{200} = 6,72 \text{ cm}$$

→ Utilizar 5 láminas de 5 cm para h en cm = 25,00

Madera Laminada Encolada: Podocarpus Parlatorei

\*Factor de modificación de resistencia por curvatur 0,95

Propiedades físicas MLE:

Peso específico	
480	Kg/m <sup>3</sup>
El Manual de Diseño del Pacto Andino prevé un incremento del 25%	
600	Kg/m <sup>3</sup>

Propiedades mecánicas MLE:

Valores obtenidos en el presente trabajo de investigación

Tipo	Esf. Adm.	*Esf. Adm. directriz curva	Unidades
Emin	40204,86		Kg/cm <sup>2</sup>
Eprom	51753,40		Kg/cm <sup>2</sup>
fm	63,72	60,53	Kg/cm <sup>2</sup>
fc	102,01	96,91	Kg/cm <sup>2</sup>
fv	4,04	3,84	Kg/cm <sup>2</sup>

Sobre Carga	50,00	Kg/m <sup>2</sup>	63,25	Kg/m	CARGA VIVA
Peso de la cubierta	10,00	Kg/m <sup>2</sup>	12,65	Kg/m	CARGA MUERTA
Peso del entablado	13,50	Kg/m <sup>2</sup>	17,08	Kg/m	
Peso propio arco			7,50	Kg/m	
<b>CARGA TOTAL</b>			<b>100,48</b>	<b>Kg/m</b>	

93

123

Bajo estas condiciones se resuelve el arco como biempotrado en el SAP-2000, se encuentra las reacciones en los apoyos, las deformaciones y los esfuerzos internos:



**Solicitaciones máxima para el diseño:**

Efecto	Valor	Unidad
Rx	1180,5	Kg
Ry	1252,76	Kg
M	236,98	Kg*m
Ymax	0,051	m
Nmax	1714,94	Kg
Vmax	192,58	Kg
Mmax	236,98	Kg*m

**Verificación de la flecha:**



Ymax	0,051	m	≤	$Y_{adm} = \frac{L}{250} =$	0,086	m
Correcto						

**Verificación de esfuerzo de compresión :**



$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{My}{I} = 13,72 \quad (+) \quad 45,50 \quad (=) \quad 59,22 \quad \text{Kg/cm}^2$$

$\sigma_{max} =$	59,22	Kg/cm <sup>2</sup>	≤	$f_m = \sigma_{adm} =$	60,53	Kg/cm <sup>2</sup>
Correcto						

**Verificación de esfuerzo de cortantes:**



cortante horizontal máximo ( $\tau_{max}$ )

$$\tau_{max} = \frac{3 * V}{2 * b * h} = 2,31 \quad \text{[kg/cm}^2\text{]}$$

$\tau_{max} =$	2,31	Kg/cm <sup>2</sup>	≤	$\tau_{adm} =$	3,84	Kg/cm <sup>2</sup>
Correcto						

## Diseño de los apoyos: Arco de la nave principal

Se sigue el procedimiento planteado en el Manual de Diseño para Madera del Grupo Andino para uniones tal como si se tratase de madera maciza y reducción de la resistencia por curvatura al 95% para P y Q.

Cargas admisible para uniones emperradas - doble cizallamiento:

L: Long. d: diámetro del perno				Grupo C	
*L (cm)	d (cm)	d (cm)	L/d	P (Kg)	Q (Kg)
5	1,27	1/2	3,9	376	114

Tabla 12,7 Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino

Grupo C	
P (Kg)	Q (Kg)
357,2	108,3

En la sección 12.2.2 del Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino se sugiere:

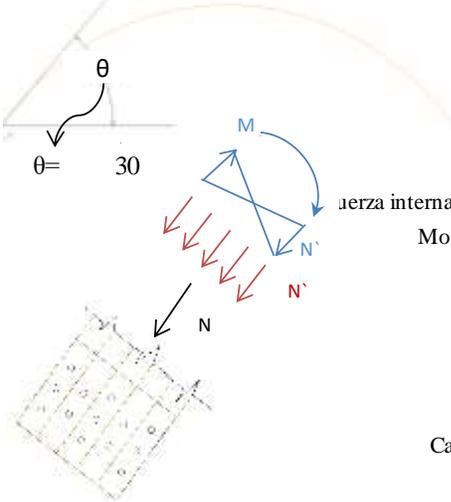
\* Cuando los elementos laterales son metálicos, L debe considerarse igual al espesor del elemento central de madera.

\*\* Cuando los elemento de unión son pletinas metálicas se puede aumentar en 25% a P.

Grupo C	
**P (Kg)	Q (Kg)
446,5	108,3

\*\*\*Para elementos inclinados se estimará la capacidad admisible N mediante la ecuación de Hankinson .

$$***N = \frac{P \cdot Q}{P \sin^2 \theta + Q \cos^2 \theta} \rightarrow 250,7 \quad \text{Kg}$$



Fuerza interna N' en el apoyo (del cálculo del arco) =	1714,94	Kg
Momento interno M (del cálculo del arco) =	236,98	Kg*m
Altura del arco h =	0,25	m
Fuerza N'' debida al momento =	947,92	Kg

Carga solicitante N del cálculo del arco = 2662,86 Kg

Nº de pernos necesarios = 10,6 ≈ 11

Se analiza la reducción de la carga admisible por efecto de grupo:

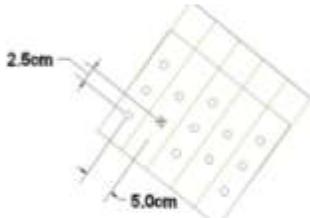


fig. distribución propuesta. Definición de línea de pernos (Sección 12.2.6 Manual de Diseño para Maderas de Grupo Andino)

e	≤	a/2	Pertenece a la misma línea?
5	≤	2,5/2=1,25	Falso! Es línea independiente

Se determina que la línea X es una línea independiente de pernos. Mediante cálculo iterativo se obtiene que se necesita 13 pernos. Se propone que las líneas extremas y central tengan 3 pernos y las restantes 2 pernos. Reduciendo la capacidad admisible para el caso según la tabla 12.8 del Manual de Diseño para Maderas de Grupo Andino: F = 0,94. Se verifica que el requerimiento de pernos es ligeramente menor a la cantidad planteada.

Grupo C	
P (Kg)	Q (Kg)
388,46	94,22

$$N = \frac{P * Q}{P \sin^2 \theta + Q \cos^2 \theta} = 218,1 \quad \text{Kg}$$

Nº de pernos necesarios = 12,2 ≈ 13

UBICACIÓN DE LOS PERNOS	d en cm =	1,27	ADOPTAMOS
Elemento cargado paralelo al grano			
<i>A lo largo del grano</i>		cm	cm
Espaciamiento entre pernos	4d	5,08	5,00
Distancia al extremo en compresión	4d	5,08	5,00
<i>Perpendicular al grano</i>		cm	cm
Espaciamiento entre línea de pernos	2d	2,54	5,00
Distancia a los bordes	2d	2,54	2,50

Según tabla 12.9 de Manual de diseño de maderas del Grupo Andino

### Verificando la capacidad de aplastamiento de la plancha: (secc. 3.6.10 Diseño de Estructuras Metálicas - María García Fratelli)

datos:	Espesor de la lamina	3,8	(mm)
	Esfuerzo último del acero	4200	(Kg/cm <sup>2</sup> )
	Carga Solicitante N = Pu	2662,86	(Kg)

Ec. 3.31 Diseño de Estructuras Metálicas - María García Fratelli

$$R_n = 2,4 * d_b * t * F_u$$

Donde:

- Rn= capacidad resistente teórica (Kg)
- db= diámetro nominal del perno (cm)
- t= espesor de la plancha (cm)
- Fu= esfuerzo último del acero (Kg/cm<sup>2</sup>)
- φ= factor de minoración a la capacidad resistente
- η= número de pernos
- Pu= carga solicitante (Kg)

$$\phi_p * R_n * \eta > P_u$$

$$R_n = 4864,608 \quad (\text{Kg})$$

$$\phi_p * R_n * \eta = 47429,928 \quad (\text{Kg})$$

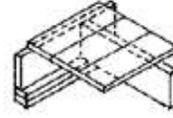
Existe amplio margen de seguridad de las pletinas metálicas frente a fallas por aplastamiento conforme se exige en 12.2.2 de Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino

### Estabilidad lateral nave principal:

Recomendaciones empíricas. Tabla 8,6 Manual de diseño para maderas del Grupo Andino

$$R = \frac{\text{altura}}{\text{base}} = \frac{h}{b} = 5,00 \quad \rightarrow$$

5: Usar en el borde de compresión entablado o viguetas

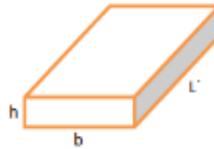


El diseño de la cubierta de la nave principal contempla el entablado en su totalidad para alojar la teja shigle. Este mismo entablado trabajará como arriostramiento para garantizar la estabilidad lateral. En la nave principal se cumple a cabalidad el requerimiento.

### 3.9.2. Cubierta del coro:

**Cálculo de entablado del coro:**

Carga del peso propio entablado:



Madera del grupo C		
PP	13,50	Kg/m <sup>2</sup>
Eprom	90000,00	Kg/cm <sup>2</sup>
b	15,00	cm
h	1,50	cm
L	1,14	m
I	0,0000000422	m <sup>4</sup>

De la tabla 8.10 Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino  
 De la tabla 13.2 Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino  
 Asumido para el calculo iterativo  
 Asumido para el calculo iterativo  
 En función de la distribución en planta de los arcos

Peso de la cubierta:

Teja shingle	10,00	Kg/m <sup>2</sup>
--------------	-------	-------------------

De la ficha técnica de tejas shingle distribuidas por Synergy

**CARGA MUERTA:**

PP+Teja	23,50	Kg/m <sup>2</sup>
CM	3,525	Kg/m
CM Mayorada	6,345	Kg/m

\* CARGA EQUIVALENTE PARA DEFLEXIÓN:  
 Se mayoró la carga permanente en un 80% para el control de la deflexión diferida (secc.8.1.1 Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino)

**SOBRE CARGA DE DISEÑO:**

SC	50	Kg/m <sup>2</sup>
SC	7,5	Kg/m

De la tabla 13.2 Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino

**DEFLEXIÓN MÁXIMA:** para total de las cargas q=CM+S **DEFLEXIÓN ADMISIBLE:** Sin cielo raso de yeso

Ec. Para elemento continuo

$$Y_{max} = \frac{1 * q * L^4}{185 * EI}$$

$$Y_{adm} = \frac{L}{250}$$

Ymax=	0,33	cm	≤	Yadm=	0,46	cm
Correcto						

**DEFLEXIÓN MÁXIMA:** para las cargas viva q=SC

**DEFLEXIÓN ADMISIBLE:** sólo para la sobre carga

Ec. Para elemento continuo

$$Y_{max} = \frac{1 * q * L^4}{185 * EI}$$

$$Y_{adm} = \frac{L}{350}$$

Ymax=	0,18	cm	≤	Yadm=	0,33	cm
Correcto						

Cálculo del momento máximo:

$$M_{max} = \frac{ql^2}{8}$$

Mmax=	1,79	Kg*m
-------	------	------

Cálculo del cortante máximo:

$$v_{max} = \frac{ql}{2}$$

Vmax=	6,28	Kg
-------	------	----

Control de los esfuerzos axiales máximos:

$$\sigma_{max} = \frac{M * y}{I}$$

Datos para madera aserrada (Tabla 13,2 Manual de diseño para maderas del Grupo Andino)

f <sub>m</sub>	100	Kg/m <sup>2</sup>
----------------	-----	-------------------

\*En entablados por la acción conjunta se puede incrementar en 10% el esfuerzo admisible

σ <sub>max</sub> =	31,84	Kg/m <sup>2</sup>	≤	f <sub>m</sub>	110	Kg/m <sup>2</sup>
			Correcto			

Control de los esfuerzos cortantes:

$$\tau = \frac{3 * V}{2 * b * h}$$

Datos para madera aserrada (Tabla 13,2 Manual de diseño para maderas del Grupo Andino)

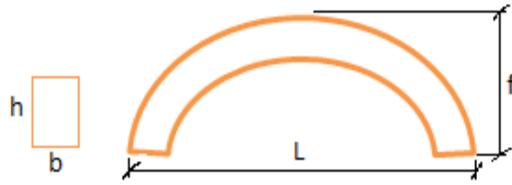
f <sub>v</sub>	8	Kg/m <sup>2</sup>
----------------	---	-------------------

\*En entablados por la acción conjunta se puede incrementar en 10% el esfuerzo admisible

τ <sub>max</sub> =	0,42	Kg/m <sup>2</sup>	≤	f <sub>m</sub>	8,8	Kg/m <sup>2</sup>
			Correcto			

**Cálculo del arco del coro:**

Espaciamiento entre arcos	1,14	m
Luz (L)	11,93	m
Flecha (f)	2,39	m
Base (b)	3,80	cm
altura (h)	12,00	cm
Radio de curvatura ( R )	8,58	m
Inercia	547,2	cm <sup>4</sup>



Espesor de láminas (e): 
$$e \leq \frac{R}{200} = 4,29 \text{ cm}$$

→ Utilizar 3 láminas de 4 cm para h en cm = 12,00

Madera Laminada Encolada: Podocarpus Parlatorei

\*Factor de modificación de resistencia por curvatura: 0,95

Propiedades físicas MLE:

Peso específico	
480	Kg/m <sup>3</sup>
El Manual de Diseño del Pacto Andino prevé un incremento del 25%	
600	Kg/m <sup>3</sup>

Propiedades mecánicas MLE:

*Valores obtenidos en el presente trabajo de investigación*

Tipo	Esf. Adm.	*Esf. Adm. directriz curva	Unidades
E <sub>min</sub>	40204,86		Kg/cm <sup>2</sup>
E <sub>prom</sub>	51753,40		Kg/cm <sup>2</sup>
f <sub>m</sub>	63,72	60,53	Kg/cm <sup>2</sup>
f <sub>c</sub>	102,01	96,91	Kg/cm <sup>2</sup>
f <sub>v</sub>	4,04	3,84	Kg/cm <sup>2</sup>

Sobre Carga	50,00	kg/m <sup>2</sup>	57,00	Kg/m	CARGA VIVA
Peso de la cubierta	10,00	kg/m <sup>2</sup>	11,40	Kg/m	CARGA MUERTA
Peso del entablado	13,50	kg/m <sup>2</sup>	15,39	Kg/m	
Peso propio arco			2,74	Kg/m	
<b>CARGA TOTAL</b>			<b>86,53</b>	<b>Kg/m</b>	

84  
107

Bajo estas condiciones se resuelve el arco como biempotrado en el SAP-2000, se encuentra las reacciones en los apoyos, las deformaciones y los esfuerzos internos:



**Solicitaciones máxima para el diseño:**

Efecto	Valor	Unidad
Rx	691,9	Kg
Ry	576,71	Kg
M	37,07	Kg*m
Ymax	0,03	m
Nmax	891,1	Kg
Vmax	65,78	Kg
Mmax	36,71	Kg*m

**Verificación de la flecha:**



Ymax	0,03	m	≤	$Y_{adm} = \frac{L}{250} =$	0,04772	m
<b>Correcto</b>						

**Verificación de esfuerzo de compresión :**



$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{My}{I} = 19,54 \quad (+) \quad 40,25 \quad (=) \quad 59,79 \quad \boxed{\text{Kg/cm}^2}$$

$\sigma_{max} =$	59,79	Kg/cm <sup>2</sup>	≤	$\sigma_{adm} =$	60,53	Kg/cm <sup>2</sup>
<b>Correcto</b>						

**Verificación de esfuerzo de cortantes:**



cortante horizontal máximo ( $\tau_{max}$ )

$$\tau_{max} = \frac{3 * V}{2 * b * h} = 2,16 \quad [\text{kg/cm}^2]$$

$\tau_{max} =$	2,16	Kg/cm <sup>2</sup>	≤	$\tau_{adm} =$	3,84	Kg/cm <sup>2</sup>
<b>Correcto</b>						

**Diseño de los apoyos: Arco del coro**

Se sigue el procedimiento planteado en el Manual de Diseño para Madera del Grupo Andino para uniones tal como si se tratase de madera maciza y reducción de la resistencia por curvatura al 95% para P y Q.

Cargas admisibles para uniones emperradas - doble cizallamiento:

L: Long. d: diámetro del perno				Grupo C	
*L (cm)	d (cm)	d (cm)	L/d	P (Kg)	Q (Kg)
3,8	0,95	3/8	4,0	214,6	74,2

Tabla 12,7 Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino

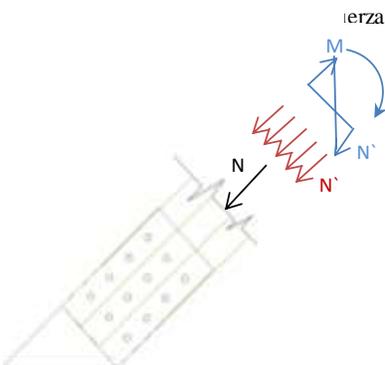
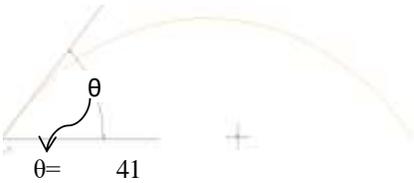
Los valores de P y Q se definen por interpolación para L=3.8 En la sección 12.2.2 del Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino se sugiere:

\* Cuando los elementos laterales son metálicos, L debe considerarse igual al espesor del elemento central de madera.

\*\* Cuando los elementos de unión son pletinas metálicas se puede aumentar en 25% a P.

\*\*\*Para elementos inclinados se estimará la capacidad admisible N mediante la ecuación de Hankinson .

$$***N = \frac{P*Q}{Psen^2\theta + Qcos^2\theta} \rightarrow 119,9 \quad Kg$$



- Fuerza interna N' en el apoyo (del cálculo del arco) = 891,1 Kg
- Momento interno M (del cálculo del arco) = 36,71 Kg\*m
- Altura del arco h = 0,12 m
- Fuerza N'' debida al momento = 305,9 Kg

Si bien la distribución de fuerzas internas es trapezoidal para el cálculo se considera la máxima ocurrida en el canto interno:

- Carga solicitante N (N' + N'') = 1197,0 Kg
- Nº de pernos necesarios = 10,0 ≈ 10

**Se analiza la reducción de la carga admisible por efecto de grupo:**

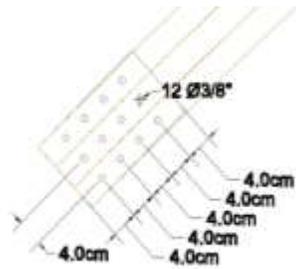


fig. distribución propuesta

Mediante cálculo iterativo se obtiene que cada línea tendrá 4 pernos. Reduciendo la capacidad admisible para el caso según la tabla 12.8 del Manual de Diseño para Maderas de Grupo Andino: F = 0,94. Se verifica que el requerimiento de pernos es ligeramente menor a la cantidad planteada.

Grupo C	
P (Kg)	Q (Kg)
221,71	61,33

$$N = \frac{P * Q}{P \sin^2 \theta + Q \cos^2 \theta} = 104,3 \quad \text{Kg}$$

Nº de pernos necesarios = 11,5 ≈ 12

UBICACIÓN DE LOS PERNO	d en cm =	0,95	ADOPTAMOS
Elemento cargado paralelo al grano			
A lo largo del grano		cm	cm
Espaciamiento entre pernos	4d	3,81	4
Distancia al extremo en compresión	4d	3,81	4
Perpendicular al grano		cm	cm
Espaciamiento entre línea de pernos	2d	1,905	2
Distancia a los bordes	2d	1,905	2

Según tabla 12.9 de Manual de diseño de maderas del Grupo Andino

### Verificando la capacidad de aplastamiento de la plancha: (secc. 3.6.10 Diseño de Estructuras Metálicas María García Fratelli)

datos:            Espesor de la lamina            3            (mm)  
                          Esfuerzo último del acero            4200            (Kg/cm<sup>2</sup>)  
                          Carga Solicitante N = Pu            1197,01667            (Kg)

Ec. 3.31 Diseño de Estructuras Metálicas María García Fratelli

$$R_n = 2,4 * d_b * t * F_u$$

Donde:

Rn= capacidad resistente teórica (Kg)  
 db= diámetro nominal del perno (cm)  
 t= espesor de la plancha (cm)  
 Fu= esfuerzo último del acero (Kg/cm<sup>2</sup>)  
 φ= factor de minoración a la capacidad resistente  
 η= número de pernos  
 Pu= carga solicitante (Kg)

$$\phi_p * R_n * \eta > P_u$$

$$R_n = 2872,8 \quad (\text{Kg})$$

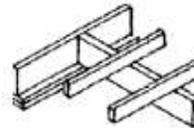
$$\phi_p * R_n * \eta = 25855,2 \quad (\text{Kg})$$

Se verifica que existe amplio margen de seguridad de las pletinas metálicas frente a fallas por aplastamiento conforme se exige en 12.2.2 de Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino

### Estabilidad lateral coro:

Recomendaciones empíricas. Tabla 8,6 Manual de diseño para maderas del Grupo Andino

$$R = \frac{\text{altura}}{\text{base}} = \frac{h}{b} = 3,16 \quad \rightarrow \quad \approx 4: \text{ Usar correas}$$



El diseño de la cubierta del coro contempla el entablado en su totalidad, por lo tanto se cumple ampliamente el requerimiento para la estabilidad lateral.

### 3.9.3. Análisis de costos y cronograma:

Los costos y rendimientos están basados en datos de la revista Presupuesto & Construcción. Los datos desconocidos se obtienen mediante cotizaciones y entrevistas a trabajadores con experiencia. El estudio de costos en detalle y consideraciones de insumos, rendimiento se presenta en el anexo 7. Se propone un tiempo de ejecución igual a un mes calendario con sus respectivos frentes de trabajo. El cronograma se presenta en anexo 7.

Tabla 12: Esfuerzos al cizalle en la línea de cola

Item N°	DESCRIPCION	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (Bs)	Precio Total (Bs)
1	Arcos MLE S 5x25 cm R 13,44 m	m	423,81	183,97	77968,63
2	Arcos MLE S 3,8 x 12 cm R 8,58 m	m	65,85	111,53	7344,28
3	Izado y sujeción de los elementos estructurales	Glb	1	4912,49	4912,49
4	Provisión y colocado del entablado	m <sup>2</sup>	599,07	106,84	64002,86
5	Provisión y colocado de teja shingle	m <sup>2</sup>	599,07	110,24	66043,14
<b>PRECIO TOTAL EN BS.</b>					<b>220271,40</b>

*Fuente: Elaboración propia*

### 3.9.4. Resumen del diseño:

El diseño de los elementos de madera aserrada se basa netamente en datos y procedimientos del Manual de Diseño para Maderas de Grupo Andino. Para el diseño de los elementos de madera laminada encolada (MLE) se adopta los criterios y datos experimentales obtenidos en el presente trabajo de investigación.

El entablado para la nave principal y el coro se realiza con madera del Grupo C de escuadría real (b x h) 14 cm x 1,5 cm, siendo estas las dimensiones típicas de los machimbres comerciales.

Los arcos de MLE de pino del cerro se distribuyen de forma equidistantes a 1,27 m en la nave principal y 1,14 m en el coro medido de eje a eje. Se muestra en el plano del anexo 8.

En la nave principal se requiere de 17 arcos de sección (b x h) 5 cm x 25 cm conformados de 5 láminas de 5 cm de alto. Mientras que en el coro se requiere de 5 arcos de sección 3,8 cm x 12 cm conformados de 3 láminas de 4 cm de alto.

Los cálculos de arco hiperestático se realiza con el programa SAP 2000 V.14 y los reportes se muestra en el anexo 6.

Los apoyos se materializan de platabandas de 3mm en espesor a cada lado de la pieza y pernos de diámetro, longitud y distribución mostrada en los planos de anexo 8.

### **3.9.5. Método constructivo artesanal y verificación (experiencia práctica)**

a) Para la fabricación de elementos de madera laminada se adopta el siguiente proceso constructivo artesanal:

#### **1.- Laminado de la madera.**

En las barracas se dispone de madera con un contenido de humedad en equilibrio y en volumen comercial denominado tabla de 20 pie<sup>2</sup>/tablar. Técnicamente las dimensiones de la tabla es de ancho 1 pie (12 pulgadas), largo 10 pies y alto 2 pulgadas pero en la realidad se comercializan en cualquier dimensión que cubicados de 20 pie<sup>2</sup>/tablar. Es preciso mencionar que la unidad de medida pie<sup>2</sup>/tablar representa un volumen compuesto por un área y un espesor siendo las primeras dos dimensiones medidas en pies y la tercera dimensión corresponde a un espesor igual a una pulgada.

Se realiza los cortes en una sierra circular o sierra sinfín para obtener láminas en las dimensiones adecuadas según el tipo de elemento estructural a manufacturar. Estudios realizados en universidades de Chile y Colombia recomiendan que los espesores oscilen entre 2 a 5 cm. encontrando así un equilibrio entre economía y trabajabilidad.

Se debe tener cuidado de laminar uniformemente y en las dimensiones necesarias para evitar cepillados de adecuación, los mismos que resultan contraproducentes y antieconómicos (según experiencia del presente proyecto).

Para elementos de directriz curva se debe tener en cuenta que el espesor de las láminas sea menor pero cercano al máximo permitido por las normas para el radio de curvatura a fabricar.

## 2.- Inspección visual y selección de la madera.

Se debe verificar visualmente que las láminas presenten condiciones adecuadas para el uso en el elemento estructural. En caso de existir nudos insanos, grietas, pudrición, perforaciones, bolsas de resina, se debe descartar el área afectada.

## 3.- Curvado de las láminas.

El curvado se realiza mediante la combinación de métodos de laminado y calentado. Las láminas se sumergen en agua hirviendo por un lapso de quince minutos. Posterior a ello y de forma inmediata se traslada la lámina a un molde donde se aplica una fuerza mecánica que obliga a la pieza a tomar la forma deseada. En caso que la pieza no responda adecuadamente al curvado se debe vaporizar constantemente a la lámina dentro del molde para ablandar las fibras, donde interviene la lignina y la celulosa. Además se tiene que reducir la velocidad de aplicación de la fuerza para evitar fracturas.

Después de obtener la curvatura, se deja la pieza en la formaleta para que evapore el agua hasta alcanzar contenido de humedad de equilibrio (%CHE). Cuando alcanza %CHE la pieza queda definitivamente en la forma del molde y desaparecen los esfuerzos residuales inducidos por el curvado.

## 4.- Preparación de uniones.

Las láminas previamente dimensionadas, son acomodadas en la distribución espacial de la pieza. Se toma en cuenta que todas las láminas estén con la orientación de la fibra en la misma dirección para permite el cepillado posterior. Se fabrican las uniones endentadas longitudinales que pueden ser horizontales o verticales dependiendo de cuál de ellas es más

eficiente para cada caso en particular, un criterio de selección es de optar por aquella unión que genera un mayor área de encolado. Se debe tener cuidado de que no se repitan en más de una láminas para una misma sección transversal, que no se genere planos de falla anunciados por una disposición continua uniforme y evitar que se ubiquen donde las sollicitaciones son máximas; por ejemplo, no debe localizarse una unión en la fibras a tracción en centro luz de una viga biapoyada. Se codifican cada pieza para conocer su posición y dirección correspondiente.

#### 4.- Encolado de láminas

Se prepara la cola epóxica conforme a las especificaciones técnicas del fabricante y con las precauciones de dosificación y seguridad personal debida.

En un trabajo a nivel artesanal con la ayuda de brochas y rodillos se esparce la resina de forma uniforme en las caras a encolar y en las uniones endentadas.

#### 5.- Prensado.

Inmediatamente terminado el encolado se prensa la pieza de forma uniforme y progresiva comenzando del centro hacia los extremos. El prensado se lo puede hacer con equipo hidráulico donde la medición de la presión es con manómetros. A un nivel artesanal se realiza el prensado con equipos mecánicos en los que se mide la presión con torcómetros. La presión recomendada en la bibliografía es del orden del 10 Kg/cm<sup>2</sup>. La velocidad de aplicación de la fuerza debe ser próxima a 0,6 mm/s para garantizar que la resina ingrese a los poros y evitar lagrimeo excesivo.

Se deja en reposo las piezas para que cure el pegante por un tiempo igual o superior a lo especificado en la ficha técnica del fabricante.

En caso que la ejecución tarde mayor al tiempo de trabajabilidad de la cola, el proceso de encolado y prensado se debe hacer por partes para luego unir las partes de la misma forma que si se tratará de láminas.

#### 6.- Dimensionamiento final y cepillado de las piezas.

Terminado el proceso de fraguado se someta a la pieza a la cepilladora regruesadora para eliminar lagrimeos de resina y aristas sobresalientes de las láminas. Se debe tomar en cuenta la dirección de la fibra para conseguir un cepillado perfecto y evitar desgarres de la madera.

Mediante el cepillado se mejora la visibilidad del veteado de la madera.

Posterior al cepillado se puede aplicar tratamientos anti hongos, retardadores de fuego y/o plastificantes como el barnizado.

b) Verificación práctica: Adicional al trabajo desarrollado en laboratorio, con el material sobrante y conforme a la filosofía de aprovechamiento al máximo, se elaboró un arco de 42 cm de luz, 12,20 cm de flecha y 3,8 x 2,6 cm de sección, el mismo que tiene un radio de curvatura mayor al admisible y es sometido a un carga puntual que genera esfuerzos ligeramente superiores a los admisibles para verificar su comportamiento y resistencia.

Esta práctica se desarrolla en un taller improvisado por lo que se cuenta con equipo limitado.

Cumplidos los pasos de curvado, encolado, prensado y redimensionado de la pieza, se obtiene el arco reducido:



*Figura 34a: Laminas en el molde curvo*



*Figura 34b: Arco desmoldado*



*Figura 34c: redimensionado de la pieza*



*Figura 34c: Arco terminado*

El arco es sometido a una prensa hidráulica con marcador de carga adecuado. La carga se aplica en la clave, en un valor de 100 Kg. Que producirá esfuerzos normales y cortante mayor a los admisibles para una vinculación biapoyada, como se labran los cálculos presentados en líneas más abajo. Se observa la respuesta a la carga sometida:



*Figura 35a: Disposición de la pieza en la prensa*



*Figura 35b: Aplicación de fuerza en la clave*



*Figura 35c: Apoyo restringiendo en X y Y*



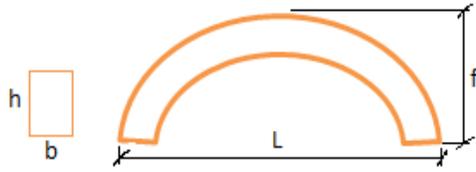
*Figura 35d: Fuerza aplicada*



*Figura 35e: Medición de la deflexión*

Arco Reducido:

Luz (L)	42,00	cm
Flecha (f)	12,20	cm
Base (b)	3,80	cm
altura (h)	2,60	cm
Radio de curvatura ( R )	24,17	cm
Inercia	5,56573	cm <sup>4</sup>



Madera Laminada Encolada: Podocarus Parlatoresi

\*Factor de modificacion de resistencia por curvatura: 0,95

Propiedades físicas MLE:

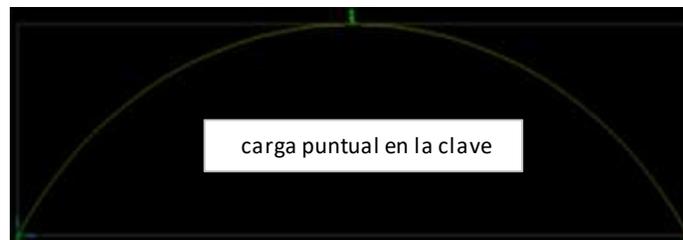
Propiedades mecánicas MLE:

Peso específico	
480	Kg/m <sup>3</sup>
El Manual de Diseño del Pacto Andino prevee un incremento del 25%	
600	Kg/m <sup>3</sup>

Tipo	Esf. Adm.	*Esf. Adm. directriz curva	Unidades
E <sub>min</sub>	40204,86		Kg/cm <sup>2</sup>
E <sub>prom</sub>	51753,40		Kg/cm <sup>2</sup>
f <sub>m</sub>	63,72	60,53	Kg/cm <sup>2</sup>
f <sub>c</sub>	102,01	96,91	Kg/cm <sup>2</sup>
f <sub>v</sub>	4,04	3,84	Kg/cm <sup>2</sup>

Peso propio arco		0,59	Kg/m	despreciable
<b>Carga externa puntual</b>		<b>100,00</b>	<b>Kg</b>	

Bajo estas condiciones se resuelve el arco como biarticulado en el SAP-2000, se encuentra las reacciones en los apoyos, las deformaciones y los esfuerzos internos:



Solicitaciones máxima para el diseño:

Efecto	Valor	Unidad
R <sub>x</sub>	62,37	Kg
R <sub>y</sub>	50,15	Kg
Y <sub>max</sub>	0,032	cm
N <sub>max</sub>	79,99	Kg
V <sub>max</sub>	48,35	Kg
M <sub>max</sub>	290,45	Kg*cm
Momento maximo en centro luz		
N <sub>x centro</sub>	134,85	Kg

**Verificación de la flecha:**

Ymax	0,032	cm	≤	$Y_{adm} = \frac{L}{250} =$	0,168	cm
Correcto						

La flecha de cálculo no supera la flecha admisible.

**Verificación de esfuerzo normal:**

→Se verificó que el esfuerzo debido a la acción conjunta del momento flector y compresión ocurre en el centro luz

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{My}{I} = \quad 13,65 \quad (+) \quad 67,84 \quad (=) \quad 81,49 \quad \text{Kg/cm}^2$$

$\sigma_{max} =$	81,49	Kg/cm <sup>2</sup>	≤	$\sigma_{adm} =$	60,53	Kg/cm <sup>2</sup>
supera la deflexión admisible						

Se supera en 34,63 % el valor admisible

**Verificación de esfuerzo de cortante:**

cortante horizontal máximo ( $\tau_{max}$ )

$$\tau_{max} = \frac{3 * V}{2 * b * h} = 7,34 \quad [\text{kg/cm}^2]$$

$\tau_{max} =$	7,34	Kg/cm <sup>2</sup>	≤	$\sigma_{adm} =$	3,84	Kg/cm <sup>2</sup>
supera la deflexión admisible						

Se supera en 91,15 % el valor admisible

#### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Concluidos los ensayos y las observaciones planteadas para esta investigación, en base a los cálculos presentados en anexos de este documento, se obtiene resultados fiables que permiten realizar un análisis del comportamiento estructural, plantear observaciones, sugerencia y conclusiones.

##### 4.1. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos del presente trabajo son:

##### 4.1.1. Valores de las propiedades elásticas de madera laminada encolada

Se determina los esfuerzos últimos con un valor de exclusión del 5%, los esfuerzos medios y los esfuerzos admisible de cizalle, compresión paralela y flexión estática y los módulos de elasticidad para la madera laminada encolada conforme a los cálculos de los anexos 1, 2, 3 y 4.

###### a) Cizalle

Tabla 13: Esfuerzos al cizalle en la línea de cola

<b>Cizalle</b>	<b>EUM [Kg/cm<sup>2</sup>]</b>
Media	36,10
Valor 5% de exclusión	16,15
Admisible	4,04

*Fuente: Elaboración propia*

###### b) Compresión paralela:

Tabla 14: Esfuerzos a la compresión paralela

<b>Compresión Paralela</b>	<b>ELP [Kg/cm<sup>2</sup>]</b>
Media	248,75
Valor 5% de exclusión	204,03
Admisible	102,01

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15: Módulos de elasticidad en compresión paralela

<b>Módulo de elasticidad en compresión</b>	<b>MOE [Kg/cm<sup>2</sup>]</b>
Media	24453,84
Mínimo	17528,35

Fuente: Elaboración propia

c) flexión estática:

Tabla 16: Esfuerzos a la flexión estática

<b>Flexión estática</b>	<b>ELP [Kg/cm<sup>2</sup>]</b>
Media	319,54
Valor 5% de exclusión	203,55
Admisible	63,72

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17: Módulos de elasticidad en flexión estática

<b>Módulo de elasticidad en flexión</b>	<b>MOE [Kg/cm<sup>2</sup>]</b>
Media	48367,67
Mínimo	37574,63

Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.2. Valor de la densidad

La densidad de referencia de la madera laminada encolada de pino de cerro con resina de poliéster a la humedad ambiente próximas al 12%:

Tabla 18: Densidad de referencia

Densidad en estado al aire libre en Tarija	0,48	[gr/cm <sup>3</sup> ]
--	------	-----------------------

Fuente: Elaboración propia

Los cálculos son presentados en el anexo 5.

#### 4.2. Análisis comparativo de la madera laminada encolada con la madera aserrada

Los datos de la madera maciza (MM) presentados en la tesis “Estudio para la Determinación de las Propiedades Mecánicas de la especie Pino del Cerro (Podocarpus Parlatorei)” corresponde son valores promedios, por lo tanto la comparación se realiza con los valores medios determinados mediante los ensayos del presente estudio:

##### a) Cizalle

Tabla 19: Comparación de la capacidad al cizalle

TIPO	ESFUERZO Kg/cm <sup>2</sup>	DESCRIPCIÓN
MLE	36,10	La capacidad resistente al corte horizontal de la madera laminada encolada con resina de poliester se reduce en un 61,8 %
MM prom	94,40	
Diferencia	58,30	
% reducción	-61,76	

*Fuente: Elaboración propia*

##### b) Compresión paralela:

Tabla 20: Comparación de la capacidad a la compresión paralela

TIPO	ESFUERZO Kg/cm <sup>2</sup>	DESCRIPCIÓN
ELP para MLE	319,54	La capacidad resistente a la flexión de la madera de pino del cerro encolada se incrementa en un 54,6%
ELP para MM	206,70	
Diferencia	112,8	
% incremento	54,6	

*Fuente: Elaboración propia*

c) flexión estática:

Tabla 21: Comparación de la capacidad a la flexión estática

TIPO	ESFUERZO Kg/cm <sup>2</sup>	DESCRIPCIÓN
ELP para MLE	248,75	La resistente a la compresión de la madera de pino del cerro encolada prácticamente mantiene la capacidad de la madera maciza
ELP para MM	246,70	
Deferencia	2,1	
% incremento	0,83	

*Fuente: Elaboración propia*

d) Módulo de elasticidad en flexión estática:

Tabla 22: Comparación del módulo de elasticidad en flexión estática

TIPO	ESFUERZO Kg/cm <sup>2</sup>	DESCRIPCIÓN
MOE para MLE	48367,67	El módulo de elasticidad para la flexión se incrementa en 12,13%
MOE para MM	43134,40	
Deferencia	5233,3	
% incremento	12,13	

*Fuente: Elaboración propia*

e) Comparación cualitativa del comportamiento de la MLE vs. M.A.

Tabla 23: Comparación cualitativa

Madera laminada	Madera maciza
Las piezas encoladas no sufren alabeos ni agrietaduras aun estén expuestas al intemperismo.	Las piezas macizas al estar expuestas a inclemencias del tiempo sufren rajaduras y alabeos.
Se consigue el secado rápido y económico de las láminas, por lo tanto de la pieza.	Por tratarse de piezas de mayor escuadría tarda más en liberar el agua contenida.
Facilita el proceso de curvado de la piezas sin riesgos de fisuración interna	Es más moroso realizar el curvado de las piezas.
Permite el uso de maderas pequeña que sin esta técnica serían consideradas descarte.	Las piezas de dimensiones menores o con presencia de nudos se descartan.
Se puede construir secciones transversales optimizadas como sección cajo, T o I.	Se limita las secciones a cuadradas, rectangulares o circulares. No se optimiza.

*Fuente: Elaboración propia*

### 4.3. Análisis del comportamiento estructural

Dentro del comportamiento mecánico incide la presencia de nudos, por eso es importante realizar una clasificación visual y tener un claro criterio de la selección. Si se trata de un nudo sano la pieza de madera puede ser utilizada, caso contrario debe ser descartada. Esta una de las ventajas que permite el laminado encolado ya que se elimina sólo la parte dañada.



*Figura 36a: Nudo en las láminas de madera*

*Figura 36b: falla por separación de fibras en el nudo*

#### **a) Cizallamiento en la línea de cola**

Al hacer que coincida la línea de encolado con la línea de cortante que genera el equipo se determinó exclusivamente la capacidad de adherencia de la resina.

Analizando las características de las fallas se concluye que:

- El cepillado de las láminas disminuye la adherencia entre piezas.
- El prensado excesivo minimiza considerablemente la cantidad de resina en la línea de cola y reduce la capacidad resistente.
- El prensado fuera del tiempo de trabajabilidad agrieta la resina ocasionando líneas de falla.
- Las menores resistencias en la línea de cola ocurrieron en las láminas de duramen ya que son menos permeabilidad y por lo tanto no logra penetrar eficazmente la resina a la madera

Adicional a los ensayos de las probetas convencionales, en el afán de mejorar la resistencia al cortante, se elaboró y ensayó probetas con perforaciones y otras con acanaladuras en las caras del área resistente, con la intención de que el pegante genere una especie de trabazón mejorando la adherencia mecánica.



*Figura 37a: Perforaciones en las caras encoladas*



*Figura 37b: acanaladura en las caras encoladas*

Los resultados no fueron los esperados. Fruto de las perforaciones en las caras se obtuvo un incremento despreciable, prácticamente el EUM se mantuvo igual al de las probetas convencionales. Con la incorporación de acanaladuras se produjo efectos adversos reduciendo el EUM considerablemente debido a la reducción de área de contacto mutuo entre láminas, por lo que se descarta estas opciones.

### **b) Compresión paralela**

En algunas gráficas esfuerzo - deformación en los primeros puntos experimenta una mayor deformación, este comportamiento se debe a un corte transversal no perfecto de las caras de la probeta. Se alcanza la uniformidad cuando por aplastamiento se nivela las pequeñas desigualdades y trabaja toda la sección de pieza.



*Figura 38: Mínima falla de uniformidad en las probetas*

El problema de uniformidad fue mínimo que no afectó a la resistencia, tampoco en el punto de proporcionalidad ni en el punto de rotura, por lo que los resultados se consideran válidos y representativos.

Las probetas de tres láminas ofrecieron un mejor comportamiento estructural hasta la rotura. Las fallas en su mayoría fueron por aplastamiento. Las probetas de cinco láminas trabajaron excelentemente hasta el límite de proporcionalidad, luego algunas de ellas sufrieron delaminación sobre todo aquellas de la parte del duramen y cepilladas. Las fallas ocurridas se dieron por cuña o ajustamiento con rajadura.



*Figura 39: Delaminación que aparece al mismo tiempo de falla*

### **c) Flexión estática**

Las probetas de tres láminas ofrecieron mayor rigidez y uniformidad en la resistencia. La falla se dio por efecto de la tracción - compresión en de sus láminas. En algunas probetas apareció la falla por cortante horizontal en el eje neutro pero la línea de encolado se conservó intacta. Se demuestra que el máximo cortante horizontal tiene lugar en el eje neutro conforme estipula la teoría.



*Figura 40: Cortante horizontal en el eje neutro. Líneas de cola intactas.*

Las probetas de cinco láminas, en algunos casos, después de la rotura por tracción de las fibras inferiores permitieron la delaminación en tramos cortos y próximos a la zona de falla. Esta delaminación se incrementa si la lámina es madera del duramen y es cepillada.



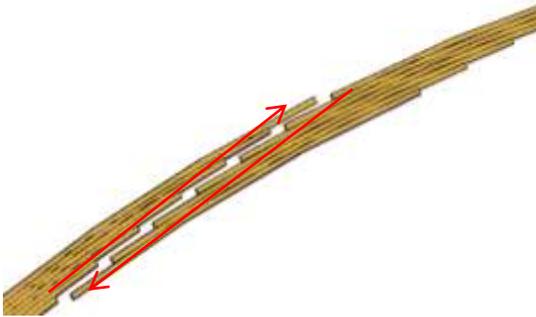
*Figura 41: delaminación después de falla por tracción de la fibra inferior.*

#### **4.4. Análisis del comportamiento de las uniones horizontales**

Las uniones longitudinales finger joints no presentan fallas siempre y cuando estén ubicadas alejadas de las secciones críticas y de posiciones adversas. Secciones críticas son aquellas de mayor solicitación, por ejemplo el centro luz para el caso de una viga biapoyada con carga uniformemente distribuida donde las demandas por flexión son máximas. Posiciones adversas son aquellas ubicaciones donde la unión esta solicitada a un esfuerzo al que no brinda su mejor respuesta mecánica, siguiendo con el ejemplo de la viga, el momento flexionante en centro luz produce tracción en las fibras inferiores y compresión en las superiores; la unión finger joints brinda mejor respuesta estructural en compresión por lo tanto podría disponérsela con seguridad a partir del eje neutro hacia arriba, mientras que la tracción exigiría la acción del pegante siendo este vulnerable a fallar, por lo tanto no es recomendable ubicar una unión en esa posición.

Otro aspecto importante es evitar que se produzcan planos de falla anunciados. Se debe distribuir de tal forma que la distancia entre las uniones de láminas consecutivas queden lo más alejado posible. La configuración ideal es la que conociendo la unión en la primera

lámina en la siguiente se disponga lado derecho y la subsiguiente a lado izquierdo respecto a la primera lámina. La figura 42a ilustran el plano de falla diagonal anunciado por donde viajara la carga fácilmente debido a la ruta corta entre el extremo superior e inferior. En la figura 42b se muestra la trabazón producida entre las láminas, se dificulta la aparición de un plano de falla diagonal ya que la carga al viajar desde el extremo superior al inferior se encontrará con obstáculos (madera maciza altamente resistente al cortante vertical) y para tomar la ruta débil (línea de encolado) la distancia se incrementa considerablemente.



*Figura 42a: Uniones mal dispuestas*



*Figura 42b: Uniones correctamente dispuestas*

Las probetas para los ensayos de flexión estática disponían de uniones finger joints verticales construida con los criterios antes mencionados, las mismas ofrecieron un excelente comportamiento.



*Figura 43: Uniones finger joints ubicada en la lámina central y al extremo sin fallas después del ensayo de flexión*

#### 4.5. Análisis del comportamiento físico

La incorporación de resina no afecta al peso propio de la madera ya que es una línea muy fina impregnada a la madera y no aumenta el volumen ni el peso.

En cuanto al contenido de humedad es importante mencionar que la resina es impermeable, por lo que la línea de cola se convierte en una capa que no permite la transferencia de agua de una lámina hacia la otra.

#### 4.6. Análisis del curvado de la madera

Luego de la práctica del curvado de la madera, se concluye que con la combinación de técnicas de laminado y calor, la madera se vuelve maleable y fácilmente adquiere la forma deseada. Recuperan sus propiedades elásticas después de la pérdida de calor y humedad. Se observa minuciosamente la cara cóncava, convexa y de perfil sin encontrar ninguna alteración en la madera.



*Figura 44a: Revisión visual de perfil de la estructura de la madera curvada*



*Figura 44b: Vista del lado convexo*



*Figura 44c: Vista del lado cóncavo*

El proceso debe ser realizado de acuerdo a lo que la madera permita, forzar daña las fibras en la cara convexa.



*Figura 45: Falla en la zona traccionada por forzar al curvado de láminas de espesor mucho mayor al recomendado y/o a poco tiempo de vaporización.*

Es conveniente trabajar con espesores próximos al máximo permitido para cada radio de curvatura, así se garantiza no dañar la estructura ni alterar las propiedades mecánicas. Espesores menores implican mayor tiempo de ejecución, mayor gasto en líneas de encolado y el beneficio de flexibilidad es poco valorable para la técnica combinada que usamos. Un espesor mayor al máximo demandaría más dedicación, herramienta y tiempo para la obtención de las piezas curvas y aumentaría el riesgo de daños internos a las láminas.

#### **4.7. Análisis de la resistencia al intemperismo**

Por las limitaciones de la investigación se observó por solamente 50 días las líneas de encolado ante una situación extremas de calor y humedad. Se percibió que el encolado no sufre ningún tipo alteración. Este dato es una buena referencia pero no es concluyente para determinar la vida útil del producto, sin embargo, se presume que estará en función de la duración de la madera propiamente dicha ya que el encolado trabajará de buena manera durante ese tiempo.

#### **4.8. Análisis del diseño de la cubierta en arco**

Se trata de un diseño tipo ilustrativo, que en la actualidad se lo puede materializar trabajando de forma artesanal pero en futuro se debería pensar fabricas que industrialicen la madera y lo den un valor agregado.

En el diseño se combinó elementos de madera maciza con elemento de madera laminada para elementos que realmente ameritan su uso.

Los elementos diseñados son fruto de varias iteraciones para encontrar las dimensiones más adecuadas. Las escuadrías seleccionadas permiten desarrollar máximas inercia para aprovechar óptimamente el material haciendo que tanto las deformaciones y esfuerzos estén próximos a los admisibles sin descuidar la estabilidad lateral.

La estabilidad lateral de los arcos se garantiza por el entablado clavado en las fibras extremas superiores, mismo que actúa como elemento de arriostre, base para la teja shingle y de cielo raso.

El entablado es continuo mínimamente en dos tramos para reducir la deflexión (58% menos que de elementos simplemente apoyados). De esta forma se puede emplear entablado de espesor mínimo.

Para reducir las deformaciones en los arcos y evitar que sobrepasen la admisible se dispone de vinculación empotrada. La vinculación de los arcos a la viga corrida de hormigón armado se lo hace por platabandas sujetas a la armadura de la viga. La disposición de pernos es mayor en las láminas de los bordes generando una especie de sándwich que coadyuva a mantener el encolado. Las perforaciones para los pernos se proyectan en el eje medio de cada lámina para no dañar a la línea de cola y garantizar que funcione como una pieza maciza. Como seguridad adicional se tiene: 1) que el arco está diseñado por aplastamiento pero adicionalmente trabaja a deslizamiento crítico y 2) descansa directamente sobre la viga.

#### **4.9. Análisis de costos y cronograma**

El resultado obtenido en el estudio de costos es de 443 Bs. el metro cuadrado. Si bien el costo aparenta ser elevado, hay que mencionar que se trata de un trabajo terminado y no se necesita presupuestar adicionalmente para cielo raso ni impermeabilización como sucedería con una losa.

Un ejemplo comparativo rápido y entendible es el de reemplazar la cubierta por una losa alivianada convencional. La losa tiene un costo promedio de 256,49 Bs/m<sup>2</sup>, el cielo raso más económico (solo revoque con yeso sobre losa) 82,44 Bs/m<sup>2</sup> y la impermeabilización que oscila entre los 60 Bs/m<sup>2</sup> sumaría un costo próximo a 400 Bs/m<sup>2</sup> sin contar con el incremento de costos por la necesidad de columnas intermedias.

Otro dato importante es el precios referencial de contratación estatal para una cubierta tinglado en nuestro país está próximo a los 800 Bs/m<sup>2</sup> y el costo en el mercado de 350 Bs/m<sup>2</sup>.

Sumando a lo antes mencionado las ventajas de aislamiento, estética, reducido peso propio entre otras, concluimos que los precios están muy aceptables y podrían rebajar aún más si se pasa de la fabricación artesanal a la industrial.

El tiempo ejecución propuesta es de un mes calendario trabajando de lunes a sábado con sus respectivos frentes planteados. Más del 50% se emplea en la fabricación artesanal de los arcos, por lo que con la industrialización se ahorraría bastante tiempo de ejecución.

#### **4.10. Análisis de la verificación práctica.**

Con 100 Kg de carga puntual en la clave se generó esfuerzos normales y cortantes mayores a los admisibles pero que no superan los esfuerzos últimos. En la práctica se constata que la pieza resiste adecuadamente.

Teóricamente la deflexión estimada para la condición de carga es mucho menor que la admisible. En la práctica, con el vernier que se dispone en el taller, fue difícil apreciar el valor exacto; pero se tiene la seguridad está dentro de lo permitido (aproximadamente 1 mm). El elemento experimentado está gobernado por esfuerzos y no por deformaciones.

#### **4.11. Contratación de hipótesis**

Se demostró que la madera laminada de pino del cerro encolada con resina de poliéster, a pesar de sufrir una reducción al cortante horizontal en la línea de cola, presenta un

comportamiento mecánico por lo general igual o superior al de madera maciza, permite obtener infinidad de secciones, longitudes y directrices curvas. Se garantiza que la pieza se mantenga colada monolíticamente.

#### 4.12. Información generada

- Fruto de la presente investigación se obtiene los esfuerzos admisibles y módulos de elasticidad para maderas laminadas de pino del cerro encoladas con resina de poliéster

Tabla 24: Esfuerzos admisibles de la MLE de pino de cerro encolada con resina de poliéster

Propiedades mecánicas	Valores bajo criterio estadístico	Esf. Adm.
		kg/cm <sup>2</sup>
E <sub>0,05</sub> o E <sub>min</sub>	37574,63	40204,86
E <sub>prom</sub>	48367,67	51753,40
f <sub>m</sub>	203,55	63,72
f <sub>c</sub>	204,03	102,01
f <sub>v</sub>	16,15	4,04

*Fuente: Elaboración propia*

- La densidad de la madera laminada encolada se mantiene invariable con respecto a la de madera maciza.
- Las líneas de cola no sufre alteraciones ante la exposición solar ni la humedad, trabajando adecuadamente como si fuese una sola pieza de madera maciza.

## **CONCLUSIONES**

En anexos 1, 2, 3 se muestra los datos recolectados en laboratorio y procesados conforme a lo expuesto en el capítulo 2 y 3. Los resultados para cada una de las probetas de los ensayos de cizallamiento en la línea de cola, compresión paralela a las fibras y flexión estática fueron sometidos a un análisis de valores atípicos por el método de los cuartiles.

Fruto del análisis de los valores, se encuentra que la probeta 8 del ensayo de cizallamiento en la línea de cola presenta un valor atípico leve de 89,86 Kg/cm<sup>2</sup>. Se realiza un análisis crítico basado en la varianza y la observación. Se procede a descartar la probeta debido a que es un comportamiento extraordinario que no se pudo alcanzar en otras probetas. Por lo que el caso amerita un análisis de dicha probeta, observando que se trata de una madera de albura encolada en la cara radial y no cepilla, se concluye que es preferible el uso de maderas livianas (del grupo C), no someter a cepillados y encolar en lo posible en las caras radiales.

En los resultados del esfuerzo en el límite de proporcionalidad (ELP) en compresión paralela a las fibras se encuentra valores atípicos leves tanto inferior para la probeta 1 como superior para la probeta 20. Al estar muy próximos a la concentración de puntos y no ser observados como atípicos en la determinación del esfuerzo de rotura (RUM) ni en el módulo de elasticidad (MOE) se consideran probetas válidas para el cálculo.

En los resultados del ensayo de flexión estática se identifica valor atípico leve para el esfuerzo en límite de proporcionalidad (ELP) y para el módulo de rotura (MOR) de la probeta 1. Se

analiza el caso en partículas y se descartó la probeta debido a que el decremento se debió a una mala manipulación en la velocidad de aplicación de la carga de la prensa universal.

Los valores promedio del esfuerzo en el límite de proporcionalidad para la compresión paralela prácticamente mantiene la capacidad al de la madera maciza. El valor promedio del esfuerzo en el límite de proporcionalidad para flexión se incrementa en el orden del 50% respecto al de la madera maciza debido a que la acción de la resina rigidiza la pieza, por lo tanto también se incrementa el módulo de elasticidad siendo este aumento en un valor del 12 %.

En dos de los casos anteriores se descartó una de veinte probetas por lo que está dentro del quinto percentil de exclusión. Podría considerarse como valor característico, al mínimo de los diecinueve válidos, sin embargo por seguridad se empleó la fórmula estadística para determinar el valor mínimo con un 95% de confianza en una distribución gaussiana y los obtenidos son los esfuerzo últimos.

Los esfuerzos admisibles se encuentran aplicando factores de seguridad propuestos en el Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino y son considerados válidos debido a que se demostró en los ensayos que la madera laminada trabaja de forma idéntica a la maciza.

Luego del estudio de selección de colas se concluye terminantemente que aquellas de características plásticas de uso en carpintería no cumple con las exigencia de uso estructural, fallan debido al envejecimiento, intemperismo y calor (no brindan seguridad).

El producto de línea Sika, Sikadur 32 gel, es capaz de adherir maderas pero tiene un costo muy elevado, por lo tanto solamente se lo podría utilizar en casos de mucha necesidad como en anclajes y no para la fabricación de maderas laminadas.

Se demostró mediante los ensayos normados, pruebas experimentales propuestas y observaciones de comportamiento, que existe resinas termoestables como es el caso de la resina de poliéster capaz de resistir los efectos del intemperismo, durar en el tiempo y brindar

adherencias muy altas que permitan que la madera encolada trabaje como una sola pieza maciza. La resina de poliéster se puede usar como una alternativa a las colas marina convencionales.

El curvado de madera con el método de laminado y calentado simultáneamente permite obtener con facilidad las piezas curvas y no genera esfuerzos residuales en los arcos.

La incorporación de resina para la conformación de las piezas no afecta a la densidad por lo tanto no varía el peso propio (se mantiene tal cual se tratase de una madera maciza).

Se debe evitar que la línea de encolado coincida con el eje neutro para controlar mejor el cortante horizontal. Bajo este criterio, se define que los elementos de sección rectangular deben estar formados de un número impar de láminas y no menor a 3 para una correcta distribución de uniones finger joints.

Basándose en el proceso de fabricación y en las observaciones del comportamiento de las probetas de tres y cinco láminas, se concluye que es conveniente, desde el punto de vista constructivo y económico, usar la menor cantidad de láminas posibles para la conformación de una escuadría pero sin descuidar las recomendaciones de espesores para curvatura. A mayor cantidad de láminas, mayor línea de encolados lo que significa incremento directo en costo y tiempo.

La excesiva presión de prensado y/o la alta velocidad de aplicación reducen la capacidad resistente del encolado ya que minimiza la cantidad de resina entre las láminas y la penetración a los poros.

El cepillado de las caras a encolar reduce la adherencia mecánica del pegante. Para conseguir los espesores necesarios de las láminas se debe realizar con un buen corte en la sierra circular o sinfín.

En base a las observaciones se determina que la albura acepta mejor al encolado que el duramen. Por lo tanto para madera laminada encolada es preferible utilizar maderas blandas y de ser necesario aumentar las escuadrías para alcanzar las resistencias solicitadas.

La variación de dimensiones de las probetas respecto a las recomendadas por las normas no afecta a los resultados finales calculados de los esfuerzos ya que en las fórmulas se introduce las dimensiones reales de la probeta y no las teóricas que indica en la norma. Las probetas cumplen con los principios de la resistencia de los materiales. La norma propone dimensiones con el fin de uniformizar y permitir en uso de los equipos estándares de los laboratorios.

En el diseño es preferible incrementar el número de arcos y reducir la sección de los mismos. Caso contrario se incrementan considerablemente los costos. Por ejemplo, en el diseño de la nave principal empleando 10 arcos de mayor sección se incrementa en más del 60% el costo con respecto a usar 17 arcos de menor sección.

## RECOMENDACIONES

Para la construcción de elementos de madera laminada se recomienda no someter a cepillado las caras a encolar, porque el cepillado disminuye la adherencia específica entre resina-cara de encolado y la adherencia mecánica entre láminas consecutivas.

Se recomienda encolar las caras radiales de las maderas ya permitirán mejor adherencia consiguiendo piezas altamente monolíticas.

Es recomendable realizar uniones longitudinales que generen la mayor área de encolado.

En los apoyos evitar perforaciones en las líneas de encolado. Se debe tratar de disponer los pernos en el eje medio de la lámina.

Durante el prensado evitar lagrimeo en exceso de resina, para ello se debe reducir la velocidad de aplicación de la fuerza y controlar que la presión final (próxima a 10 Kg/cm<sup>2</sup>). Además tomar en cuenta el tiempo de fraguado que se especifica en la ficha técnica de la resina utilizada.

Adicionalmente se sugiere para futuros trabajos de investigación:

1.- Corroborar experimentalmente la fórmula  $Kc = 1 - 2000 \left(\frac{e}{R}\right)^2$  propuesta por las normas colombiana y chilena como factor de minoración de resistencia de la madera curvada. La obtención de este dato permitirá apreciar de mejor forma el comportamiento mecánico y dimensionar adecuadamente con valores reales apropiados.

2.- Realizar un estudio del comportamiento del encolado y de las propiedades mecánica para madera laminada encolada de yesquero y ochoó por ser maderas livianas, de alta disponibilidad en el medio, económicas y con muy buenas características técnicas para ser utilizadas en la producción a nivel industrial.