



UNIVERSIDAD NACIONAL  
de MAR DEL PLATA  
.....



Impacto de los defectos inherentes al  
proceso de obtención de chapas de  
madera sobre el comportamiento a la  
flexión de tableros contrachapados de  
*Eucalyptus Grandis*

Proyecto final de grado – Ingeniería en Materiales

ESTUDIANTE: María Belén Varela

DIRECTOR: Dr. Pablo Stefani

CO-DIRECTOR: Dr. Emiliano Ciannamea



RINFI se desarrolla en forma conjunta entre el INTEMA y la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-  
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).



UNIVERSIDAD NACIONAL  
de MAR DEL PLATA  
.....



Impacto de los defectos inherentes al  
proceso de obtención de chapas de  
madera sobre el comportamiento a la  
flexión de tableros contrachapados de  
*Eucalyptus Grandis*

Proyecto final de grado – Ingeniería en Materiales

ESTUDIANTE: María Belén Varela

DIRECTOR: Dr. Pablo Stefani

CO-DIRECTOR: Dr. Emiliano Ciannamea

# ÍNDICE

|   |    |
|---|----|
| LISTADO DE FIGURAS Y TABLAS .....   | 4  |
| LISTADO DE ABREVIATURAS.....  | 6  |
| AGRADECIMIENTOS.....  | 7  |
| RESUMEN .....   | 8  |
| 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....  | 9  |
| 1.1 Introducción .....  | 9  |
| 1.1.1 Características generales de la madera .....                                    | 9  |
| 1.1.1.1 Estructura macroscópica .....   | 11 |
| 1.1.1.1.1 Albura y duramen.....   | 11 |
| 1.1.1.1.2 Anillos de crecimiento .....  | 12 |
| 1.1.1.1.3 Médula .....  | 13 |
| 1.1.1.2 Estructura microscópica .....   | 13 |
| 1.1.1.3 Composición química .....   | 17 |
| 1.1.1.2 Propiedades físicas de la madera .....  | 20 |
| 1.1.1.2.1 Contenido de humedad.....   | 20 |
| 1.1.1.2.2 Densidad.....   | 21 |
| 1.1.2 Madera cultivada: una alternativa sostenible.....                               | 22 |
| 1.1.3 Chapas de madera.....   | 23 |
| 1.1.3.1 Proceso de obtención.....   | 24 |
| 1.1.3.2 Anomalías o defectos provenientes de la madera.....                           | 24 |
| 1.1.3.3 Defecto inherente al proceso de obtención de chapas: <i>lathe check</i> ..... | 25 |
| 1.1.4 Tableros contrachapados .....   | 27 |
| 1.2 Objetivos .....   | 29 |
| 1.2.1 General .....   | 29 |
| 1.2.2 Específicos .....   | 29 |
| 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL .....  | 31 |
| 2.1 Materiales utilizados .....   | 31 |
| 2.2 Metodologías para la evaluación de las chapas de madera .....                     | 31 |
| 2.2.1 Densidad, humedad y rugosidad.....  | 31 |
| 2.2.2 Análisis de la microestructura de las chapas de madera mediante SEM.....        | 31 |
| 2.3 Identificación de los <i>lathe checks</i> .....                                   | 32 |
| 2.4 Acondicionamiento de chapas y tableros .....                                      | 32 |
| 2.5 Construcción de los tableros.....   | 32 |
| 2.6 Determinación de densidad de los tableros .....                                   | 34 |

|   |    |
|---|----|
| 2.7 Caracterización del adhesivo y morfología de la línea de encolado ..... | 34 |
| 2.8 Ensayo de flexión.....  | 35 |
| 2.9 Análisis mediante la técnica <i>DIC</i> .....                           | 37 |
| 2.9.1 Apertura de defectos .....  | 38 |
| 3. RESULTADOS .....   | 40 |
| 3.1 Caracterización de las maderas.....                                     | 40 |
| 3.1.1 Densidad, humedad y rugosidad.....                                    | 40 |
| 3.1.2 Análisis de la microestructura .....                                  | 40 |
| 3.2 Densidad de los tableros .....  | 41 |
| 3.3 Propiedades del adhesivo y morfología de la línea de encolado .....     | 42 |
| 3.4 Propiedades a la flexión de los tableros.....                           | 45 |
| 3.5 Análisis mediante resultados del <i>DIC</i> .....                       | 46 |
| 3.5.1 Apertura de defectos .....  | 53 |
| 3.6 Sumario de modos de fallas de tableros sometidos a flexión.....         | 59 |
| 4. EVALUACIÓN ECONÓMICA.....  | 61 |
| 4.1 Tableros con orientación específica de defectos .....                   | 61 |
| 4.2 Tableros con adhesivo biogénico .....                                   | 61 |
| 5. CONCLUSIONES .....   | 66 |
| 6. TRABAJO A FUTURO .....   | 68 |
| 7. REFERENCIAS .....  | 69 |
| 8. ANEXO .....  | 77 |
| 7.1 Caracterización de la madera: densidad y humedad .....                  | 77 |
| 7.2 Microscopía electrónica de barrido .....                                | 77 |

## LISTADO DE FIGURAS Y TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1. Cortes de estudio de la madera: transversal, radial y tangencial .....   | 10 |
| Figura 1.2. Estructura jerárquica de la madera: desde lo macroscópico a la nanoescala .....  | 10 |
| Figura 1.3. Corte transversal del tronco: estructura interna .....   | 11 |
| Figura 1.4. Sección transversal del tronco de un roble: albura (zona externa clara) y duramen (zona interna oscura) .....                          | 12 |
| Figura 1.5. Anillos de crecimiento de una sección de Eucalipto y estructura celular del leño temprano y tardío de una muestra de pino .....        | 13 |
| Figura 1.6. Estructura celular de maderas duras .....  | 15 |
| Figura 1.7. Pared celular de una traqueida mostrando sus diversas capas y la orientación característica de las microfibrillas .....                | 17 |
| Figura 1.8. Estructura molecular de la celulosa .....  | 18 |
| Figura 1.9. Principales unidades componentes de las hemicelulosas .....  | 19 |
| Figura 1.10. Alcoholes constituyentes de la lignina: (1) alcohol cumarílico; (2) alcohol coniferílico; (3) alcohol metoxilo .....                  | 19 |
| Figura 1.11. Defectos de la madera: nudos y desviación de fibras .....   | 25 |
| Figura 1.12. Principales fenómenos mecánicos durante el proceso de debobinado de los troncos .....   | 25 |
| Figura 1.13. Formación de <i>lathe checks</i> durante corte giratorio .....  | 26 |
| Figura 1.14. <i>Lathe checks</i> visibles en placa central del contrachapado .....   | 26 |
| Figura 2.1. Perfilómetro portátil .....  | 31 |
| Figura 2.2. Bordos de chapas finas con <i>lathe checks</i> coloreados .....  | 32 |
| Figura 2.3. Tableros con las fibras de sus chapas externas orientadas longitudinalmente a la sollicitación por flexión: Esquema de DL1 y DL2 ..... | 33 |
| Figura 2.4. Tableros con las fibras de sus chapas externas orientadas transversalmente a la sollicitación por flexión: Esquema de DT1 y DT2 .....  | 33 |
| Figura 2.5. Probetas a ensayar: D2 transversal y longitudinal; D1 transversal y longitudinal .....   | 34 |
| Figura 2.6. (a) Máquina de ensayo universal y (b) configuración correspondiente a un ensayo de flexión en 3 puntos .....                           | 36 |
| Figura 2.7. Imagen representativa de muestra preparada para DIC .....  | 37 |
| Figura 3.1. Imágenes SEM de corte transversal de muestra de eucalipto. Aumento 150x y 500x .....   | 40 |
| Figura 3.2. Imágenes SEM de corte tangencial de muestra de eucalipto. Aumento 150x y 500x .....  | 41 |
| Figura 3.3. Ajuste de los parámetros de gelación .....   | 43 |
| Figura 3.4. Tiempo de gelación en función de la temperatura .....  | 43 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 3.5. Imagen de la línea de encolado obtenida con microscopía óptica. Aumento de 20X .....   | 44 |
| Tabla 1. Valores de MOE, MOR, SMOE y SMOR obtenidos mediante ensayo de flexión .....   | 45 |
| Figura 3.6. Ejemplo de escala de deformaciones de Von Mises registrada por la técnica DIC .....  | 47 |
| Figura 3.7. Curva de carga vs deflexión con fotogramas obtenidos por DIC correspondiente a probetas con disposición D2 transversal .....                             | 48 |
| Figura 3.8. Curva de carga vs deflexión con fotogramas obtenidos por DIC correspondiente a probetas con disposición D2 longitudinal .....                            | 49 |
| Figura 3.9. Imagen de DIC de probeta con configuración D2 longitudinal y LC de chapa central en borde inferior .....   | 50 |
| Figura 3.10. Imagen de DIC de probeta con configuración D2 longitudinal y LC de chapa central en borde superior .....  | 50 |
| Figura 3.11. Imágenes macroscópicas aumentadas del perfil de fractura aserrado. LC recuadrado en azul a modo de ejemplo .....  | 51 |
| Figura 3.12. Curva de carga vs deflexión con fotogramas obtenidos por DIC correspondiente a probetas con disposición D1 longitudinal .....                           | 52 |
| Figura 3.13. Curva de carga vs deflexión con fotogramas obtenidos por DIC correspondiente a probetas con disposición D1 transversal .....                            | 53 |
| Figura 3.14. Diagramas de esfuerzo de corte y momento flector sobre muestra sometida a flexión en 3 puntos .....   | 54 |
| Figura 3.15. Probeta ensayada con disposición transversal .....  | 55 |
| Figura 3.16. Probeta ensayada con disposición DL .....   | 55 |
| Figura 3.17. Distribuciones de tensiones a lo largo del espesor para una viga homogénea: corte y normal .....  | 56 |
| Figura 3.18. Círculo de Mohr y cubo elemental de plano a 45° para estado tensional de corte puro .....   | 56 |
| Tabla 2. Tensiones normales de apertura del primer defecto para distintas configuraciones del tablero .....  | 57 |
| Figura 3.19.a Esquema de flexión simple y esfuerzos cortantes producidos (positivo a la izquierda y negativo a la derecha). b. Estado tensional en plano a 45° ..... | 58 |
| Figura 3.20. Probeta con configuración D2L .....   | 58 |
| Figura 3.21. Probeta con configuración D1L .....   | 58 |
| Figura 3.22. Modos de falla: fractura y despegue de fibras, ruptura tipo serrucho y delaminación .....   | 60 |
| Tabla 3. Costos asociados a la producción de tableros con adhesivo fenólico por m <sup>3</sup> .....   | 61 |
| Tabla 4. Análisis de costos de producción de tableros para diferentes adhesivos .....  | 63 |

## LISTADO DE ABREVIATURAS

LC: *Lathe check*

DIC: *Digital Image Correlation*

EG: *Eucalyptus Grandis*

Tg: Temperatura de transición vítrea

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

SEM: Microscopía electrónica de barrido

t<sub>GEL</sub>: Tiempo de gelación

SMOR: Módulo de ruptura específico

SMOE: Módulo de elasticidad específico

CPS: Concentrado de proteína de soja

RUF: Resina urea formaldehído

M<sub>w</sub>: masa molar promedio en masa

$\sigma_x$ : tensión principal en eje longitudinal x

$\sigma_y$ : tensión principal en eje longitudinal y

$\tau_{xy}$ : tensión de corte

$\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}$  componentes normales de la deformación

$\varepsilon_{xy}$ : componente cortante de la deformación

$\sigma_e$ : tensión equivalente de Von Mises

$\varepsilon_v$ : deformación equivalente de Von mises

ANOVA: Análisis de la varianza

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi director Pablo Stefani quien fue fundamental para la realización del proyecto, aportando sus ideas y conocimiento como así también motivando a cada paso. A mi co-director, Emiliano Ciannamea, por su predisposición y ayuda en toda ocasión que lo necesité. A Erika Nicolao por estar siempre atenta y al pie del cañón para enseñarme y ayudarme durante el proceso.

A Fabricio y Andrés por brindar su tiempo para explicarme y acompañarme en la realización de los ensayos de DIC y flexión. A Mirco Chapetti, por su atención y aporte en la discusión sobre la apertura de defectos.

Por último, pero no menos importante, quiero agradecer infinitamente a mi familia y amigos. Gracias por su compañía, escucha y por bancar todos los altibajos durante este proceso. Nada de esto hubiera sido posible sin ellos.

## RESUMEN

Los *plywoods* o tableros contrachapados se producen mediante el apilamiento en forma ortogonal de chapas de madera unidas con adhesivos poliméricos. Las chapas de madera se obtienen por debobinado del fuste húmedo o en estado verde en la dirección tangencial. Este proceso genera pequeñas fisuras llamadas *lathe checks* cuya criticidad sobre el comportamiento mecánico de la chapa depende de la frecuencia y su profundidad en el espesor. En este trabajo se evaluó el impacto de dichos defectos sobre el comportamiento a la flexión de los tableros, principal modo de sollicitación de los mismos en sus diversas aplicaciones. Para ello, se ensayaron a flexión los tableros producidos con distintas configuraciones de apilamiento de chapas teniendo en cuenta la ubicación de los *lathe checks*. Simultáneamente, se utilizó la técnica de *DIC (Digital Image Correlation)* para evaluar los mecanismos de falla observados y asociarlos tanto con la microestructura de la madera, como con la configuración de apilamiento del tablero. Por último, se evaluó la viabilidad económica de construir contrachapados utilizando un adhesivo biogénico con el fin de disminuir el uso de recursos no renovables.

Se observó que, en ciertas configuraciones de tableros, los *lathe checks* actúan como camino propagante de fisuras junto a la microestructura vasal del eucalipto la cual también funciona como zona débil. Además, bajo las condiciones estudiadas, no se verificó un impacto negativo de los defectos sobre la resistencia a la flexión de los tableros. Sin embargo, si se vio un efecto de estos sobre la rigidez del tablero según su ubicación en las chapas y dirección de sollicitación. Por otra parte, se remarcó a partir de los costos obtenidos de tableros con distintos adhesivos la importancia del reemplazo de adhesivos a base de formaldehído por aquellos provenientes de fuentes renovables, los adhesivos biogénicos, en particular a base de concentrado de proteína de soja (CPS).

# 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

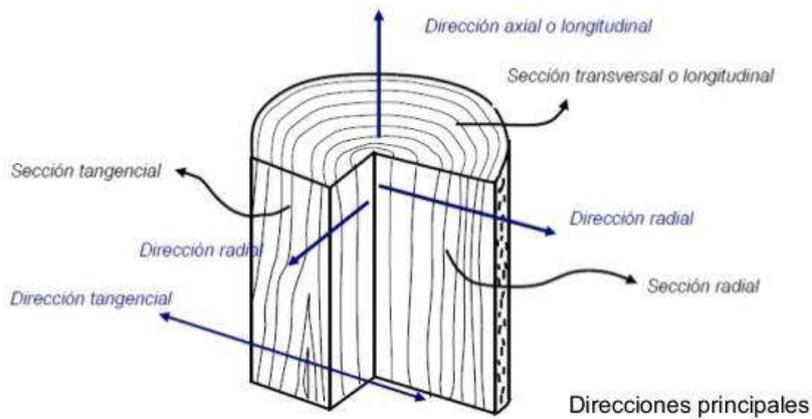
## 1.1 Introducción

### 1.1.1 Características generales de la madera

La madera, también llamada xilema (del griego *lignificarse*) o leño (del lat. *Lignum*) es la parte sólida de los árboles por debajo de la corteza. Se caracteriza por ser un material poroso, compuesto por más de un tipo de células, siendo en su mayoría alargadas con su eje longitudinal paralelo al eje del fuste (Ek et al., 2009; Giménez & Moglia, 2005).

Se considera a la madera como el material estructural más antiguo en el mundo. A lo largo de la historia, sus diversas características y abundancia la convirtieron en la materia prima natural más accesible para la construcción de casas, muebles, herramientas, objetos decorativos e incluso como fuente de energía térmica. Por su parte, es una alternativa “ecológica” frente a otros materiales como el acero y el hormigón, ya que proviene de una fuente sustentable y renovable (Falk, 2009; Ross, 2010; Wang et al., 2014)

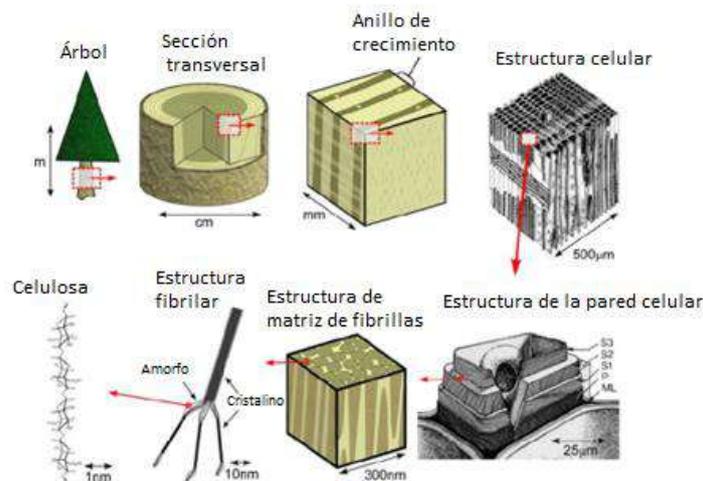
Al tratarse de un organismo heterogéneo constituido por diversas células organizadas en diferentes direcciones, el aspecto de la madera varía de acuerdo a la sección observada. Para realizar estudios anatómicos y comprender la estructura de manera precisa, se adoptan tres planos principales de corte: transversal, radial y tangencial, como se ven en la figura 1.1. El primero corta al tronco de manera perpendicular, exponiendo las dimensiones celulares más pequeñas y las características que varían tanto en la dirección radial como circunferencial. Luego, si se realiza un corte paralelo al eje del tronco, se pueden obtener el corte radial (paralelo al radio y perpendicular a los anillos de crecimiento) y tangencial (perpendicular al radio y paralelo a los anillos de crecimiento) (Walker, 2007).



**Figura 1.1.** Cortes de estudio de la madera: transversal, radial y tangencial (Feijoo et al., 2018).

Dependiendo el corte observado, no solo se modifica la apariencia de la madera, sino también su comportamiento físico-mecánico, lo que le confiere la particularidad de ser un material anisotrópico (Sotomayor & Ramírez, 2014).

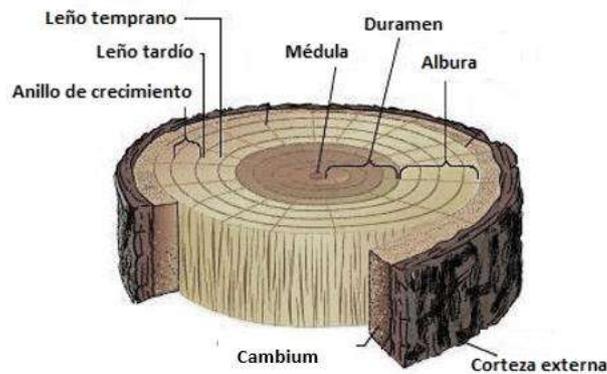
Al tomar una porción del fuste del árbol, se puede realizar una descripción integral de la madera. Esta puede considerarse una estructura jerárquica compleja, como se esquematiza en la figura 1.2, que atraviesa distintas escalas. A escala macroscópica, puede describirse al árbol a partir de un corte donde pueden identificarse los anillos de crecimiento. Luego, a nivel microscópico se distingue la anatomía celular de la madera y sus paredes celulares constituidas por varias capas. Por último, se encuentran las estructuras compuestas de microfibrillas de celulosa junto a la hemicelulosa y lignina, los tres componentes principales y poliméricos de la madera (nanoescala).



**Figura 1.2.** Estructura jerárquica de la madera: desde lo macroscópico a la nanoescala (Kretschmann & Cramer, 2007).

### 1.1.1.1 Estructura macroscópica

Al observar la sección transversal de un tronco, como el de la figura 1.3, puede apreciarse su estructura interna a nivel macroscópico.



**Figura 1.3.** Corte transversal del tronco: estructura interna (Su, 2015).

La capa exterior impermeable, conocida como corteza, se encarga de recubrir al árbol protegiéndolo de agentes atmosféricos y ataques fúngicos; además de cumplir la función de almacenamiento y conducción de nutrientes. Luego, el cambium, es una fina capa de células activas encargada del crecimiento en espesor del árbol, que produce la madera o xilema hacia el interior y el floema hacia el exterior. Por último, el leño o madera propiamente dicha que, al formar la mayor parte del tronco del árbol, está integrado por diversas estructuras, las cuales se describen a continuación.

#### 1.1.1.1.1 Albura y duramen

La madera o tejido xilemático presenta dos zonas definidas fisiológicamente: albura y duramen, como se distinguen en la figura 1.4. La primera es la parte activa que contiene células vivas y material de reserva y cumple con tres propósitos fundamentales en el árbol: soporte, conducción de agua y minerales y almacenamiento de alimento. Por su parte, el duramen es leño biológicamente inactivo con funciones de sostén, no contiene células vivas y la causa fisiológica de su formación es el envejecimiento del árbol (Barahona Olmos, 2005). Generalmente, posee una estructura más compacta y de coloración más oscura que la albura debido al depósito de taninos, resinas, grasas, carbohidratos y otras sustancias como resultado de la transformación de materiales de reserva contenidos en las células parenquimáticas (Ek et al., 2009). Al ser el duramen un

tejido más compacto y más pobre en sustancias nutritivas, es mucho más resistente al ataque de hongos e insectos, presenta una durabilidad natural superior a la de la albura y se impregna con mayor dificultad (Monteoliva et al., 2015). La proporción de albura y duramen varía de un árbol a otro y dentro de una especie depende de la edad, lugar de crecimiento, clima y suelo, entre otros factores (Bamber, 1987; Fernández-Solís, 2018).

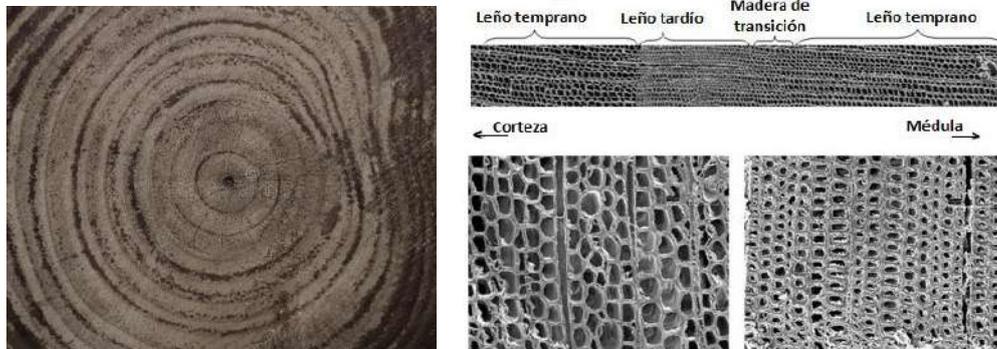


**Figura 1.4.** Sección transversal del tronco de un roble: albura (zona externa clara) y duramen (zona interna oscura) (Ansell, 2015).

#### 1.1.1.1.2 Anillos de crecimiento

Los anillos de crecimiento están formados por una capa de madera temprana y otra tardía. La primera es producida al inicio del crecimiento, época en que las plantas reinician su actividad vital con toda intensidad luego de un período de dormancia, y se conoce como leño temprano o de primavera. Está constituido por células de paredes delgadas y lumen grande, es decir, cavidades celulares de gran sección. Por otro lado, aquella madera producida a fin de temporada se conoce como leño tardío o de otoño y a diferencia de la anterior, posee células de lumen pequeño y de paredes gruesas (Figura 1.5 - derecha) (Cramer et al., 2005; Kretschmann & Cramer, 2007; Ross, 2010). En algunos casos, los anillos de crecimiento pueden detectarse gracias a las diferencias existentes entre la madera producida a comienzo y a fin de la temporada de crecimiento, las cuales les dan un color más claro y oscuro respectivamente (Figura 1.5 - izquierda). La forma que toman depende del plano de corte observado. En un corte transversal aparecen en forma de círculos concéntricos cuyo origen es la médula, en el radial como líneas paralelas según la dirección longitudinal de la pieza y en el tangencial en forma de V invertida (Hoffmeyer, 1995; Walker, 2007).

Por su parte, los anillos de crecimiento son útiles para conocer la edad del árbol y características del clima u otros eventos ocurridos a lo largo del tiempo, a través del estudio de su ancho, distribución y color (Giménez & Moglia, 2005).



**Figura 1.5.** Anillos de crecimiento de una sección de Eucalipto (izquierda) y estructura celular del leño temprano y tardío de una muestra de pino (derecha) (Kretschmann & Cramer, 2007)

#### 1.1.1.1.3 Médula

El núcleo o médula, correspondiente a la parte central y más añeja del árbol, está constituida por un conjunto de células que recorren el tronco y producen el crecimiento en altura. Es de pequeña dimensión y su sección transversal puede tomar forma circular, poligonal o estrellada.

En general, esta zona presenta una gran cantidad de macro defectos que pueden ser limitados en el resto del fuste si se realiza un adecuado proceso de desrame durante el crecimiento del árbol (Calvo et al., 2006).

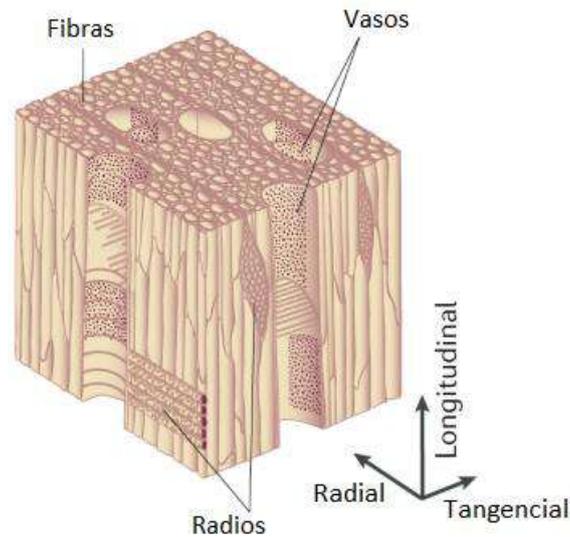
#### 1.1.1.1.2 Estructura microscópica

A nivel microscópico, la madera está constituida por varios tipos de células organizadas en distintas direcciones con el fin de cumplir diferentes funciones, generando así una estructura totalmente heterogénea. Las células suelen ser más largas que anchas y se orientan en dos sistemas separados: el sistema axial y el radial. El sistema axial contiene células o filas de ellas con sus ejes mayores orientados verticalmente al tallo o raíz y su función principal recae en transportar agua a lo largo del tronco y proveerle resistencia mecánica. Por su parte, las células en el sistema radial se organizan horizontalmente, cumpliendo funciones de transporte y almacenamiento. Ambos sistemas se encuentran interconectados formando la estructura interna del xilema (Ek et al., 2009).

En relación a la estructura microscópica y celular de las maderas, pueden clasificarse en maderas blandas y duras (*softwoods* y *hardwoods*). Las primeras son aquellas que provienen de los gimnospermas (mayoritariamente coníferas), mientras que las segundas provienen de las angiospermas (plantas florales). Las maderas blandas presentan hojas perennes, es decir que no se desprenden en épocas desfavorables, y de tipo aguja; las maderas duras, pertenecen a árboles de hojas anchas y caducas. El pino es un ejemplo típico de madera blanda, mientras que el eucalipto, especie seleccionada para este trabajo, es un ejemplo de madera dura. Ambas no solo se diferencian por el tipo de árbol del cual provienen, sino también por su estructura celular (Ek et al., 2009).

Las maderas blandas tienen una estructura básica más simple que las duras, ya que poseen sólo dos tipos de células; traqueidas, encargadas de brindar resistencia y transportar alimento, y el tejido de reserva conocido como parénquima cuyas células están dispuestas en filas radiales denominadas radios. Además, existe relativamente poca variación en la estructura dentro de estos tipos de células (Chen et al., 2020; Rowell, 2005).

Por su parte, las maderas duras tienen una estructura más compleja con un mayor número de tipos de células que cumplen distintas funciones fisiológicas: vasos, parénquima axial, radios, traqueidas vasicéntricas y fibrotraqueidas (o simplemente fibras) (Figura 1.6). La distinción más importante entre los dos tipos generales de madera es que las duras tienen una célula característica llamada elemento de vaso, mientras que las maderas blandas carecen de estos (Ansell, 2015; Ross & USDA Forest Service., 2010).



**Figura 1.6.** Estructura celular de maderas duras (Chen et al., 2020).

Los vasos están formados por un conjunto de células superpuestas, pertenecientes al sistema axial, que forman una estructura tubiforme continua cuya función es la conducción de líquidos en la madera. Para permitir dicha circulación, poseen sus extremidades perforadas, ya sea mediante perforaciones simples o múltiples. Al observarlos transversalmente, los vasos reciben el nombre de poros, siendo su distribución, abundancia, tamaño y forma de agrupamiento características importantes en la identificación de especies. Según la disposición de los poros, la porosidad puede ser: difusa, distribuidos a lo largo de los anillos de crecimiento; o en anillos, concentrados en el inicio del período vegetativo con cambios diametrales en el anillo de crecimiento (Ansell, 2015). Por su parte, la orientación de los poros puede ser dendrítica, arreglo ramificado siguiendo la dirección de los radios; en bandas tangenciales, arreglo de vasos orientado en forma perpendicular a los radios; diagonal, vasos dispuestos en forma oblicua a los anillos de crecimiento. Por último, la agrupación de los poros puede ser solitaria o múltiple (Carlquist, 2001).

El parénquima axial, componente de dicho sistema, está constituido por células de paredes delgadas, no lignificadas, y desempeña la función de almacenamiento en el leño. La gran abundancia de esta estructura le confiere a la madera liviandad y baja resistencia mecánica.

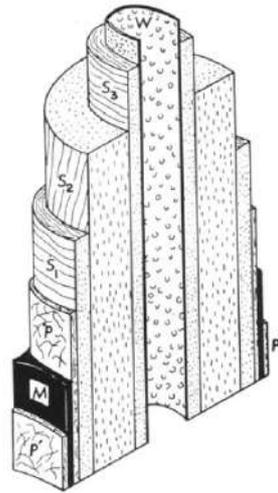
Los radios o parénquimas radiales, constituyentes del sistema radial, presentan gran variedad en tamaño, forma y número de células que lo componen y se clasifican en uniseriados, es decir constituidos por una hilera de células en la sección transversal; o multiseriados, formados por más de una hilera (Pérez Olvera et al., 2005). Su función principal es la de almacenamiento y conducción transversal de sustancias nutritivas:

Las traqueidas se asemejan a pequeños elementos de vasos de leño tardío, pero sin perforaciones, en las cuales el pasaje de agua se produce a través de estructuras conocidas como puntuaciones. Estas células componen al sistema axial y su función principal se relaciona con la conducción de agua y sustancias disueltas (Pittermann et al., 2011).

Por último, aunque no menos importante, se encuentran las fibrotraqueidas, células alargadas y estrechas que forman parte del sistema axial. Funcionan exclusivamente como sostén del tronco, aspecto fundamental en la estructura del árbol. La resistencia mecánica de las maderas duras depende principalmente del espesor de la pared celular de las fibras, siendo mayor en aquellas maderas con fibras de paredes más gruesas. Además, en la mayoría de los casos, un mayor porcentaje en volumen de estas células implica densidades más elevadas (León H., 2010).

En general, las paredes celulares de la fibrotraqueida le confieren a la madera dura la mayoría de sus propiedades. A diferencia del lumen, que es un espacio vacío, la pared celular es una estructura muy regular en todo tipo de células e incluso entre distintas especies de árboles. Está conformada por tres regiones principales: la lámina media, la pared primaria y la pared secundaria, como se observa en la figura 1.7.

**M**= lámina media  
**P** = pared primaria  
**S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>** =capas de pared secundaria  
**W** = capa verrugosa



**Figura 1.7.** Pared celular de una fibrotraqueida mostrando sus diversas capas y la orientación característica de las microfibrillas (Giménez & Moglia, 2005).

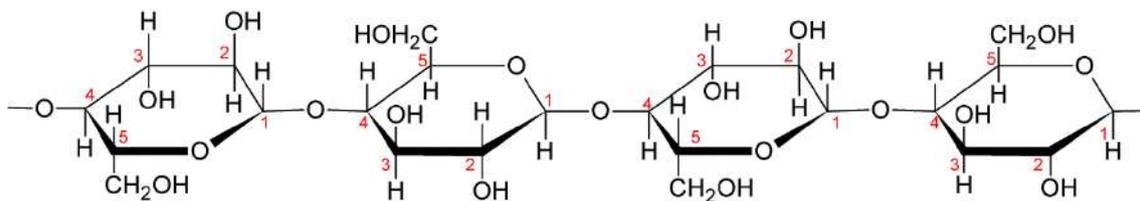
La lámina media es la primera membrana de separación entre un par de células nuevas en el proceso de división celular, está constituida principalmente por lignina y pectina, y su función es unir una célula con otra. A partir de esta membrana lignificada se depositan, en el interior de la célula, microfibrillas de celulosa formando una trama desorganizada que constituye la pared primaria. Ésta es más elástica y acompaña el aumento en dimensión de la célula en el momento de su diferenciación (Huang et al., 2003). Una vez alcanzado el tamaño definitivo se depositan, junto a la membrana primaria, microfibrillas de celulosa con cierta orientación, distinguiéndose tres capas bien nítidas. Estas tres capas se designan como S1, S2 y S3 y forman la pared secundaria de la célula, brindándole espesor a la pared celular. La capa S2 resulta ser la más gruesa y contribuye mayoritariamente a las propiedades de la pared celular y, en consecuencia, influye fuertemente en la resistencia mecánica y rigidez de la madera (Ansell, 2015; Rowell, 2005; Thomas, 1977).

#### 1.1.1.3 Composición química

En cuanto a la composición química de las paredes celulares, la última escala (nanométrica) en la cual podemos caracterizar a la madera, encontramos tres componentes principales.

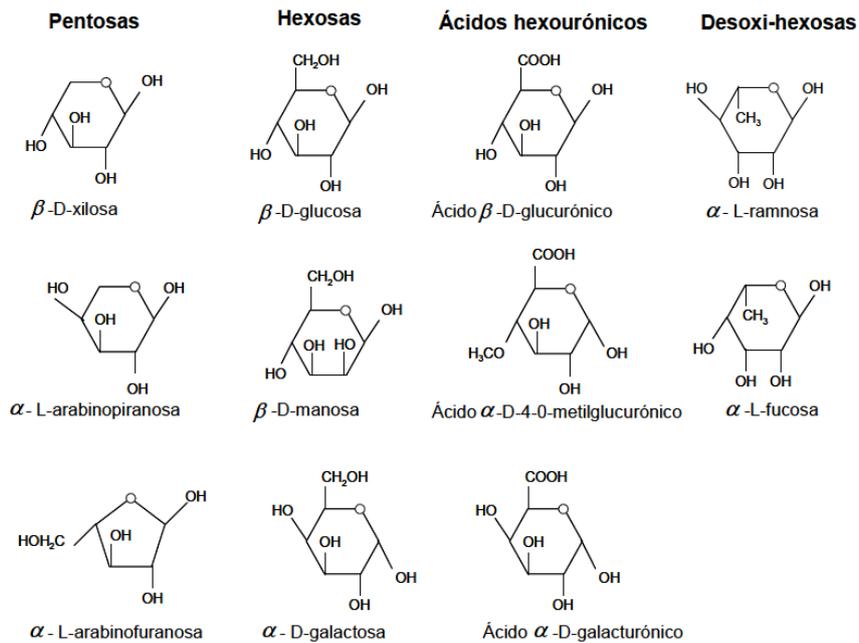
La celulosa es el principal componente de las paredes primarias y secundarias, representando aproximadamente un 50 % del peso seco; corresponde a un polímero

lineal, no ramificado y de cadena rígida. Está formada por una cadena lineal compuesta por unidades de glucosa enlazadas entre sí por enlaces  $\beta$ -1,4-glucosídicos, formados entre los átomos de carbono ubicados en las posiciones 1 y 4 de las unidades de glucosa adyacentes, tal como se muestra en la figura 1.8. Cada unidad de glucosa presenta grupos hidroxilos que interactúan formando puentes de hidrógeno intra e intermoleculares con cadenas de celulosa adyacentes; las cuales se disponen ordenadamente formando estructuras cristalinas (Rivas Siota, 2014). Debido a su elevado grado de polimerización y cristalinidad, la celulosa es la responsable de la resistencia de las fibras de la madera.



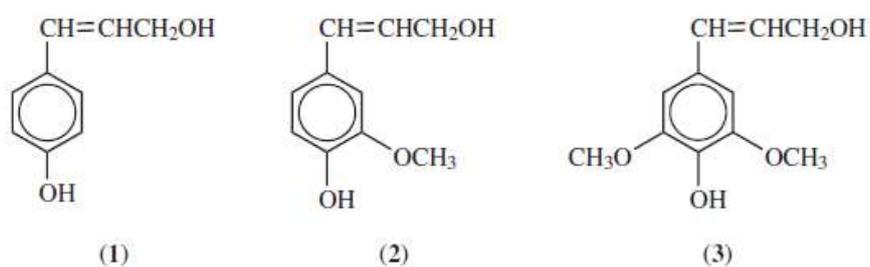
**Figura 1.8.** Estructura molecular de la celulosa.

Las hemicelulosas son un grupo de heteropolisacáridos constituidos por cadenas cortas y ramificadas de azúcares (figura 1.9) Constituye el segundo componente químico mayoritario ocupando alrededor de un 25 % de su peso seco, en el caso de las maderas duras. La naturaleza ramificada de las hemicelulosas determina su carácter amorfo, siendo además un polímero con un grado de polimerización considerablemente inferior al de la celulosa. Su principal función es actuar como matriz para las microfibrillas de celulosa y unión entre ésta y la lignina amorfa (Ansell, 2015; Pandey, 1999). Por otra parte, en la pared celular funcionan como almacén de sustancias de reserva y realizan funciones reguladoras (la hidrólisis enzimática de las hemicelulosas genera oligosacáridos que presentan actividad biológica), estructurales y de control de la expansión celular (Rivas Siota, 2014).



**Figura 1.9.** Principales unidades componentes de las hemicelulosas (Rivas Siota, 2014).

Por último, la lignina es el tercer componente más abundante de la madera, constituyendo entre un 20 – 26% del peso en las maderas duras (Rivas Siota, 2014). Es un polímero amorfo con una estructura tridimensional compleja y entrecruzada formada por la polimerización de tres principales monómeros fenilpropanoides: alcohol cumarílico, coniferílico y sinapílico, como se observan en la figura 1.10 (Soto-Hernández et al., 2021).



**Figura 1.10.** Alcoholes constituyentes de la lignina: (1) alcohol cumarílico; (2) alcohol coniferílico; (3) alcohol metoxilo (Lebo et al., 2002).

Las reacciones que intervienen en la formación de estos compuestos son irreversibles por lo que resulta ser muy estable. La lignina actúa como aglutinante entre células, proporciona rigidez a la pared celular y la impermeabiliza, protegiéndola del ataque de microorganismos (Lebo et al., 2002; Renault et al., 2019; Rivas Siota, 2014).

De acuerdo a la especie, pueden encontrarse otros componentes como resinas, terpenos, taninos, minerales y sustancias incrustantes. La variación en las proporciones de dichos componentes y las diferencias en la estructura celular, desarrolladas previamente, generan propiedades físicas únicas, resultando en maderas pesadas o livianas, rígidas o flexibles, duras o blandas (Ross, 2010).

#### 1.1.1.2 Propiedades físicas de la madera

Las propiedades físicas son aquellas que determinan el comportamiento del material ante los factores que intervienen en el ambiente natural, sin que éste actúe química ni mecánicamente en su estructura interna. Al ser la madera un producto de naturaleza orgánica, estas propiedades están relacionadas principalmente con la conformación y tamaño de los elementos que constituyen el leño dependiendo fundamentalmente de: i) la disposición y orientación de los materiales que forman las paredes celulares, ii) la cantidad relativa de los componentes mayoritarios que las constituyen, iii) el porcentaje de material celulósico estructural que contiene el leño y iv) el contenido de agua que se encuentra presente (Frank, 2018).

Las propiedades más destacadas para el uso estructural de la madera son el contenido de humedad y la densidad aparente, las cuales mantienen una gran relación con el comportamiento mecánico de la misma.

##### 1.1.1.2.1 Contenido de humedad

La madera, como muchos otros materiales de origen natural, es higroscópica; tiende a absorber o perder agua en función de la humedad relativa y la temperatura ambiente hasta alcanzar un estado de equilibrio. Esto está relacionado con la composición química de las paredes celulares, celulosa y hemicelulosa principalmente, ambos componentes con grupos hidroxilos y consecuentemente higroscópicos.

El agua en la madera trae asociado efectos sobre sus propiedades y por dicho motivo es muy útil conocer la cantidad de agua presente en una pieza de este material. A esto se lo conoce como contenido de humedad, y se define como el porcentaje de peso del agua retenida en la madera respecto al de la madera anhidra o seca.

El agua contenida en la madera puede presentarse bajo tres formas:

- Agua de constitución: es parte de la composición química y es necesario destruir el material para poder eliminarla, consecuentemente cambiaría la naturaleza química de la madera.
- Agua de impregnación: es el agua retenida por las paredes celulares, responsable de los fenómenos de hinchado y contracción. El máximo contenido de humedad en las mismas se denomina punto de saturación. Por debajo del mismo, el agua perdida es extraída de las paredes celulares modificándolas y produciendo alteraciones dimensionales y en el comportamiento resistente y elástico del material.
- Agua libre: es la existente dentro del lumen de las células cuando se supera el punto de saturación de las fibras.

Muchos de los desafíos del uso de la madera como un material ingenieril surgen de los cambios en el contenido de humedad y las consecuencias aparejadas a esto (Ross, 2010).

#### 1.1.1.2.2 Densidad

La densidad se define como el cociente entre la masa y el volumen correspondiente y, como en todo cuerpo poroso, en la madera es importante distinguir entre la densidad real y la aparente. En la primera solo se considera como volumen el ocupado por las paredes celulares y su valor es del orden de  $1500 \text{ kg/m}^3$  (densidad de la celulosa), resultando prácticamente el mismo para todas las especies. Por su parte, la densidad aparente considera también los espacios interiores a las células, es decir, la misma varía según la mayor o menor proporción de poros existentes, resultando así un parámetro de gran utilidad práctica (Riesco Muñoz & Remacha Gete, 2017). También depende del espesor de las paredes celulares, aumentando proporcionalmente con él (Rowell, 2005).

Teniendo en cuenta que la densidad depende del contenido de humedad, ya que la masa de agua contenida se agrega a la de la madera y a su vez puede originar cambios en el volumen, se debe definir siempre el contenido de humedad para el cual se calcula la densidad. Al estudiar las maderas, existen dos formas más frecuentes de informar la densidad: aquella correspondiente a la madera luego de haber sido estabilizada en cámara ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$  de temperatura ambiente y  $65 \%$  de humedad relativa), conocida como densidad estacionada; y aquella madera secada al horno sin contenido de humedad,

salvo la de constitución, conocida como densidad anhidra (0 % de humedad) (Agriculture, 2007).

La densidad también depende de la especie de árbol y, dentro de una misma, varía desde la médula hasta la superficie (Barnett & Jeronimidis, 2003). Tiene una correlación positiva con la mayoría de las propiedades mecánicas de la madera (Argüelles Álvarez & Arriaga Martitegui, 1996), siendo por ejemplo la resistencia a la flexión mayor cuanto más alta es esta propiedad física (Bal, 2012; Hrázský & Král, 2005; Niklas & Spatz, 2010). Además, puede considerarse como una medida de la estructura interna del leño, reflejando la combinación de características de los diversos elementos celulares que la componen (Bal, 2012; Naidoo et al., 2006).

El eucalipto, especie clasificada como madera dura y descripta anteriormente, posee una estructura interna compleja la cual genera un amplio rango de densidades y variabilidad dentro de la misma especie (A. J. Barotto et al., 2017).

Es importante resaltar que, desde el punto de vista tecnológico, una mayor homogeneidad de la densidad a lo largo del fuste genera material con mejores propiedades tecnológicas (Arango & Tamayo, 2008).

#### 1.1.2 Madera cultivada: una alternativa sostenible

En Argentina el recurso forestal está conformado tanto por especies nativas como cultivadas. Las actuales políticas y regulaciones ambientales vinculadas a la preservación de los bosques naturales y la creciente demanda de madera y sus derivados, ha impulsado la producción sostenible de madera forestada (el árbol como cultivo). Además, la existencia de bosques racionalmente explotados contribuye al equilibrio ecológico y a la disminución de fenómenos no deseados como el conocido efecto invernadero (Seng Hua et al., 2022). Dentro de las maderas cultivadas en Argentina se distinguen especies tales como el pino taeda, pino paraná, álamo y eucalipto, entre otros (Bulman et al., 2022). Actualmente, el cultivo de eucalipto ocupa un lugar de preponderancia dentro del país, ubicándose en el segundo lugar en importancia, detrás del cultivo de pinos, con cerca del 25% de la superficie forestada a nivel nacional. Las estimaciones disponibles más recientes indican que en Argentina hay aproximadamente 300.000 hectáreas (ha) cultivadas con eucalipto, distribuidas principalmente en dos

regiones: la Mesopotamia (Entre Ríos, Corrientes y Misiones) y la región pampeana, que concentran aproximadamente el 90% de la superficie implantada con este género (Gorzycki & Ruggiero, 2016). *Eucalyptus grandis* (EG) es la principal especie latifoliada cultivada en el país debido a que presenta una combinación de alta productividad (20-50 m<sup>3</sup>/ha/año), buena forma y madera relativamente liviana, con una densidad media aparente de aproximadamente 510 kg/m<sup>3</sup> (Martinuzzi, 2010), lo cual le brinda buenas propiedades de trabajabilidad y resistencia. El EG no solo tiene la ventaja de su alta disponibilidad, sino también excelente adaptabilidad y rápido crecimiento (Wessels et al., 2020), lo cual le concede la característica de ser una de las pocas especies cuya edad de corte es de aproximadamente 10 años (Resquin et al., 2012). Por los distintos aspectos mencionados, se ha seleccionado esta especie para la realización del proyecto.

### 1.1.3 Chapas de madera

Con la industrialización del sector de la madera y el aumento de su demanda, se han creado distintos tipos de productos ingenieriles en reemplazo de la madera aserrada con el fin de paliar sus desventajas, como la insuficiente estabilidad dimensional, su heterogeneidad y anisotropía (Alam & Rahman, 2012). Estos productos están constituidos por fibras, residuos de madera o chapas; estas últimas obtenidas mediante un proceso de debobinado del tronco, a partir de las cuales se elaboran otro tipo de productos derivados como los tableros. Por su parte, la madera aserrada es obtenida simplemente del corte del tronco en una sección sólida.

Una de las principales ventajas de las chapas respecto a la madera aserrada es la maximización del rendimiento del material del tronco debido al propio proceso de obtención de las mismas, en el cual no hay pérdida de material a través del corte de sierra (Hughes, 2015). Además, la variabilidad de características a lo largo de la pieza es menor, ya que las chapas pueden seleccionarse evitando muchas imperfecciones y se constituyen piezas grandes a partir de otras más pequeñas logrando dispersar los defectos y obteniendo mayor uniformidad en las propiedades (Lam, 2001). Por su parte, las chapas resultan más ligeras que la madera sólida aserrada siendo así más fáciles de mover y trabajar, permitiendo gran diversidad de diseños (Benites, 2004).

#### 1.1.3.1 Proceso de obtención

Como se ha mencionado anteriormente, las chapas de madera, utilizadas para la construcción de contrachapados, se obtienen por un proceso de corte giratorio o debobinado del tronco. En primer lugar, se realiza el pelado de los troncos con el fin de eliminar la corteza. Luego, se produce la cocción de la madera, la cual puede desarrollarse en cubetas de agua o a través de vapor a una temperatura inferior a 100°C (alrededor de 80 °C) con el fin de ablandar el leño y ahorrar energía en el corte posterior. Otras ventajas de realizar este paso son minimizar la aparición de defectos inherentes al proceso y mejorar la calidad de las chapas obtenidas. El ablandamiento de la madera ocurre al alcanzar la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) de las paredes celulares de la lignina, lo cual se produce en el rango de 50-100 °C (Dupleix et al., 2013). Para obtener buenos resultados en el corte, se requiere de un contenido de humedad óptimo por encima del punto de saturación de las fibras (G. Li et al., 2018). En aquellos casos en los que el tronco posea la humedad suficiente no es necesario sumergir a la madera en agua; simplemente se saltea dicho paso y se procede a debobinar. Se ha estudiado, por ejemplo, que las especies con un contenido natural de humedad entre 50-60 % son eficientemente cortadas y no requieren de dicho proceso (Prakash et al., 2021). Por último, luego del corte se lleva a cabo el secado a una temperatura entre de 130 °C y 140 °C hasta reducir la humedad de la madera a un nivel tal que se asegure la estabilidad y calidad del producto. Para esto, es necesario eliminar el agua libre y de impregnación (Hughes, 2015).

#### 1.1.3.2 Anomalías o defectos provenientes de la madera

Como se ha mencionado, la madera no es un material homogéneo como consecuencia de su propio origen natural. A causa de esto, las chapas pueden presentar ciertas anomalías provenientes del tronco original las cuales afectan fuertemente a las propiedades finales (Figura 1.11). El defecto más común es el nudo, el cual se origina por la existencia de ramas que se desprenden del tronco principal y quedan rodeadas por el leño producto de su crecimiento continuo. Las propiedades mecánicas se ven afectadas por su presencia debido a que interrumpen la continuidad y cambian la dirección de las fibras de la madera. El tamaño, la forma y la ubicación son parámetros que marcan la influencia de los nudos sobre las características finales de la chapa. Otra

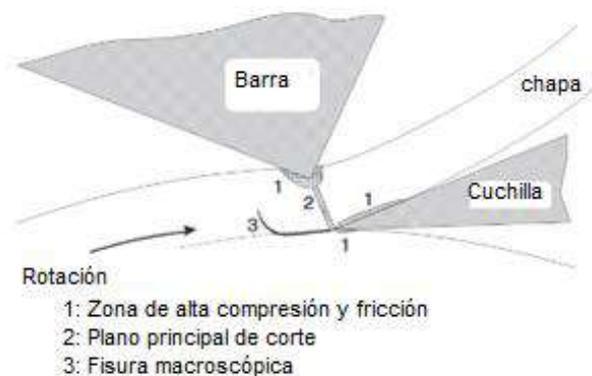
anomalía es la desviación de las fibras, en algunos casos a causa de que estas giran hacia lados contrarios en anillos de crecimiento contiguos, en otros simplemente a que durante el crecimiento las fibras no crecen paralelamente, sino que se expanden en forma de hélice (Green et al., 1999; Kamperidou et al., 2020).



**Figura 1.11.** Defectos de la madera: nudos (izquierda) y desviación de fibras (derecha).

#### 1.1.3.3 Defecto inherente al proceso de obtención de chapas: *lathe check*

Por otra parte, durante el proceso de obtención de las chapas aparecen fisuras conocidas como *lathe checks* (LC) debido a los campos de tensiones de tracción creados durante la acción de corte. En general, suele usarse una barra que mantiene a la chapa presionada sobre el cuchillo para dar estabilidad al corte y favorecer la obtención de espesores constantes (Acevedo et al., 2012). Dicha barra de presión produce zonas de elevada fricción y compresión (zona 1- Figura 1.12), las cuales limitan la propagación de los LC. Sin embargo, sobre el extremo de la herramienta, las tensiones radiales de tracción resultan suficientes para permitir la aparición de grietas mediante el modo I de fractura (apertura), como se ve en la zona 3 de la figura 1.12. (Marchal et al., 2009).



**Figura 1.12.** Principales fenómenos mecánicos durante el proceso de debobinado de los troncos (Pot et al., 2016).

Los *lathe checks* se ubican en el lado interno de la chapa conocido como “*loose side*” o lado suelto, donde se generan tensiones de tracción por el corte; mientras que el lado de la chapa que permanece libre de defectos es conocido como “*tight side*” o lado apretado, zona sometida a compresión (Figura 1.13). Dichos defectos aparecen en dirección perpendicular a la superficie y propagan a lo largo del espesor en un ángulo oblicuo, como se observan en la figura 1.14 (Hughes, 2015).



**Figura 1.13.** Formación de *lathe checks* durante corte giratorio.



**Figura 1.14.** *Lathe checks* visibles en placa central del contrachapado.

La profundidad y frecuencia de las grietas en las chapas dependen fundamentalmente de su espesor, el pretratamiento realizado sobre el tronco y los parámetros de producción de las chapas; por ejemplo, la presión del cuchillo y la barra y la velocidad durante el debobinado (Antikainen et al., 2015). Tanto chapas más finas como temperaturas de remojo del tronco superiores, tienen un efecto positivo sobre las propiedades finales al producir fisuras menos profundas (Darmawan et al., 2015; Denaud et al., 2019). Un aumento en la temperatura y consecuente ablandamiento del tronco, trae aparejado una disminución de la energía disipada durante el corte de la madera. Esto disminuye tanto la presión aplicada por la herramienta de corte como la energía consumida en el proceso; además, reduce la formación de LC y mejora la calidad de la chapa (Duplex et al., 2013). En cuanto a los parámetros de debobinado, un

aumento en la velocidad de corte produce defectos más severos en contraposición al efecto generado por un aumento de la presión (Denaud et al., 2019). Se ha observado que siempre se cumple una estrecha relación entre la profundidad y la frecuencia de aparición; cuanto más profundos son los *LC*, menor es su frecuencia. Sin embargo, esto afecta negativamente a la calidad y propiedades del contrachapado, por lo que se prefieren mayor cantidad de fisuras pero poco profundas (Rohumaa et al., 2013). Por último, las diversas propiedades de las maderas a utilizar para la producción de chapas también tienen una relación con la formación de *LC*; por ejemplo, la velocidad de crecimiento del árbol, la edad, el peso específico y la porosidad del tronco. Grandes poros crean puntos débiles en la madera disminuyendo su resistencia cuando es sometida a esfuerzos durante el corte, generando de esta manera, *lathe checks* (Darmawan et al., 2015).

#### 1.1.4 Tableros contrachapados

Los tableros de madera contrachapada (*plywoods*) se producen mediante la unión de chapas finas de madera con adhesivos poliméricos. El número de configuraciones posibles en función de la orientación y número de chapas usadas lo convierte en un material muy versátil. Su versatilidad también se relaciona con los diferentes tipos de madera que pueden ser utilizados dependiendo de su disponibilidad local, ya sea madera blanda o dura. Según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la producción mundial de tableros contrachapados en el año 2020 fue de 118 millones de m<sup>3</sup> (FAO, 2021).

En el tablero contrachapado, las chapas finas que lo forman se intercalan perpendicularmente. El motivo de dicha forma de apilamiento recae en las propiedades finales obtenidas. La madera es considerablemente más resistente en la dirección paralela al grano, dirección longitudinal del tronco. Esto también se cumple en las chapas las cuales pueden llegar a ser entre 20 – 30 veces más resistentes a lo largo del grano que perpendicular a este, es decir, en la dirección transversal (Green et al., 1999; Suárez Soledispa, 2021). Por otra parte, la contracción e hinchazón a lo largo del grano es ampliamente menor que en la dirección transversal (Calvo et al., 2007). Teniendo en cuenta lo mencionado, el apilamiento a 90 grados de las placas permite minimizar los cambios dimensionales debido a modificaciones en la humedad de la madera, haciendo

al producto más estable. Además, se logra reducir la anisotropía en las propiedades mecánicas, ya que la resistencia y rigidez longitudinal actúan como refuerzo de las chapas orientadas transversalmente, obteniendo una estructura balanceada (Hughes, 2015). En aquellos casos en los cuales los productos o estructuras serán sometidas a tensiones en diferentes direcciones es conveniente el uso de madera contrachapada frente a madera sólida. Esto se debe a la mayor igualdad lograda de propiedades en dirección longitudinal y perpendicular al grano.

Las propiedades mecánicas como la resistencia y rigidez a la flexión de los tableros contrachapados no pueden simplemente predecirse de las propiedades de la madera utilizada en su construcción. Existen otros factores que las modifican como la contribución del adhesivo, el cual penetra en las chapas, la presencia de *lathe checks* y posibles densificaciones producidas durante el prensado (Acevedo Moraga, 2012; Merhar et al., 2021). Además, la dirección de las chapas, la cantidad utilizada para la construcción de los tableros y el espesor de ellos también afecta a las propiedades mecánicas (Cihad Bal & Bektaş, 2014; Hrázský & Král, 2005; Spulle et al., 2021). Debe considerarse que a mayor número de chapas finas apiladas perpendicularmente, menor será la anisotropía en las propiedades del tablero (Dinwoodie, 2000). Sin embargo, los más populares y económicos a nivel laboratorio son los enchapados de tres placas ya que requieren de menor cantidad de adhesivo y facilita la producción (Sellers & Dekker, 1985). A causa de los múltiples factores que afectan a las propiedades de los tableros, es fundamental evaluarlas teniendo en cuenta todos los parámetros asociados.

En la industria, suele utilizarse urea formaldehído o fenol formaldehído como adhesivo para la construcción de los enchapados, dependiendo si la aplicación del producto final será en interior o exterior. Recientemente también se han utilizado adhesivos biogénicos basados en proteína de soja libres de compuestos volátiles tóxicos como el formaldehído. Los mismos han mostrado una excelente *performance* para uso en ambiente protegido (Nicolao et al., 2022). Por otra parte, las chapas suelen apilarse al azar sin tener en cuenta la orientación de los defectos inherentes al proceso de obtención de ellas (LC).

El conocimiento de las propiedades a la flexión es de suma importancia en el diseño de tableros contrachapados debido a ser el principal modo de carga en sus diversas

aplicaciones; mobiliario, uso estructural (vigas, cerramientos, encofrados), entre otros (Cihad Bal & Bektaş, 2014; Merhar, 2020). En general, se utiliza la resistencia a la flexión o alguna función relacionada, como la deflexión, como el criterio límite de diseño (Rowell, 2005).

En este trabajo se busca evaluar el impacto de los defectos en las chapas de madera, inherentes al proceso de obtención, sobre las propiedades a la flexión del contrachapado. Para ello, se construirán tableros con diferentes configuraciones de apilamiento respecto a la ubicación de los *lathe checks*. Se corroborará la posibilidad de que dichos defectos actúen como iniciadores de fractura en los tableros, al ser sometidos a flexión, según su orientación.

Se espera que las fallas ocurran en las zonas débiles de los tableros: chapas orientadas transversalmente a la carga, superficies sometidas a elevados esfuerzos normales o de corte, chapas con presencia de *lathe checks* profundos.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 General

Evaluar el impacto de los defectos inherentes al proceso de debobinado en las chapas de madera sobre el comportamiento a la flexión de tableros contrachapados.

### 1.2.2 Específicos

- Caracterizar el adhesivo fenólico a utilizar en la fabricación de los tableros contrachapados.
- Determinar las propiedades físicas de chapas de madera de *Eucalyptus Grandis* cultivadas en el noreste de Argentina e identificar la orientación de los defectos inherentes al debobinado.
- Obtener tableros con diferente configuración de apilamiento de chapas respecto a la dirección de sus defectos.
- Evaluar el comportamiento a la flexión de los tableros obtenidos y seleccionar la configuración con mejor resultado.
- Describir los modos de falla de los tableros sometidos a flexión.

- Estimar la relación costo/beneficio de modificar el proceso de obtención para usar una configuración de apilamiento óptima, como así también la viabilidad de usar otros adhesivos biogénicos.

## 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 2.1 Materiales utilizados

- Chapas de madera: Se utilizaron chapas de *Eucalyptus grandis* (EG) de montes ubicados en el noreste argentino, provistas por Forestadora Tapebicua S.A. La edad de los árboles al momento de corte fue de 12 años. Se eligió particularmente esta especie debido a su buena relación costo/propiedades y disponibilidad. Las chapas fueron cuidadosamente inspeccionadas y seleccionadas evitando la presencia de defectos como nudos y fisuras previo a su uso.

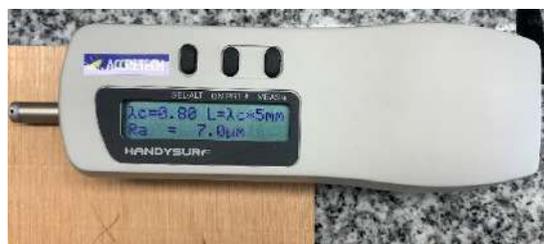
- Adhesivo: Se usó un adhesivo fenol-formaldehído tipo resol provisto por Bonardi Industria Química LTDA. El mismo tiene una densidad de  $1,2 \text{ g/cm}^3$  (medida a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

### 2.2 Metodologías para la evaluación de las chapas de madera

#### 2.2.1 Densidad, humedad y rugosidad

Los valores de densidad y humedad de las chapas se determinaron según los procedimientos de las normas IRAM 9544 e IRAM 9532, respectivamente, descriptos en el anexo 7.1.

La rugosidad de las chapas a utilizar se midió mediante un perfilómetro portátil de Handsurf (Accretech, Japón) mostrado en la figura 2.1. Para ello, se tomaron medidas en nueve puntos equidistantes de la chapa de  $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ . Se determinó la rugosidad media ( $R_a$ ) definido como el valor medio aritmético de los valores absolutos de las distancias del perfil de rugosidad a la línea media dentro de la longitud de medición (Gadelmawla & Koura, 2002).



**Figura 2.1.** Perfilómetro portátil

#### 2.2.2 Análisis de la microestructura de las chapas de madera mediante SEM

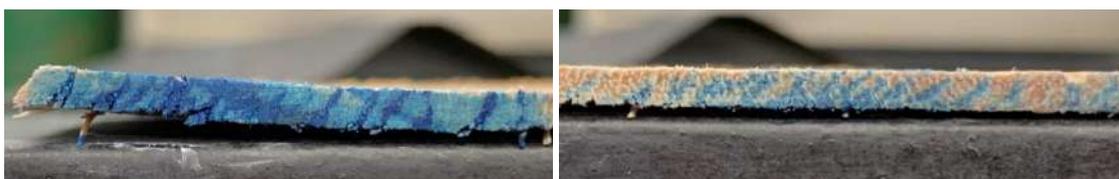
Se analizó la morfología del EG tanto en un corte transversal como tangencial utilizando un microscopio electrónico de barrido o SEM (Philips 505, Países Bajos) y operando a 20

kV. Previamente, las superficies se recubrieron con una lámina de oro de aproximadamente 100 Å de espesor con el fin de evitar que la muestra se cargue eléctricamente bajo el haz de electrones.

En el anexo 7.2 se resumen los detalles sobre la técnica utilizada.

### 2.3 Identificación de los *lathe checks*

Con el fin de reconocer la ubicación de los *lathe checks* en las chapas de madera, es decir el “lado apretado” o *tight side* y el “lado suelto” o *loose side*, se buscó un método de identificación. Consistió en utilizar una solución acuosa de colorante comercial de alimentos azul para pintar los bordes donde se debían revelar los defectos. Una vez seco, se lijó y se sopleteó para limpiar la superficie, logrando que los LC permanezcan de color azul debido a la penetración del colorante dentro de ellos, como se observa en la figura 2.2.



**Figura 2.2.** Bordes de chapas finas con *lathe checks* coloreados.

Una vez identificada la ubicación de los defectos, se procedió a marcar cada chapa de acuerdo a lo hallado con el fin de facilitar la posterior construcción de los tableros.

### 2.4 Acondicionamiento de chapas y tableros

Se cortaron las chapas de madera hasta un tamaño de 15 cm x 15 cm. Tanto éstas como los enchapados de eucalipto se conservaron durante 7 días en una cámara ambiental a  $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  y  $65\% \pm 5\%$  de humedad relativa, previo a la realización de cualquier ensayo.

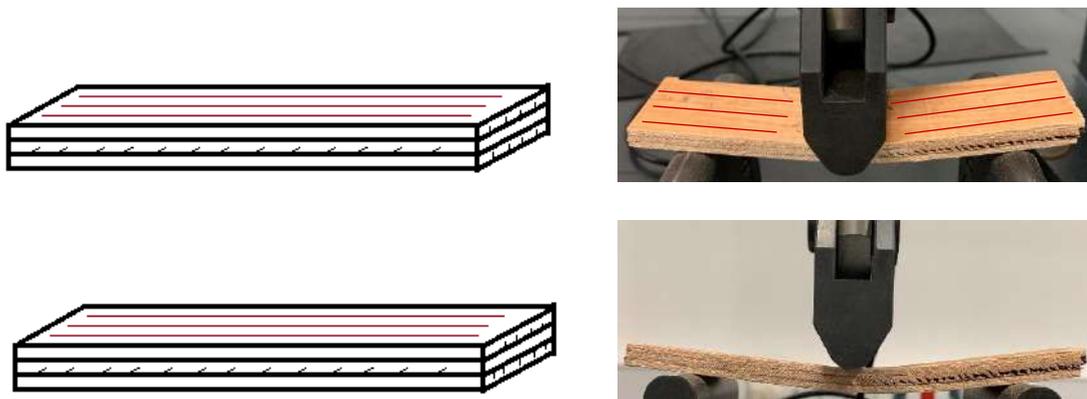
### 2.5 Construcción de los tableros

Se construyeron tableros contrachapados de tres chapas de eucalipto, previamente inspeccionadas y seleccionadas, las cuales se unieron mediante la aplicación manual del adhesivo. Se tuvo en cuenta la cantidad de adhesivo utilizada en la industria la cual corresponde a  $130\text{ g/m}^2$  de cada línea encolada (Acevedo Moraga, 2012; Rohumaa et al., 2013). En consecuencia, se esparció  $1,5 \pm 0,2\text{ g}$  de adhesivo en cada cara de la unión a pegar, siendo congruente con lo mencionado. Luego se prensaron en caliente en un

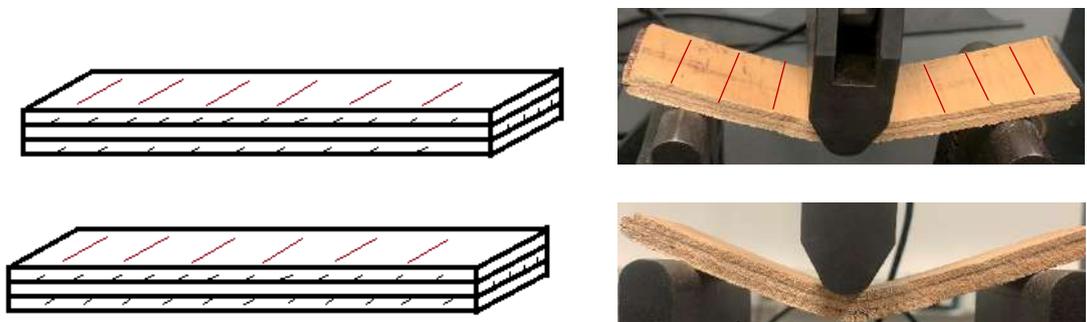
equipo E.M.S. (Buenos Aires, Argentina) durante 15 minutos a 150 °C y 1,5 MPa de presión. Esta última se eligió luego de pruebas preliminares para lograr una correcta unión y estabilidad del tablero, sin dañar por aplastamiento a las chapas de madera. Los valores obtenidos y utilizados coinciden con datos informados en bibliografía (Benedito Guimarães Júnior et al., 2009; Cihad Bal & Bektaş, 2014).

Se construyeron diferentes configuraciones de enchapados de acuerdo a la ubicación de los *lathe checks*, a ser ensayados en dirección longitudinal (L, Figura 2.3) y transversal (T, Figura 2.4) a la dirección de las fibras.

- Disposición 1 (D1): defectos sobre el borde inferior de las tres chapas apiladas.
- Disposición 2 (D2): defectos sobre cara encolada en chapas externas y en borde inferior en chapa interna.



**Figura 2.3.** Tableros con las fibras de sus chapas externas orientadas longitudinalmente a la sollicitación por flexión (marcadas en rojo): Esquema de DL1 (izquierda superior) y DL2 (izquierda inferior).



**Figura 2.4.** Tableros con las fibras de sus chapas externas orientadas transversalmente a la sollicitación por flexión (marcadas en rojo): Esquema de DT1 (izquierda superior) y DT2 (izquierda inferior).

Estas configuraciones fueron seleccionadas teniendo en cuenta la criticidad de los LC según su ubicación sobre las propiedades a la flexión de los contrachapados.

Se procedió a cortar los tableros con una sierra de mesa Skill 3610 (Campinas, Brasil) para obtener 4 probetas por enchapado.

Se obtuvieron lotes de probetas longitudinales y transversales (Figura 2.5) para poder evaluar la diferencia en resultados de acuerdo a la dirección del grano de la madera respecto a la carga aplicada.



**Figura 2.5.** Probetas a ensayar: D2 transversal y longitudinal; D1 transversal y longitudinal (de izquierda a derecha).

## 2.6 Determinación de densidad de los tableros

Se determinó la densidad de los tableros siguiendo la norma IRAM 9544 (1973). Para ello, se cortaron muestras de cada probeta ensayada a flexión (estacionada en cámara de humedad) y se determinó la masa de la muestra utilizando una balanza analítica (Ohaus,  $\pm 0.0001$ ). Para establecer el volumen de muestra, se midieron el largo, ancho y espesor con un calibre digital (Asimeto 307-06-4, Alemania, 0-150 mm  $\pm 0.01$  mm). Cada dimensión se obtuvo del promedio de tres mediciones.

## 2.7 Caracterización del adhesivo y morfología de la línea de encolado

Se midió el contenido de sólidos del adhesivo fenol-formaldehído a partir de la norma ASTM D 1582 – 98 (2004) con modificaciones. Se procedió a secar las muestras de aproximadamente 3,5 g en estufa a 70 °C durante 24 horas, para luego pesarlas en seco y realizar los cálculos correspondientes.

Por otra parte, se midió el tiempo de gelación ( $t_{GEL}$ ), definido como el tiempo para el cual el valor de la masa molar promedio en masa ( $M_w$ ) diverge. Para ello, se depositó la muestra en un tubo delgado, que posteriormente se sumergió en un baño calefactor de aceite de silicona a la temperatura deseada. Se colocó un alambre fino y se lo movió alternadamente hacia arriba y abajo. El tiempo de gelación se estableció como aquel para el cual el alambre pierde movilidad dentro de la masa reactiva y arrastra al tubo en su movimiento ascendente. Los tiempos de gelación se midieron a cuatro temperaturas (85 °C, 90 °C, 100 °C y 110 °C), seleccionadas a partir de pruebas exploratorias previas.

Con el fin de caracterizar morfológicamente la línea de encolado, se cortaron muestras de contrachapados de EG mediante un micrótopo, de manera tal que mostraran dos chapas de madera sucesivas y la línea de unión entre ellas. Las secciones se tiñeron con safranina (1% v/v) y se montaron en el portaobjetos del microscopio. Las imágenes digitales se tomaron con un microscopio óptico (Olympus CX31, Japón) conectado a una cámara digital (Infinity Lumenera, Canadá). Luego, fueron procesadas a través de un software específico (ImagePro, Media Cybernetics, USA) mediante el cual se midió el ancho de la unión adhesiva, resultante del promedio de 15 mediciones en distintos puntos de la imagen.

## 2.8 Ensayo de flexión

Las dimensiones de las probetas (largo, ancho y espesor) estabilizadas en cámara a 20°C y 65 % de humedad relativa fueron medidas con un calibre digital Modelo Asimeto 307-06-4, Alemania, 0-150 mm  $\pm$  0,01 mm. Los valores de ancho y espesor resultaron del promedio de tres mediciones.

El procedimiento para el ensayo de resistencia a la flexión en 3 puntos fue realizado siguiendo las bases descritas por la norma IRAM 9706:1994. Se utilizó la máquina de ensayos universales INSTRON EMIC 23-50 (Figura 2.6.a) con la configuración correspondiente al ensayo a realizar (Figura 2.6.b). Se centraron las probetas en relación al rodillo de carga y los de apoyo, asegurando una correcta alineación. Se fijó una distancia entre apoyos de 110 mm y se aplicó la carga con una velocidad de deformación de 2,5 mm/min hasta la rotura.



**Figura 2.6. (a)** Máquina de ensayo universal y **(b)** configuración correspondiente a un ensayo de flexión en 3 puntos.

Con los datos obtenidos de carga vs deflexión, se calcularon el módulo de ruptura (MOR) y el módulo de elasticidad (MOE) siguiendo las ecuaciones 1 y 2 respectivamente.

$$MOR = \frac{3PL}{2bt^2} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$MOE = \frac{L^3\Delta F}{4bt^3\Delta a} \quad \text{Ecuación 2}$$

Siendo P la carga máxima, en newton; L la distancia entre ejes de apoyos, en milímetros; b el ancho de la probeta, en milímetros; t el espesor de la probeta, en milímetros;  $\Delta F$  el incremento de la carga (N),  $\Delta a$  la deflexión (mm).

Además, con el fin de reducir el efecto causado por la diferencia de densidades entre distintos tableros sobre las propiedades a la flexión, se calculó el módulo de ruptura específico (SMOR) y el módulo de elasticidad específico (SMOE). Varios autores hicieron uso de propiedades específicas para incluir el efecto de la densidad sobre las propiedades de los tableros (Bal, 2012; Bao et al., 2001; Cihad Bal & Bektaş, 2014).

Los resultados obtenidos se analizaron estadísticamente a través de un análisis de varianza (ANOVA) unidireccional junto con el método de Tukey con un intervalo de

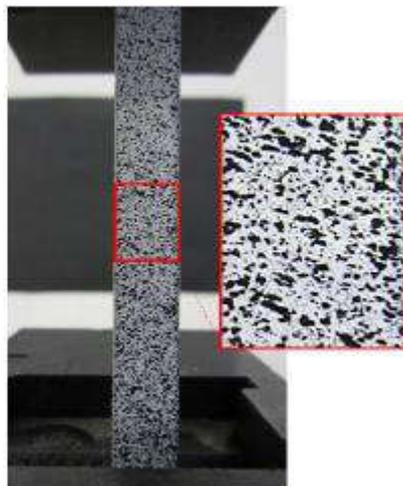
confianza del 95%, mediante el software Origin. Este análisis estadístico se basa en comparar la media de los grupos de valores de interés y determinar si existe alguna diferencia significativa entre ellas creando intervalos de confianza.

### 2.9 Análisis mediante la técnica *DIC*

Algunas muestras fueron ensayadas y analizadas mediante la técnica *DIC* (*Digital Image Correlation*) con el fin de realizar un análisis cualitativo de los resultados y facilitar la identificación de procesos de deformación y rotura.

*DIC* es una técnica que mide el campo completo de desplazamiento y deformación de una muestra sobre su superficie. Es de gran utilidad para analizar la respuesta de materiales a la aplicación de carga, estudiar el crecimiento de una fisura o validar resultados de ensayos. Utiliza una cámara digital capaz de registrar una gran cantidad de fotogramas por segundo. Esto permite mapear un patrón de puntos aplicados sobre la superficie y correlacionar la posición de los mismos en la imagen original y la deformada en función del contraste.

Previo al ensayo se prepararon las probetas: se lijaron a lo largo del espesor y se les aplicó un aerosol blanco sobre el cual se roció un patrón de puntos negros; a ser mapeado por el software del *DIC* para calcular las deformaciones (Figura 2.7) (Broughton, 2012)



**Figura 2.7.** Imagen representativa de muestra preparada para *DIC* (Gamboa et al., 2019)

Se utilizó una cámara digital monocromática de 6 megapíxeles la cual se dispuso frente a la máquina universal donde se realizaron los ensayos de flexión, asegurando un

correcto enfoque. Los análisis de desplazamiento se hicieron respecto a una imagen de referencia (probeta sin deformar), es decir, mediante un sistema de coordenadas Lagrangianas, el cual define gradientes en base a la configuración original (Correlated Solutions, 2022). Se seleccionó el criterio de Von Mises para analizar las deformaciones el cual utiliza las ecuaciones 3 y 4 para calcular la tensión equivalente y la deformación respectivamente (Shigley et al., 1990; Zhang et al., 2019). Al incorporar términos cuadráticos, no se diferencian deformaciones por compresión y tracción, resultando toda tensión y deformación positiva. Este criterio establece que solo la parte de la energía de deformación debida al cambio de forma determina la aparición de deformaciones plásticas. Por lo tanto, sirvió principalmente para un análisis cualitativo de la falla, ya que debe tenerse en cuenta que las deformaciones de Von Mises solo representan la componente desviadora de las tensiones, es decir, la máxima distorsión presente (Chapetti, 2005).

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3 \cdot \tau_{xy}^2} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\varepsilon_v = \frac{2}{3} \sqrt{\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{yy}^2 - \varepsilon_{xx} \varepsilon_{yy} + 3 \varepsilon_{xy}^2} \quad \text{Ecuación 4}$$

Siendo  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$  las tensiones principales en los ejes longitudinales x e y;  $\tau_{xy}$  la tensión de corte;  $\varepsilon_{xx}$  y  $\varepsilon_{yy}$  las componentes normales de la deformación;  $\varepsilon_{xy}$  la componente cortante de la deformación.

Una vez finalizados los ensayos, se procedió a procesar las imágenes y extraer videos mediante el software de DIC llamado Vic 2D provisto por *Correlated Solutions Company*. Se estableció una conexión temporal entre los datos de carga vs deflexión obtenidos del ensayo de flexión y los fotogramas captados por la cámara. De esta forma, se realizó un análisis de los modos de falla de las maderas, teniendo en cuenta los campos de deformación asociados.

### 2.9.1 Apertura de defectos

Además, con el fin de lograr un acercamiento al conocimiento del estado tensional causante de la apertura de los *lathe checks*, se identificó la ubicación del primer defecto que propaga en cada probeta a través de los videos obtenidos por DIC y su tiempo correspondiente. Luego, se buscó el nivel de carga aplicado en dicho instante, el cual se

asoció a la tensión de apertura del defecto mediante distintos criterios detallados junto a los resultados.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Caracterización de las maderas

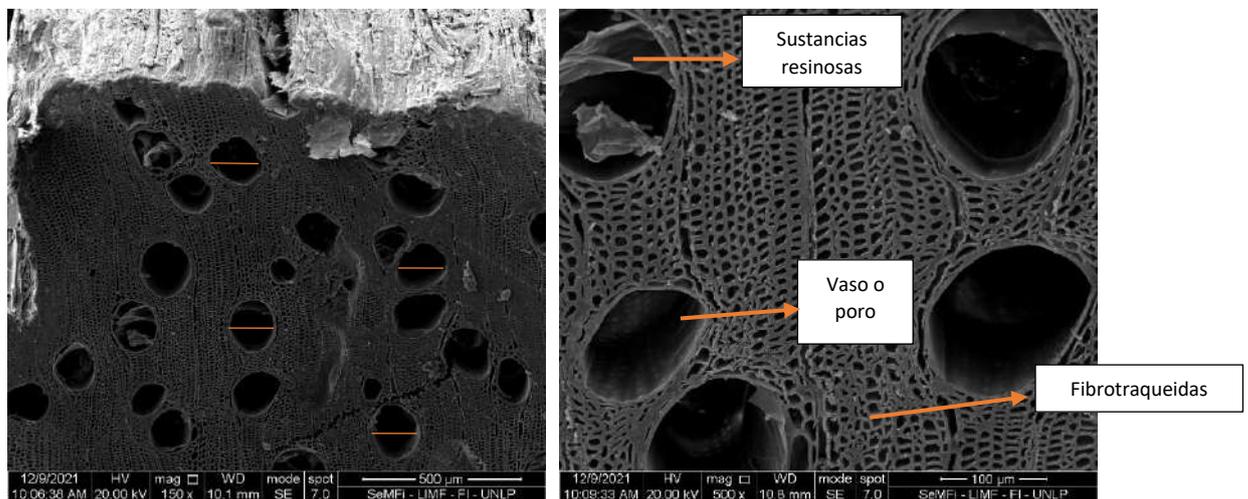
##### 3.1.1 Densidad, humedad y rugosidad

La densidad medida de las chapas de eucalipto estacionada (luego de estabilizada en cámara según el procedimiento informado) fue de  $0,51 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$  con un contenido de humedad de  $11,1 \pm 0,3\%$ . Los valores obtenidos de densidad fueron similares a lo reportado por otros autores para la misma especie. Por ejemplo, Bhat (2007) informó valores de densidad de  $0,497 \text{ g/cm}^3$  para *Eucalyptus Grandis* de 9 años de edad mientras que Kabir (1995) halló un valor de densidad de  $0,54 \text{ g/cm}^3$  para *Eucalyptus Camaldulensis* cortado a los 12 años, ambos valores con una humedad de aproximadamente 12%.

Por otra parte, los valores de rugosidad media (Ra) de la superficie de las chapas fueron de  $8 \pm 2 \mu\text{m}$ .

##### 3.1.2 Análisis de la microestructura

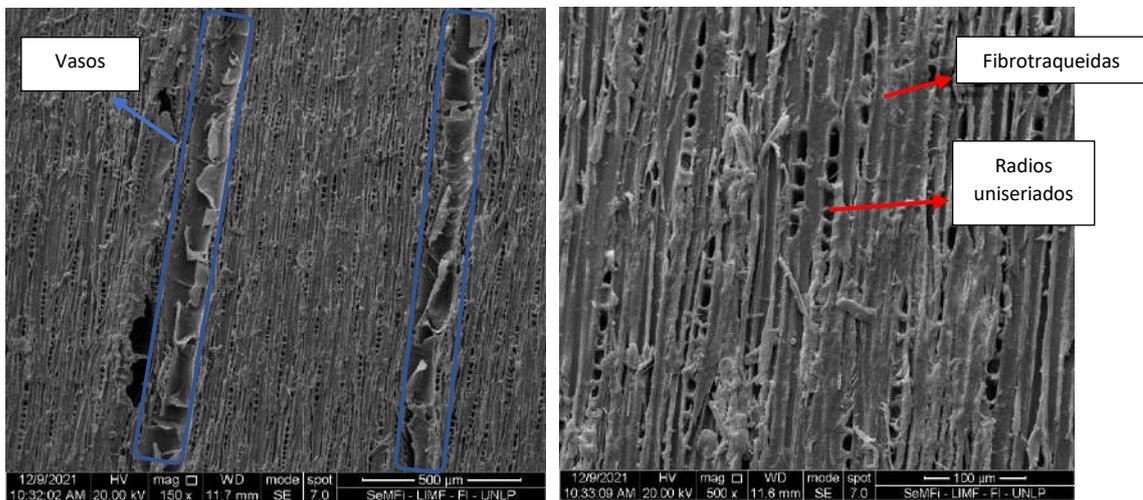
En las figuras 3.1 y 3.2 se muestran las imágenes del corte transversal y tangencial de muestras de eucalipto obtenidas por microscopía electrónica de barrido (SEM).



**Figura 3.1.** Imágenes SEM de corte transversal de muestra de eucalipto. Aumento 150x (izquierda) y 500x (derecha).

En la figura 3.1, es posible observar los vasos, células propias de las maderas duras, con una cavidad llamada lumen considerablemente mayor a la de las fibrotraqueidas (alrededor de  $140 \mu\text{m}$  de diámetro). Algunos de estos vasos contienen sustancias

resinosas en su interior debido a que pertenecen al duramen. Además, se observa porosidad difusa y elementos de vasos solitarios, característicos de la madera de eucalipto, embebidos en una matriz de fibras (Giménez & Moglia, 2005). La porosidad difusa hace referencia a una estructura de vasos de aproximadamente el mismo diámetro (marcado en naranja) a lo largo del anillo de crecimiento, lo que impide una clara distinción entre el leño temprano y tardío (J. A. Barotto, 2021; Rowell, 2005). También se verifica un arreglo diagonal de vasos dispuestos aproximadamente a 45 grados respecto a la sección de la chapa, característico de esta especie (J. A. Barotto, 2021; Monteoliva et al., 2015). Con respecto al tamaño de lumen de las fibrotraqueidas y grosor de la pared celular, se puede observar que no existe una transición demarcada entre el leño temprano y el leño tardío, característica propia de la especie.



**Figura 3.2.** Imágenes SEM de corte tangencial de muestra de eucalipto. Aumento 150x (izquierda) y 500x (derecha).

En la figura 3.2, que corresponde al corte tangencial, se observa la presencia de radios uniseriados; es decir, formados por una sola hilera de células. Además, se distinguen los vasos desde otra perspectiva, viendo como atraviesan longitudinalmente al tronco; forman parte del sistema axial encargándose de la conducción de agua y sustancias disueltas. También, se identifican las fibrotraqueidas cortadas longitudinalmente, expuestas como tubos.

### 3.2 Densidad de los tableros

Los resultados de densidad de los distintos tableros ensayados dieron un valor medio de  $0,62 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$ . Este valor fue mayor a la densidad de las chapas de eucalipto debido

a la incorporación de adhesivo y posibles densificaciones leves generadas durante el prensado (Kallakas et al., 2020).

### 3.3 Propiedades del adhesivo y morfología de la línea de encolado

Para el adhesivo fenólico utilizado se obtuvo un valor de contenido de sólidos del 53,8%, similar a lo informado en otros trabajos con el mismo tipo de adhesivo industrial (Leiva et al., 2007).

Se determinaron los valores de tiempo de gel ( $t_{GEL}$ ) experimentales según el procedimiento informado. El valor de  $t_{GEL}$  depende de la velocidad de reacción y por lo tanto de la temperatura (T). Esta dependencia se representa habitualmente con la expresión de Arrhenius (Ec. 5) (Altuna, 2011).

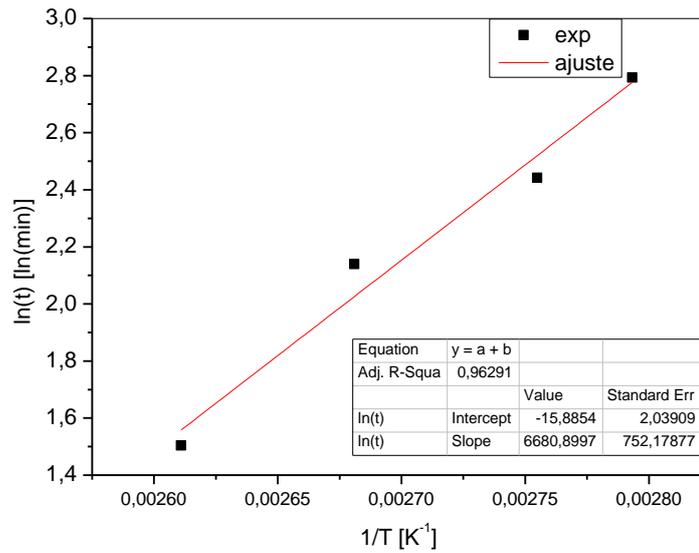
$$t_{GEL} = A \cdot e^{\frac{E_a}{R \cdot T}} \quad \text{Ecuación 5}$$

donde  $E_a$  es la energía de activación, A el factor pre-exponencial, y R la constante de los gases.

Si aplicamos ln a ambos miembros de la Ec. 5 obtenemos la siguiente expresión:

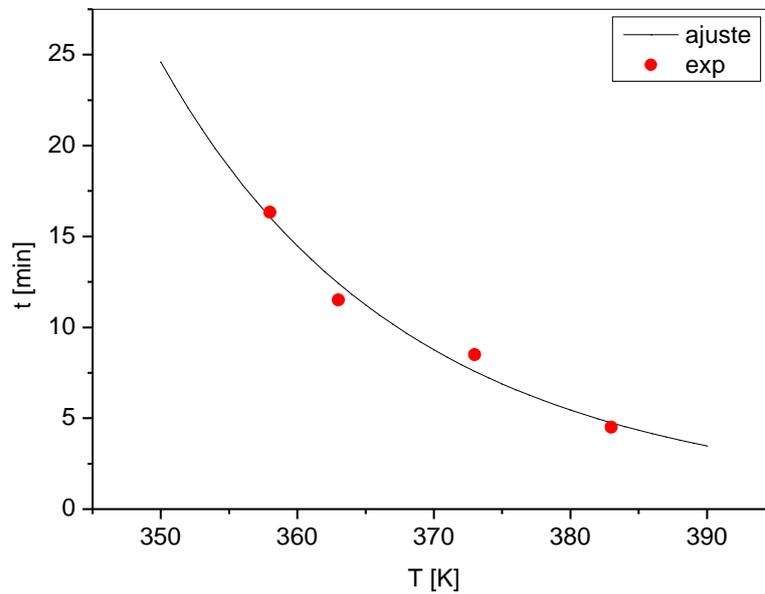
$$\ln(t_{GEL}) = \ln A + \frac{E_a}{R \cdot T} \quad \text{Ecuación 6}$$

Al graficar  $\ln(t_{GEL})$  [ln (min)] versus  $1/T$  [ $K^{-1}$ ] y ajustar los valores experimentales mediante una regresión lineal, se obtienen como parámetros de ajuste la ordenada al origen que corresponde al valor de  $\ln A$  y la pendiente que corresponde al valor de  $E_a/R$ . El valor y las unidades de  $E_a$  dependen del valor de R utilizado. En este caso se utilizó un valor R igual a 8,314 J/mol. Los datos de  $t_{GEL}$  medidos experimentalmente se ajustaron mediante la Ec. 6, como se observa en la figura 3.3, obteniéndose los valores de los parámetros A ( $1,27 \times 10^{-7}$  min) y  $E_a$  (55,5 kJ/mol).



**Figura 3.3.** Ajuste de los parámetros de gelación

La curva obtenida a partir de los parámetros calculados se muestra en la Figura 3.4 junto con los puntos experimentales.



**Figura 3.4.** Tiempo de gelación en función de la temperatura.

El tiempo de gelación del adhesivo es un factor importante a tener en cuenta durante la impregnación y posterior prensado en caliente de los tableros. Cuando el sistema gela, el adhesivo deja de fluir. Por lo tanto, el grado de penetración del adhesivo en la madera

y la calidad de la unión encolada estará supeditado a cuando ocurre este proceso. Para la temperatura de prensado elegida (150 °C), en base a la experiencia previa del grupo y lo informado por la industria, el  $t_{GEL}$  estimado de curado isotérmico sería de aproximadamente 1 min. Sin embargo, el  $t_{GEL}$  en condiciones reales de operación, donde la muestra es colocada a temperatura ambiente en el molde, es mayor que el  $t_{GEL}$  del curado estrictamente isotérmico a 150 °C. En función de la experiencia previa y pruebas preliminares, procesando a 150 °C durante 15 min el grado de penetración del adhesivo fue el adecuado, fluyendo lo suficiente sin que ocurra una sobrepenetración, lo que podría debilitar la unión encolada (Stefani et al., 2008). En la figura 3.5, se muestra una imagen obtenida por microscopía óptica de una sección de la línea de encolado representativa de la muestra. Se observa en el lumen de las fibras (orientadas perpendicularmente a la imagen) que el adhesivo penetró las primeras tres a cuatro líneas de fibras asegurando una adecuada interacción del adhesivo en la microestructura de la madera. A su vez, se observa una línea de encolado consolidada de adhesivo de aproximadamente 20  $\mu\text{m}$  de ancho, medido mediante el software ImagePro (Media Cybernetics, USA), lo que a priori asegura un correcto comportamiento de la unión encolada.



**Figura 3.5.** Imagen de la línea de encolado obtenida con microscopía óptica. Aumento de 20X

### 3.4 Propiedades a la flexión de los tableros

A partir de los datos de carga vs. deflexión procedentes de los ensayos de flexión en 3 puntos junto a la densidad registrada para cada probeta, se obtuvieron los valores de MOR y MOE específicos (SMOR y SMOE) para cada una de ellas y un promedio de dichos resultados para las distintas configuraciones de contrachapados ensayados (Tabla 1). Los resultados obtenidos de MOE y MOR, se encuentran en el rango de valores informados para tableros de distintas especies de eucalipto. Por ejemplo, Iwakiri et al. (2013) informó valores de MOE de 12251 MPa y MOR de 91,29 MPa para tableros compuestos por cinco chapas de EG de 21 años de edad y resina fenol formaldehído como adhesivo, ensayados a flexión paralela a la fibra (configuración DL, en este caso). Valores similares fueron obtenidos por Iwakiri et al. (2007) para especies de 15 años. Para tableros ensayados en la dirección perpendicular a la fibra (configuración DT), Iwakiri halló valores de MOE de 3801 MPa y MOR de 46,14 MPa. Estos resultan superiores a los obtenidos en el presente trabajo, lo cual se debe a la cantidad de chapas que componen al tablero. En el caso estudiado, los tableros están constituidos por tres chapas, donde solo la chapa central está orientada favorablemente para soportar esfuerzos de flexión. En cambio, cuanto mayor sea el número de chapas en el contrachapado, habrá mayor cantidad de chapas orientadas favorablemente a la sollicitación de esfuerzos y mejor será la respuesta obtenida a la flexión aun en la configuración DT.

**Tabla 1.** Valores de MOE, MOR, SMOE y SMOR obtenidos mediante ensayo de flexión. Medidas seguidas por la misma letra en la misma columna, no difieren significativamente entre sí de acuerdo a la prueba de Tukey con un nivel de significancia del 5%.

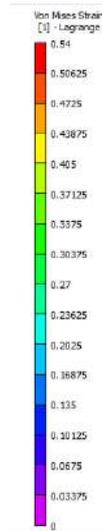
| Disposición | MOE (MPa)      | MOR (MPa)  | Densidad ( $\frac{g}{cm^3}$ ) | SMOE ( $\frac{MPa}{\frac{g}{cm^3}}$ ) | SMOR ( $\frac{MPa}{\frac{g}{cm^3}}$ ) |
|-------------|----------------|------------|-------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| D1L         | 10511,8±636,2  | 70,2 ± 4,1 | 0,62 ± 0,09                   | 14386,1 ± 1158,7 A                    | 104,8 ± 13,6 A                        |
| D2L         | 9140,5 ± 759,0 | 64,6 ± 7,3 | 0,62 ± 0,03                   | 14733,3 ± 920,3 A                     | 104,1 ± 12,6 A                        |
| D1T         | 657,9 ± 32,4   | 19,1 ± 1,3 | 0,61 ± 0,02                   | 1044,8 ± 44,9 B                       | 31,0 ± 2,6 B                          |
| D2T         | 832,6 ± 111,8  | 21,0 ± 3,0 | 0,63 ± 0,01                   | 1301,2 ± 135,8 C                      | 32,8 ± 3,4 B                          |

En cuanto a los valores de módulo de elasticidad específico (SMOE), se obtuvieron diferencias significativas mediante el análisis ANOVA solo para las disposiciones ensayadas transversalmente (D1T y D2T). En estos casos, se determinó un menor valor de módulo para la disposición D1. Dicha configuración posee los LC de la chapa traccionada en el borde inferior disminuyendo el espesor real del tablero. En consecuencia, disminuye también el módulo aparente medido, calculado con un espesor nominal mayor al real (Buchelt et al., 2018). Por el contrario, no se obtuvieron diferencias significativas mediante el análisis ANOVA para los tableros ensayados con sus fibras orientadas longitudinalmente. Dado que los defectos no afectan la rigidez del tablero en este caso, es esperable que los valores de módulo específico no difieran ya que esta propiedad es intrínseca del material (García Romero & Monasterio Guisasola, 2018).

En el caso de los valores obtenidos de módulo de ruptura específico (SMOR), no se observó ninguna tendencia clara respecto a diferencias de valores asociadas a las distintas ubicaciones de los LC en las chapas constituyentes de los tableros. No se obtuvieron diferencias significativas ( $p > 0,05$ ) mediante el análisis estadístico ANOVA realizado entre grupos ensayados en la misma dirección. Por lo contrario, se observó una diferencia significativa ( $p < 0,05$ ) en dichos valores según si los tableros fueron ensayados con las fibras de las chapas externas orientadas longitudinal o transversalmente a la carga. Esto resulta consistente con la anisotropía característica de la madera, la cual marca una gran diferencia en la resistencia mecánica de acuerdo a la dirección del grano. En el caso de los tableros transversales, solo la chapa interna orientada longitudinalmente está direccionada de forma preferencial para resistir un esfuerzo mayor.

### 3.5 Análisis mediante resultados del DIC

A partir de la utilización de la técnica conocida como DIC, se obtuvieron diversos videos en los cuales se visualizan las deformaciones de Von Mises sobre las probetas durante el ensayo a flexión. Las mismas se distinguen gracias a una escala cromática como la mostrada en la figura 3.6, donde se observan valores siempre positivos (deformaciones equivalentes de Von Mises) desde deformaciones nulas en color violeta hasta las máximas distorsiones en color rojo.

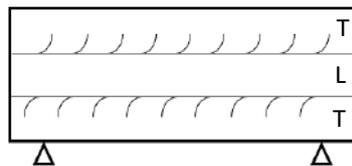


**Figura 3.6.** Ejemplo de escala de deformaciones de Von Mises registrada por la técnica *DIC*.

Al realizar una unión temporal entre los resultados de los ensayos de flexión y los fotogramas registrados por la técnica de *DIC*, se obtuvo una correspondencia entre puntos críticos de las curvas carga vs deflexión y procesos de deformación o ruptura observados en las chapas. Esto resultó de gran ayuda para detectar modos de falla sobre los distintos tableros.

A continuación, se realiza un análisis integral de modos de falla sobre las distintas configuraciones de tableros ensayadas.

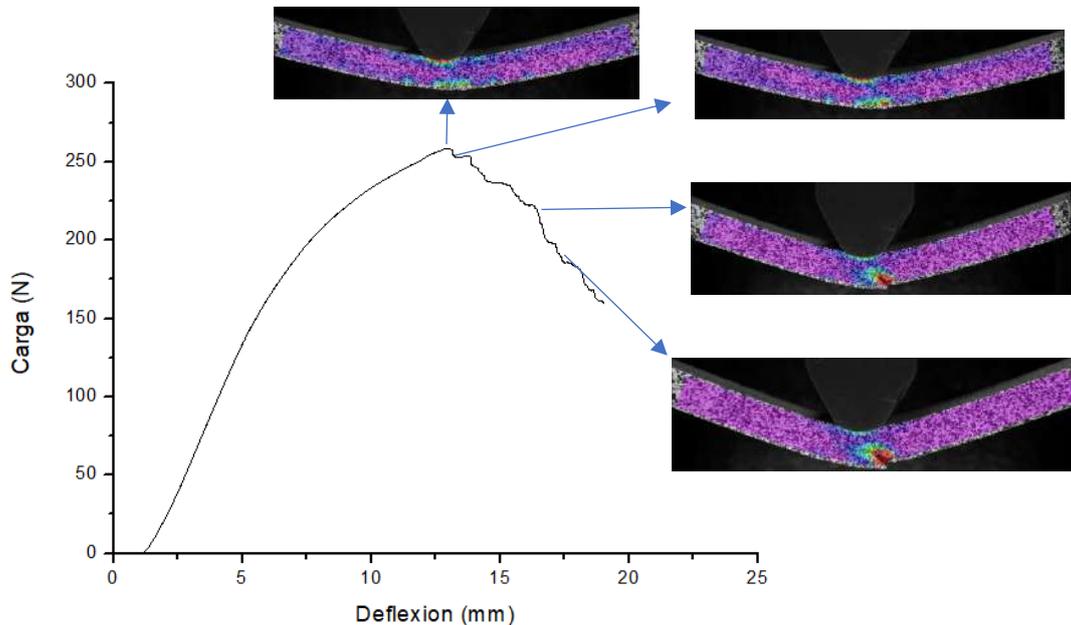
1. Análisis probeta con disposición D2 ensayada con fibras externas orientadas transversalmente:



En la figura 3.7, se observan los puntos críticos de la curva carga vs deflexión de las probetas con disposición D2 ensayadas con sus chapas externas orientadas transversalmente. La primera caída de la carga se presenta al iniciar la fisura en la chapa inferior. A medida que se abre y propaga, continúa cayendo la carga lo cual indica una reducción de la rigidez (Susainathan et al., 2017).

Por su parte, gracias a las imágenes obtenidas por *DIC* se puede ver como en un comienzo la deformación se concentra en las chapas superior e inferior, es decir,

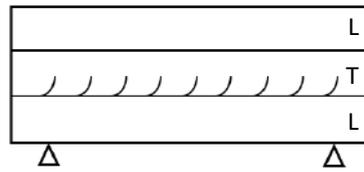
aquellas orientadas transversalmente. Esto es acorde a lo esperado, ya que la madera es considerablemente menos rígida en dicha dirección y, en consecuencia, concentra la mayor distorsión. Luego, la deformación se incrementa en la zona sometida a mayores tensiones de tracción (originadas por la flexión), donde finalmente rompe.



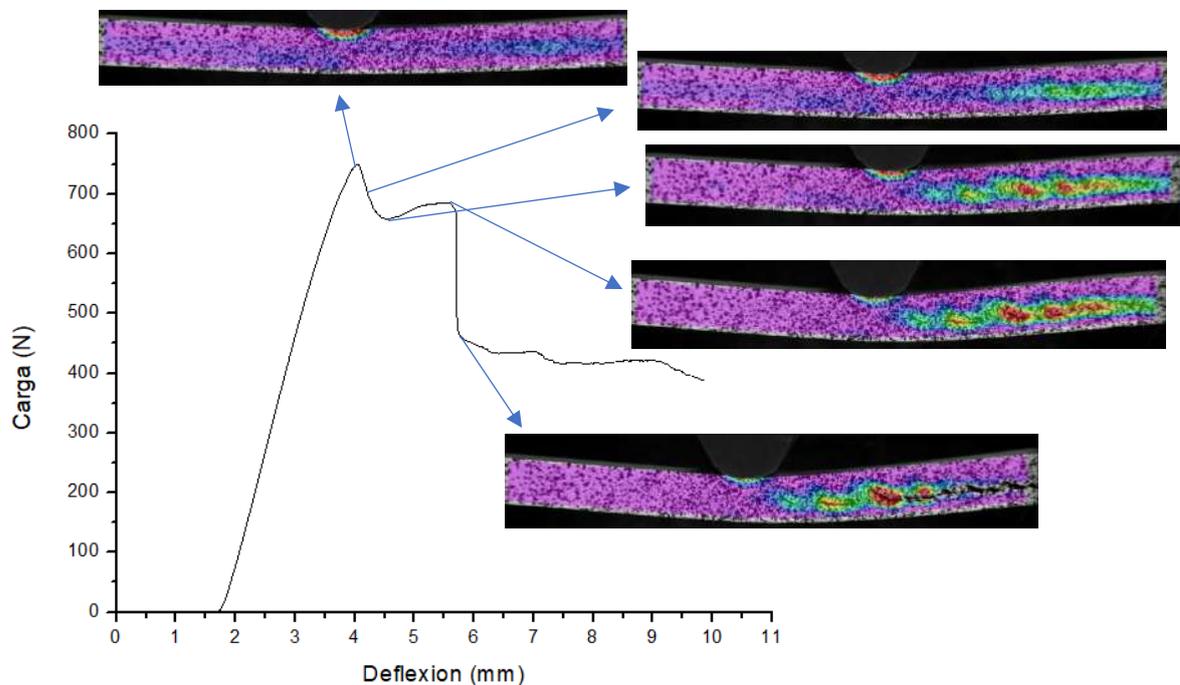
**Figura 3.7.** Curva de carga vs deflexión con fotogramas obtenidos por *DIC* correspondiente a probetas con disposición D2 transversal.

En cuanto al modo de falla, se observó rotura de la chapa inferior aproximadamente en el centro de la misma. La falla por flexión suele ser inducida en la longitud media del lado de la muestra sometida a tracción, donde el momento flector y la carga resultan máximos, como se describirá posteriormente en el análisis de la apertura inicial de los defectos (Yoshihara, 2011). La fisura propagó hasta alcanzar la chapa central donde finalmente rompió reduciéndose considerablemente la carga. En este caso, la fisura se observó levemente desplazada hacia un lateral, posiblemente debido a la preexistencia de un *lathe check* profundo que debilitó la sección.

2. Análisis probeta con disposición D2 ensayada con fibras externas orientadas longitudinalmente:



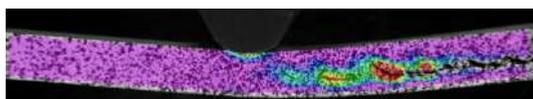
En la figura 3.8, se observan los puntos críticos de la curva carga vs deflexión de las probetas con disposición D2 ensayadas con sus chapas externas orientadas longitudinalmente. En el pico más alto de carga se distinguen las tres chapas que conforman el tablero, donde la central concentra más deformación por ser aquella orientada transversalmente y en consecuencia tener menor rigidez. A partir de dicho punto, comienza a disminuir el valor de carga como consecuencia de la concentración de deformaciones en la zona derecha donde abre la primera fisura (primera caída de la curva) a una deflexión de aproximadamente 4,5 mm. Luego, comienza a elevarse la carga levemente hasta producirse una disminución abrupta como consecuencia de la rotura total de la madera central.



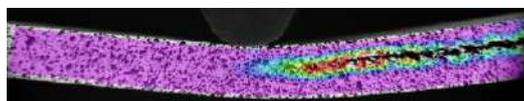
**Figura 3.8.** Curva de carga vs deflexión con fotogramas obtenidos por *DIC* correspondiente a probetas con disposición D2 longitudinal.

En cuanto al modo de falla, se observó rotura de la madera en la placa central de tipo serrucho asociado posiblemente a la presencia de esfuerzos normales a los defectos orientados en un plano a  $45^\circ$ , explicado a continuación en la sección “Apertura de defectos”. Además, en algunos casos se combinó con un pequeño porcentaje de delaminación, probablemente fruto de una pobre unión adhesiva. Dicho resultado fue esperable debido a ser, la chapa central, la zona más débil por estar ubicada transversalmente a la carga. Este modo de falla, tipo serrucho, sobre la chapa transversal se observó en otros trabajos previos (Nicolao et al., 2022; Yoshihara, 2011).

Por otro lado, se ensayaron algunas muestras D2L al revés, de modo tal que los *lathe checks* de la chapa central se encuentren en el borde superior. Al realizar la comparación entre ambos ensayos, se observó una clara diferencia en la forma del serrucho en base a la ubicación de los defectos. En la figura 3.9, se muestra una imagen obtenida por *DIC* del tablero con los *LC* de la chapa central ubicados en el borde inferior de la misma. En la figura 3.10, se muestra una imagen de una probeta cuyos *LC* internos se encuentran en la parte superior. De esta manera, se identifica una correlación entre el modo de falla y la ubicación de los defectos, los cuales actuarían como iniciadores y a su vez como camino para la ruptura de la madera. Se debe tener en cuenta que estos defectos provocan un debilitamiento de la madera.



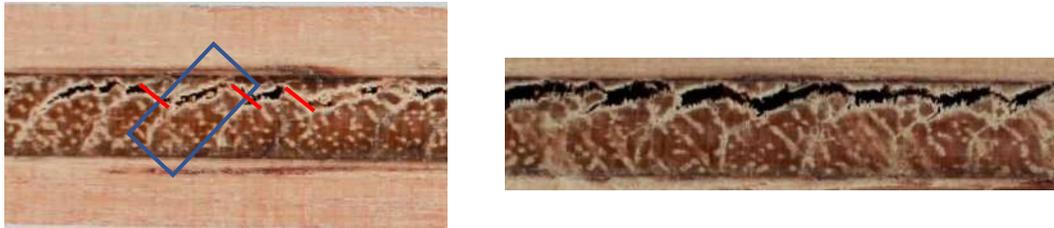
**Figura 3.9.** Imagen de *DIC* de probeta con configuración D2 longitudinal y *LC* de chapa central en borde inferior.



**Figura 3.10.** Imagen de *DIC* de probeta con configuración D2 longitudinal y *LC* de chapa central en borde superior.

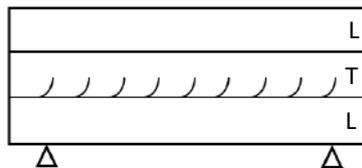
Sin embargo, el perfil aserrado no solo se debe a la presencia y orientación de los *LC*, sino también al arreglo diagonal de vasos orientados aproximadamente a  $45^\circ$  respecto de la carga y descrito anteriormente en el análisis SEM de la microestructura. Esto se ve en las imágenes de la figura 3.11, donde se identifican los *LC* iniciando desde el borde

superior y propagando en diagonal, y los vasos (puntos blancos) ubicados en la diagonal cruzada. Estos elementos que conforman la microestructura de la madera actúan como zonas débiles y consecuentemente puntos de falla durante la carga del tablero (Buchelt et al., 2018), provocando la rotura de los ligamentos remanentes entre LC (líneas rojas).

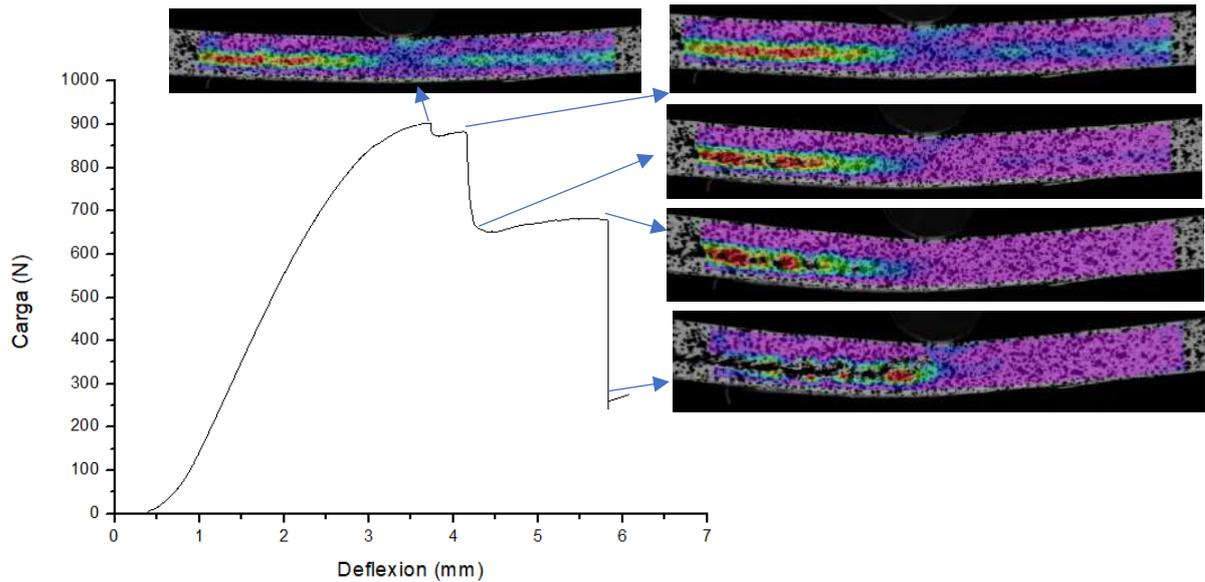


**Figura 3.11.** Imágenes macroscópicas aumentadas del perfil de fractura aserrado. LC recuadrado en azul a modo de ejemplo.

3. Análisis probeta con disposición D1 ensayada con fibras externas orientadas longitudinalmente:



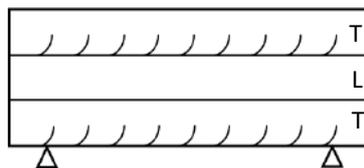
En la figura 3.12, se observan los puntos críticos de la curva carga vs deflexión de las probetas con disposición D1 ensayadas con sus chapas externas orientadas longitudinalmente. Los resultados siguieron el mismo patrón que la disposición D2L, explicada anteriormente.



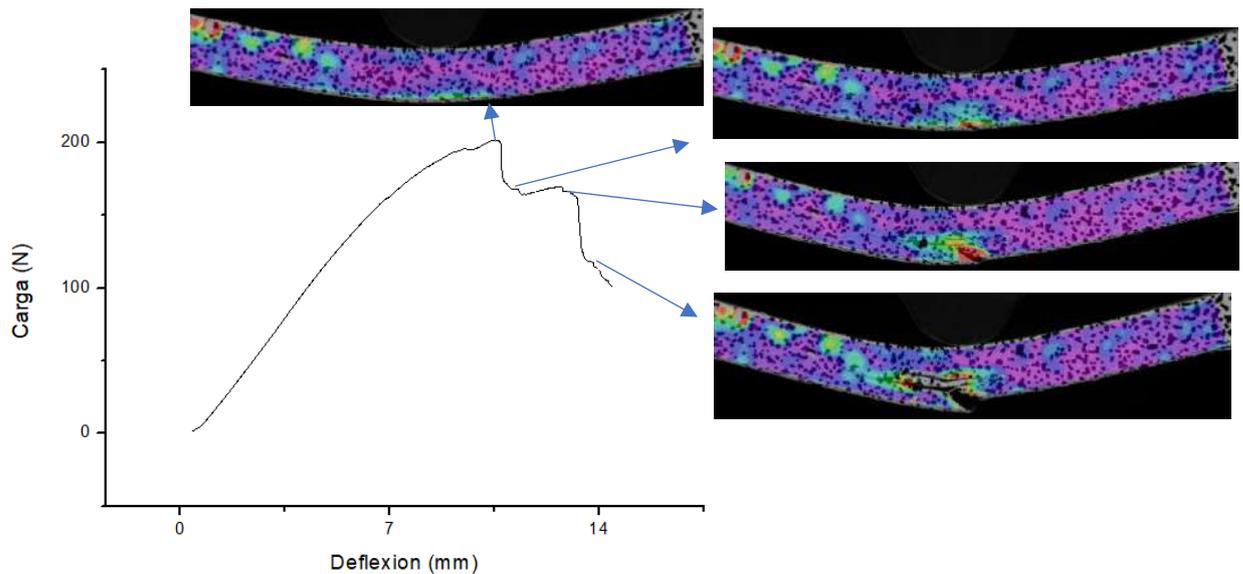
**Figura 3.12.** Curva de carga vs deflexión con fotogramas obtenidos por DIC correspondiente a probetas con disposición D1 longitudinal.

En cuanto al modo de falla, se observó rotura de la madera en la chapa central con un perfil aserrado. Esto coincide con el modo de falla de las probetas con disposición D2L, es decir, aquellas donde las chapas externas también tienen sus fibras orientadas longitudinalmente a la carga. La única diferencia entre ambas disposiciones es la ubicación de los LC en dichas chapas. Sin embargo, no se observa una diferencia en la rotura entre ambas disposiciones ya que la zona más débil, chapa interna, no presenta distintas orientaciones de los LC; en ambos casos se encuentran sobre el borde inferior.

4. Análisis probeta con disposición D1 ensayada con fibras externas orientadas transversalmente:



En la figura 3.13, se observan los puntos críticos de la curva carga vs deflexión de las probetas con disposición D1 ensayadas con sus chapas externas orientadas transversalmente. Pueden identificarse las caídas de carga producto de la apertura de una fisura aproximadamente en la longitud media de la chapa inferior.



**Figura 3.13.** Curva de carga vs deflexión con fotogramas obtenidos por DIC correspondiente a probetas con disposición D1 transversal.

En cuanto al modo de falla, se observó rotura de la chapa inferior en la zona central de la misma producto del despegue de fibras de la madera; coincidente con el modo de falla de las probetas con disposición D2T. En principio, esto indicaría que la ubicación de los *LC* no influye en la rotura, sino que simplemente es generada por los grandes esfuerzos de tracción impuestos en la zona media debido a la flexión. Esto sería así, ya que el modo de falla coincide en ambas disposiciones (D1T y D2T) independientemente de la orientación de los defectos, ya sea en el borde inferior o superior de la chapa traccionada. Además, en algunas probetas se produjo un pequeño porcentaje de delaminación.

### 3.5.1 Apertura de defectos

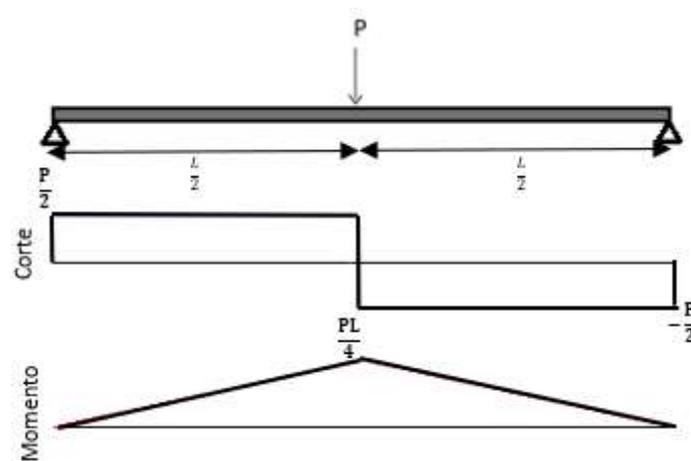
En búsqueda de obtener una primera aproximación acerca de los estados tensionales causantes de la apertura de los *lathe checks*, se propusieron las siguientes hipótesis simplificativas:

- Tablero continuo deformado dentro del régimen elástico.
- Fibra central del tablero neutra, es decir, aquella que no se modifica durante la flexión y separa la zona traccionada de la comprimida.

- Las secciones inicialmente planas se mantienen planas luego de la deformación (hipótesis de Bernoulli, utilizada en el análisis de tensiones y deformaciones desarrolladas por la acción de momentos flectores).

A pesar de ser hipótesis muy simplificadas, se utilizaron con el fin de obtener valores iniciales que permitieran realizar un primer análisis para en un futuro modelar el caso real.

Al estar la muestra ensayada a flexión en tres puntos, se encuentra sometida a flexión simple, donde el momento flector varía a lo largo del eje del componente debido a la presencia de esfuerzos de corte (Chapetti, 2005). En la figura 3.14, se muestra esquemáticamente los diagramas de corte y momento presentes en el caso de vigas homogéneas.



**Figura 3.14.** Diagramas de esfuerzo de corte y momento flector sobre muestra sometida a flexión en 3 puntos (Hein & Brancheriau, 2018).

A partir de los videos obtenidos por la técnica *DIC*, se identificó la ubicación y el tiempo de inicio de apertura de los *lath checks* en las distintas probetas ensayadas junto a la carga asociada a ese instante.

En el caso de las probetas con sus chapas externas orientadas transversalmente (configuración DT), en las cuales la rotura se da como se observa en la figura 3.15, se calculó la tensión normal al momento de apertura del primer defecto mediante la siguiente ecuación, conocida como Ley de Navier, utilizada para calcular tensiones normales impuestas por flexión.

$$\sigma_{xx} = \frac{M_z}{I_{zz}} \cdot y \quad \text{Ecuación 7}$$

Siendo  $M_z$  el momento flector en la posición de apertura del defecto (calculado con la carga identificada al momento de apertura del primer defecto);  $I_{zz}$  el momento de inercia respecto al eje z; y la distancia del defecto al eje neutro.



**Figura 3.15.** Probeta ensayada con disposición transversal (DT).

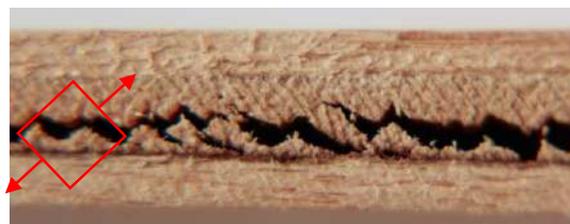
Se consideró la distancia del defecto al eje neutro como la mitad del espesor de la probeta, ya que el mismo comienza a abrir en el borde inferior de la chapa.

Dicha fórmula se desarrolló bajo el supuesto de flexión pura. Sin embargo, para propósitos de ingeniería, la fórmula de la flexión es válida, sin que importe si una fuerza cortante está presente o ausente (Shigley et al., 1990).

Por otra parte, para las probetas con sus chapas externas orientadas longitudinalmente (configuración DL), cuya ruptura fue tipo serrucho como se muestra en la Figura 3.16, se calculó la tensión de corte mediante la siguiente ecuación, conocida como fórmula de Colignon.

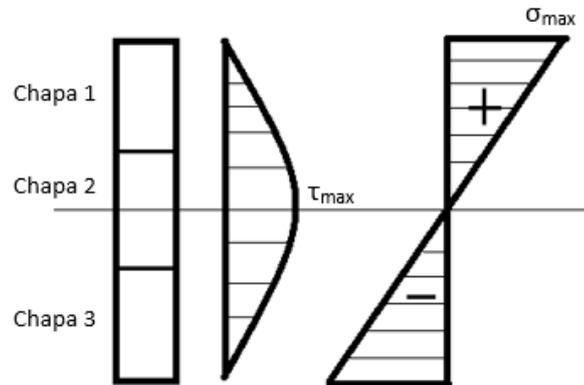
$$\tau_{xy} = \frac{Q_y \cdot S}{I_{zz} \cdot b} \quad \text{Ecuación 8}$$

Siendo  $Q_y = \frac{P}{2}$ , la fuerza cortante a la carga de apertura identificada (P); S el momento estático del área por encima de la ubicación del defecto, definido por la ecuación  $S = \frac{b}{2} \cdot (\frac{h^2}{4} - y^2)$ ;  $I_{zz}$  el momento de inercia respecto al eje z; b el ancho de la muestra.



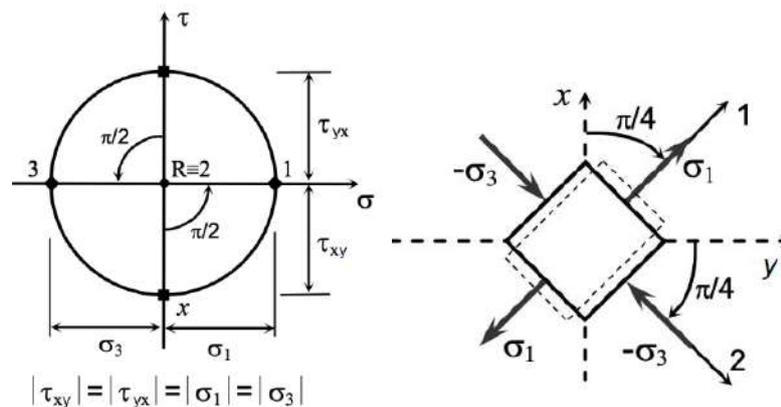
**Figura 3.16.** Probeta ensayada con disposición DL

Para efectuar dicho cálculo, se consideró un estado de corte puro, ya que los defectos se ubican en la chapa central aproximadamente a la mitad del espesor de la probeta. Allí las tensiones de corte son máximas como se esquematiza en la figura 3.17.



**Figura 3.17.** Distribuciones de tensiones a lo largo del espesor para una viga homogénea: corte (izquierda) y normal (derecha).

La tensión de corte en el centro del tablero ( $\tau_{xy}$ ), además de ser máxima, resulta igual a la tensión normal ( $\sigma_1$ ) en un plano a  $45^\circ$  ( $90^\circ$  en el círculo de Mohr), como se observa en la Figura 3.18. Este ángulo coincide aproximadamente con aquel en el que abren los *lath checks*, como puede verse en la figura 3.16. Por este motivo, se consideró a la tensión normal impuesta sobre los defectos, al momento de apertura, igual a la tensión de corte máxima calculada.



**Figura 3.18.** Círculo de Mohr y cubo elemental de plano a  $45^\circ$  para estado tensional de corte puro.

Al realizar los cálculos correspondientes (Ecuaciones 7 y 8), se obtuvieron los valores de tensión normal sobre los defectos al primer instante de apertura, expuestos en la tabla 2.

**Tabla 2.** Tensiones normales de apertura del primer defecto para distintas configuraciones del tablero.

| Configuración | $\sigma_{xx}$ (MPa) |
|---------------|---------------------|
| D1T           | 2,26                |
| D2T           | 2,52                |
| D1L           | 2,58                |
| D2L           | 2,23                |

Al evaluar dichos resultados y a pesar de las hipótesis muy simplificadas utilizadas para los cálculos, se identificó que en ambas configuraciones de tableros (transversal y longitudinal) las primeras fisuras en abrir se encontraron sometidas a tensiones normales muy similares. Para el caso de tableros transversales (DT), se observó rotura de la chapa inferior por la presencia de esfuerzos normales máximos producidos por la flexión. Podría suponerse entonces, que para el caso de tableros longitudinales (DL), la falla tipo serrucho también iniciaría debido a tensiones normales al *lathe check* (orientado a 45°).

Además, en componentes sometidos a flexión simple, se generan esfuerzos de corte positivos o negativos de acuerdo a la posición a lo largo del material (Figura 3.19.a). Estos estados tensionales generan distintas orientaciones de las tensiones normales de tracción en un plano a 45°. Por ejemplo, al rotar 45° en sentido horario (movimiento asociado a un estado tensional de corte negativo) las tensiones normales de tracción ( $\sigma_1$ ) resultan como en la figura 3.19.b. Por su parte, para un estado de corte positivo, la ubicación de las tensiones de tracción y compresión ( $\sigma_3$ ) se intercambian.

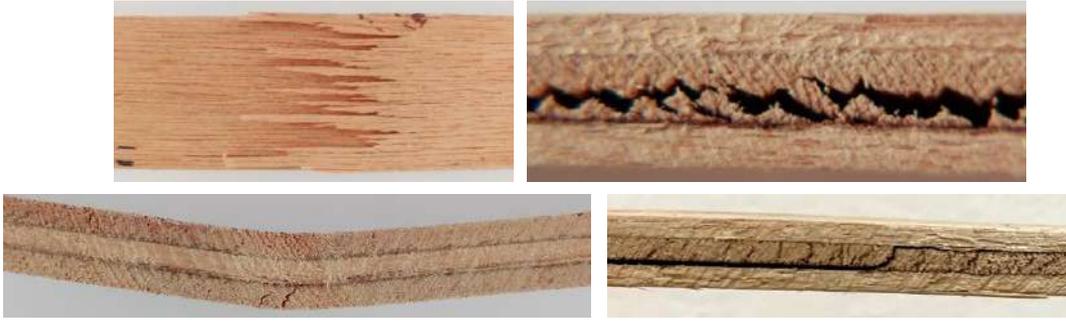


### 3.6 Sumario de modos de fallas de tableros sometidos a flexión

Existen distintos modos de falla en los enchapados sometidos a flexión los cuales dependen de diversos factores como la orientación de las chapas, la ubicación de *lathe checks*, la presencia de defectos o zonas debilitadas y la penetración de adhesivo.

Teniendo en cuenta lo mencionado, los modos de falla observados y mostrados en la Figura 3.22 son:

- 1- Fractura de fibras/fibrillas de la madera: se presenta en chapas orientadas longitudinalmente y sometidas a elevadas tensiones de tracción (Susainathan et al., 2017). En algunos casos, se genera el despegue de las fibras ocasionando la rotura de la madera a lo largo del espesor aproximadamente en la longitud media de la chapa donde las tensiones de tracción inducidas por flexión resultan máximas.
- 2- Rotura tipo serrucho: se observa en chapas orientadas transversalmente a la carga; en el caso particular estudiado de tableros de tres chapas, las mismas componen el núcleo del enchapado. Este modo de falla se presenta por una combinación de zonas débiles: *lathe checks* orientados a 45 grados y células vasales propias de la microestructura orientadas de forma cruzada.
- 3- Rotura por línea de encolado (delaminación): se presenta en aquellos casos donde la unión del adhesivo resulta débil por lo que se despegan las chapas previo a la rotura de la madera. Esto puede producirse debido a escasa penetración del adhesivo en la madera (Rowell, 2005). Por otra parte, la presencia de *LC* en las chapas afecta la resistencia y calidad de la unión. En algunos casos, se requiere mayor cantidad de adhesivo debido a la degradación de la superficie topográfica de las chapas. En consecuencia, la mayor frecuencia de *LC* resulta en una mayor incidencia de delaminación (Darmawan et al., 2015).



**Figura 3.22.** Modos de falla: fractura y despegue de fibras (superior e inferior izquierda), rotura tipo serrucho (superior derecha) y delaminación (inferior derecha).

## 4. EVALUACIÓN ECONÓMICA

### 4.1 Tableros con orientación específica de defectos

Con el fin de analizar la variación del costo asociado a la construcción de tableros con una orientación específica de los *lathe checks*, se consultó el valor actual de enchapados de eucalipto con adhesivo a base de resina fenólica a empresas nacionales, especificado en la tabla 3.

**Tabla 3.** Costos asociados a la producción de tableros con adhesivo fenólico por m<sup>3</sup>.

| <b>Costo del tablero/m<sup>3</sup>: USD 481,25</b> |                                       |                                   |
|--|---------------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Componente</b>                                  | <b>Porcentaje del valor total (%)</b> | <b>Precio (USD/m<sup>3</sup>)</b> |
| <b>Madera</b>                                      | 18 - 22                               | 86,6 – 105,9                      |
| <b>Adhesivo fenólico</b>                           | 20 - 24                               | 96,3 – 115,5                      |
| <b>Mano de obra</b>                                | 29 – 37                               | 139,6 – 178,1                     |
| <b>Otros</b>                                       | 25                                    | 120,3                             |

*Medidas del tablero: 2 x 2,4 x 0,016 m<sup>3</sup> → aproximadamente 13 tableros por m<sup>3</sup>*

Los resultados obtenidos a partir de ensayos de flexión para tableros con tres chapas indican que hay una disminución significativa en la rigidez del tablero en la dirección transversal. Sin embargo, es de esperar que este efecto desaparezca a medida que aumenta la cantidad de chapas que conforman el tablero. Teniendo en cuenta el tiempo extra que implicaría realizar una etapa de inspección de las chapas para la localización de los *lathe checks* y el posterior apilamiento acorde a este, sumado a que el volumen de elaboración de tableros con tres chapas es muy bajo, no se justifica un cambio en la línea de producción ya que no generaría un beneficio claro adicionar dicha nueva etapa en la fabricación de los tableros.

### 4.2 Tableros con adhesivo biogénico

Los adhesivos a base de formaldehído, como las resinas urea formaldehído o fenol formaldehído (usado en este trabajo), son comúnmente utilizados para construir productos de madera; por ejemplo, tableros contrachapados. Sus propiedades son muy buenas, sin embargo, una de sus principales desventajas desde el punto de vista medioambiental es que derivan del petróleo, una fuente limitada y no renovable (Luo

et al., 2015). Además, estos adhesivos liberan formaldehído durante su producción, el cual resulta ser cancerígeno según la Organización Mundial de la Salud (Y. Liu, 2007).

Por este motivo, resultó de interés evaluar la variación de costos de producción y venta de tableros fabricados con un adhesivo biogénico distinto al fenólico, en particular a base de concentrado de proteína de soja. Existe una experiencia previa en el uso de este tipo de adhesivo el cual fue estudiado por el grupo de investigación asociado al presente trabajo (Nicolao et al., 2020, 2022). De acuerdo a sus publicaciones, la *performance* del adhesivo a base de concentrado de proteína de soja es excelente en tableros de eucalipto, cumpliendo con la norma IRAM 9562 para aplicaciones de uso interior.

Los adhesivos a base de proteína de soja son una alternativa y uno de los principales focos de investigadores al ser la misma producida a partir de recursos agrícolas renovables. El concentrado de proteína de soja tiene propiedades únicas para su utilización como adhesivo, como bajas temperaturas de prensado y habilidad de unir madera con relativamente alto contenido de humedad (American Soybean Association, 2020). Además, es amigable con el medio ambiente y resulta ser un recurso abundante (Nicolao et al., 2020). Argentina es el tercer productor de soja a nivel mundial (54 millones de toneladas 2019/2020) por lo que resulta atractivo la utilización de adhesivos a base de estos cultivos aprovechando la ventaja que implica el uso de recursos propios del país (K. Li & Peshkova, 2004).

Teniendo en cuenta lo mencionado, se calcularon los costos asociados a la producción de contrachapados utilizando como adhesivo:

- Resina fenólica, usada en general para tableros de uso exterior, y particularmente en este trabajo.
- Adhesivo a base de concentrado de proteína de soja (CPS), evaluada y aprobada para tableros de uso interior.
- Resina urea formaldehído (RUF), empleada en tableros de uso interior debido a su baja resistencia a la humedad (Kamke, 2001). Esta se incorporó a la tabla de costos a fin de realizar una comparación directa entre dos adhesivos para uso interior, a pesar de no haber sido utilizada en el trabajo.

Se propuso el análisis de costos detallado en la tabla 4.

**Tabla 4.** Análisis de costos de producción de tableros para diferentes adhesivos. \*precio del sólido seco

| Adhesivo                   | Precio (USD/kg)               | Cantidad por unión encolada (base seca) (kg/m <sup>2</sup> ) | Cantidad por m <sup>3</sup> de tablero (kg/m <sup>3</sup> ) | Costo de adhesivo por m <sup>3</sup> de tablero (USD/m <sup>3</sup> ) | Rango costo tablero (USD/m <sup>3</sup> ) |
|----------------------------|-------------------------------|--|---|---|---|
| <b>Fenol formaldehído</b>  | 0,7                           | 0,13   | 65  | 45,5  | 190 – 228                                 |
| <b>Concentrado de soja</b> | 0,8* (Gro Intelligence, 2017) | 0,047  | 23,6  | 18,9  | 79 – 94                                   |
| <b>Urea formaldehído</b>   | 0,25* (Silekol, n.d.)         | 0,11   | 55,3  | 13,8  | 57 – 69                                   |

Se tomaron los siguientes criterios para realizar los cálculos:

- Se consideraron las medidas del tablero comercial: 2 x 2,4 x 0,016 m<sup>3</sup>.
- Se consideró al tablero constituido por 9 chapas (8 uniones encoladas), tomando como referencia aquellos producidos por la industria que proveyó de costos de contrachapados de eucalipto con adhesivo fenólico.
- Las cantidades de adhesivo por unión encolada se seleccionaron en base a distintas investigaciones (Bekhta et al., 2019; Kawalerczyk & Dziurka, 2021; Nicolao et al., 2022), como así también el contenido de sólidos de los mismos (Dunky, 1998; Nicolao et al., 2022; Pizzi, 2003).
- La estimación del rango de precios de los tableros contrachapados por metro cúbico, para cada tipo de adhesivo, se realizó teniendo en cuenta el porcentaje del mismo sobre el costo total, informado por empresa local (entre 20-24 %, como se mencionó en la tabla 3)

Según los valores estimados, se aprecia una importante diferencia de precio entre tableros producidos con adhesivo a base de CPS y fenol formaldehído (resina fenólica). Sin embargo, se debe tener en cuenta que este reemplazo de adhesivos

solo podría realizarse en el caso de contrachapados para aplicaciones de uso interior. Esto es así ya que el adhesivo CPS presenta baja resistencia a la humedad, principalmente a causa de la cantidad limitada de entrecruzamientos formados durante el curado (L. Lorenz & Frihart, 2005). A causa de ello, los tableros con CPS evaluados cumplen con la norma IRAM 9562 (2006) para uso interior de clase I (Nicolao et al., 2022).

Por otra parte, al comparar los costos asociados al uso de adhesivos de CPS y RUF (ambos de uso interior), resulta más económico el segundo. Esto es esperable al ser una de sus principales ventajas su bajo costo, junto a una buena adhesión a la madera, baja temperatura de curado, carencia de color y bajo tiempo de prensado (Bekhta et al., 2019; Réh et al., 2021); motivos por los cuales es ampliamente utilizado en la industria de la madera. Sin embargo, debido a sus desventajas mencionadas anteriormente, resulta imperioso estudiar y evaluar la posibilidad de su reemplazo por adhesivos biogénicos como el CPS; provenientes de un recurso renovable y sin emisión de productos cancerígenos. La motivación principal para dicho cambio es el cuidado del ambiente y de la salud de las personas (Dunky, 2021). Debe tenerse en cuenta que durante el proceso de fabricación del tablero es necesario controlar la presión de consolidación, viscosidad del adhesivo, a fin de obtener un producto de buena calidad (N. Chen et al., 2013). En general, estos adhesivos presentan alta viscosidad con bajos contenidos de sólidos (Bacigalupe et al., 2020), siendo estos dos los parámetros claves a tener en cuenta en cualquier adhesivo a utilizar sobre la madera (M. Liu et al., 2018). La viscosidad ejerce una gran influencia sobre la penetración del adhesivo en la superficie rugosa de la madera, mientras que el contenido de sólidos determina el tiempo de prensado en caliente para la evaporación del agua. Algunos autores han propuesto la combinación de CPS y RUF con el fin de lograr altos contenidos de sólidos sin aumentar drásticamente la viscosidad, combinando las ventajas de ambos y reduciendo el contenido de formaldehído (Bacigalupe et al., 2020; L. F. Lorenz et al., 1999).

Por otra parte, como se mencionó previamente, el grupo de investigación asociado al presente trabajo estudió distintos parámetros claves del concentrado de la proteína de soja y reconoció su potencial como adhesivo para productos de madera;

elaborando distintas formulaciones exentas de formaldehído y modificadas con sustancias no nocivas ni volátiles a fin de mejorar la *performance*. Se encontró en los adhesivos de proteína de soja un comportamiento competitivo frente a las resinas UF (Esposito et al., 2021; Leiva et al., 2007; Nicolao et al., 2020, 2022).

A pesar del mayor costo del adhesivo de CPS, la necesidad de cambio hacia la reducción o incluso eliminación del uso de recursos no renovables, como así también de las emisiones de formaldehído, dan lugar al creciente interés en la investigación de adhesivos naturales. El uso de ellos es inminente y el estudio continuo de modificaciones y nuevas formulaciones es indispensable para hallar mejoras que contrarresten y justifiquen la diferencia de precio con los adhesivos sintéticos más usados hoy en día.

## 5. CONCLUSIONES

A partir de la realización de ensayos a flexión sobre tableros contrachapados con distintas configuraciones según la ubicación de los *lathe checks* se arribó a las siguientes conclusiones:

- Se obtuvieron diferencias significativas en los valores de módulo de elasticidad para los tableros ensayados transversalmente con diferente configuración de apilamiento (según la posición de los LC). Esto se vio influenciado por la posición de los defectos según la configuración de cada tablero ya que, en algunos casos, la apertura de éstos bajo tensión produjo una disminución del espesor real de las probetas y consecuentemente de su rigidez. Para los tableros ensayados longitudinalmente, los valores de módulo obtenidos resultaron similares, lo cual fue esperable por ser ésta una propiedad intrínseca del material. Por otra parte, se obtuvieron diferencias significativas en la resistencia a la flexión comparando entre tableros ensayados longitudinal y transversalmente, lo cual se relaciona con la anisotropía de la madera y su diferencia en propiedades de acuerdo a la dirección.

- En cuanto a los modos de falla, gracias al análisis conjunto de los ensayos de flexión y los obtenidos por la técnica *DIC*, se observó que los *LC* actúan como camino de propagación de fisuras junto a la microestructura celular vasal que también funciona como eslabón débil a la falla. La utilidad de combinar estas metodologías es clara ya que permitió evidenciar los procesos de falla asociados a los *LC* y a la microestructura de la madera ante una sollicitación a flexión.

- El análisis de apertura de *LC* con hipótesis simplificativas mostró resultados satisfactorios que tienden a evidenciar que el proceso de falla se daría por la presencia de tensiones normales sobre los defectos. Esto dará lugar a un trabajo futuro de modelado del caso real, con el fin de analizar en profundidad el modo de apertura de defectos en las chapas de madera sometidas a flexión.

- Por último, al evaluar la viabilidad económica de construir tableros con adhesivos biogénicos, se observó que el adhesivo a base de CPS presentó un menor costo que la resina fenólica. Sin embargo, aún no se obtuvieron adhesivos biogénicos con las propiedades necesarias para uso en ambiente exterior con mojado ocasional. En

cambio, presenta una buena performance para uso interior, ámbito en el cual competiría con el adhesivo de urea formaldehído. A pesar de ser más caro el CPS, la necesidad de reducir la emisión de formaldehido y el uso de fuentes no renovables, impulsa su creciente utilización, en búsqueda de posicionarlo dentro de los adhesivos industriales.

## 6. TRABAJO A FUTURO

En base a los resultados obtenidos, podrían realizarse los siguientes estudios:

- Llevar a cabo el análisis del efecto de los *lathe checks* en el comportamiento a la flexión de tableros contrachapados de *pinus taeda*, otra de las especies mayoritarias cultivadas en Argentina.
- Modelar el tablero ensayado a flexión, teniendo en cuenta todas las condiciones reales como la orientación ortogonal de las chapas y la existencia de defectos. A partir de ello, estudiar en profundidad los estados tensionales y el proceso de apertura de *lathe checks*, evaluando el posible efecto de su profundidad y frecuencia.

## 7. REFERENCIAS

- Acevedo, A., Bustos, C., & Lasserre, J. P. (2012). Efecto de la tasa de compresión en la morfología de grietas de debobinado para chapas de *Eucalyptus nitens*. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 14(3), 289–301.
- Acevedo Moraga, A. A. (2012). *Efecto de las grietas de debobinado en chapas de Eucalyptus Nitens para la fabricación de tableros contrachapados* [Tesis de Posgrado]. Facultad de Ingeniería - Universidad del Bio Bio.
- Alam, N., & Rahman, S. (2012). Comparative Study on Physical and Mechanical Properties of Plywood Produced from *Eucalyptus* (*Eucalyptus camaldulensis* Dehn.) and Simul (*Bombax ceiba* L.) Veneers. *Journal of Recent Sciences*, 1(9), 54–58.
- Altuna, F. (2011). *Espumas epoxi basadas en aceites vegetales epoxidados* [Tesis doctoral]. Universidad Nacional de Mar del Plata.
- American Soybean Association. (2020). *Soystats: A reference guide to important soybean facts and figures*.
- Ansell, M. P. (2015). Wood microstructure-A cellular composite. In *Wood Composites* (Vol. 1, pp. 3–26). Woodhead Publishing.
- Antikainen, T., Eskelinen, J., Rohumaa, A., Vainio, T., & Hughes, M. (2015). Simultaneous measurement of lathe check depth and the grain angle of birch (*Betula pendula* Roth) veneers using laser trans-illumination imaging. *Wood Science and Technology*, 49(3), 591–605.
- Arango, B., & Tamayo, L. (2008). Densidad de la madera en clones de *Eucalyptus* por densitometría de rayos X. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, No 45, 87–99.
- Argüelles Álvarez, R., & Arriaga Martitegui, F. (1996). *Estructuras de madera: diseño y cálculo*.
- Bacigalupe, A., Molinari, F., Eisenberg, P., & Escobar, M. M. (2020). Adhesive properties of urea-formaldehyde resins blended with soy protein concentrate. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 3(2), 213–221.
- Bal, B. C. (2012). The effects of wood species, load direction, and adhesives on bending properties of laminated veneer lumber. *BioResources*, 7(3), 3104–3112.
- Bao, F., Fu, F., & Choong, E. (2001). Contribution factor of wood properties of three poplar clones to strength of laminated veneer lumber. *Journal of the Society of Wood Science and Technology*, 33(3), 345–352.
- Barahona Olmos, G. (2005). *Variación de la composición química en albura, duramen y altura de madera pulperable de Eucalyptus globulus proveniente de monte alto y monte bajo* [Tesis de grado]. Facultad de Ciencias Forestales - Universidad de Chile.
- Barnett, J. R., & Jeronimidis, G. (2003). *Wood Quality and Its Biological Basis*. CRC Press.
- Barotto, A. J., Monteoliva, S., Gyenge, J., Martínez-Meier, A., Moreno, K., Tesón, N., & Fernández, M. E. (2017). Wood density and anatomy of three eucalyptus species: Implications for hydraulic conductivity. *Forest Systems*, 26(1).

- Barotto, J. A. (2021). *Significado funcional de la madera en el género Eucalyptus: relaciones entre microestructura y mecanismos de resistencia a estrés por sequía y heladas* [Tesis doctoral].
- Bekhta, P., Sedliačik, J., Kačík, F., Noshchenko, G., & Kleinová, A. (2019). Lignocellulosic waste fibers and their application as a component of urea-formaldehyde adhesive composition in the manufacture of plywood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 77(4), 495–508.
- Benedito Guimarães Júnior, J., Marin Mendes, L., Farinassi Mendes, R., & Akira Mori, F. (2009). Plywood boards of Eucalyptus: a case study of species and provenances. *Cerne*, 1, 10–18.
- Benites, L. (2004). *Características de madera de chapas laminadas (LVL) de plantaciones de rápido crecimiento del Uruguay : eucalyptus grandis, populus spp., pinus taeda, pinus elliottii*.
- Bhat, K., & Bhat, K. (2007). Wood Density and Fiber Length of Eucalyptus Grandis Grown in Kerala, India. *Wood and Fiber Science*, 22(1), 54–61.
- Broughton, W. (2012). Testing the mechanical, thermal and chemical properties of adhesives for marine environments. In *Adhesives in Marine Engineering* (pp. 99–154). Woodhead Publishing.
- Buchelt, B., Wagenführ, A., Dietzel, A., & Raßbach, H. (2018). Quantification of cracks and cross-section weakening in sliced veneers. *European Journal of Wood and Wood Products*, 76(1), 381–384.
- Bulman, C., Winck, R., Aquino, D., & Stefani, P. (2022). Variation of the density and proportion of sapwood and heartwood in new Eucalyptus spp. clones. *Maderas - Ciencia y Tecnología*.
- Calvo, C. F., Cotrina, A. D., Cuffré, A. G., Piter, J. C., Stefani, P. M., & Torrán, E. A. (2006). Variación radial y axial del hinchamiento, del factor anisotrópico y de la densidad, en el Eucalyptus Grandis de Argentina. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 8(3), 159–168.
- Calvo, C. F., Daniel Cotrina, A., Cuffre, A. G., Ott, M., Carlos Piter, J., Stefani, P. M., Torran, E. A., & Vivian, A. (2007). Propiedades de hinchamiento y contracción en la madera de Eucalyptus grandis de Argentina. *Revista Madeira Arquitetura & Engenharia*, 59–69.
- Carlquist, S. J. (2001). *Comparative wood anatomy: systematic, ecological, and evolutionary aspects of dicotyledon wood*. Springer Science & Business Media.
- Chapetti, M. D. (2005). *Mecánica de materiales: teorías de elasticidad, plasticidad y mecánica de fractura*. Ediciones al margen. Ingeniería. Colección universitaria.
- Chen, C., Kuang, Y., Zhu, S., & Burgert, I. (2020). Structure–property–function relationships of natural and engineered wood. *Nature Review Materials*, 5(9), 642–666.
- Chen, C., Kuang, Y., Zhu, S., Burgert, I., & Keplinger, T. (2020). *Structure–property–function relationships of natural and engineered wood*. <https://doi.org/10.1038/s41578-020-0195-z>

z

- Chen, N., Lin, Q., Rao, J., & Zeng, Q. (2013). Water resistances and bonding strengths of soy-based adhesives containing different carbohydrates. *Industrial Crops and Products*, *50*, 44–49.
- Cihad Bal, B., & Bektaş, I. (2014). Some mechanical properties of plywood produced from Eucalyptus, Beech and Poplar veneer. *Maderas, Ciencia y Tecnología*, *16*, 99–108.
- Correlated Solutions, I. (2022). *Strain Tensors and Criteria in Vic - Correlated Solutions, Inc.*
- Cramer, S., Kretschmann, D., Lakes, R., & Schmidt, T. (2005). *Earlywood and latewood elastic properties in loblolly pine*. *59*(5), 531–538.
- Darmawan, W., Nandika, D., & Massijaya, Y. (2015). Lathe check characteristics of fast growing sengon veneers and their effect on LVL glue-bond and bending strength. *Journal of Materials Processing Technology*, *215*, 181–188.
- Denaud, L., Marcon, B., & Rohumaa, A. (2019). *Influence of Peeling Process Parameters on Veneer Lathe Check Properties*.
- Dinwoodie, J. (2000). *Timber: its nature and behaviour* (CRC Press).
- Dunky, M. (1998). Urea-formaldehyde (UF) adhesive resins for wood. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *18*(2), 95–107.
- Dunky, M. (2021). Wood Adhesives Based on Natural Resources: A Critical Review: Part I. Protein Based Adhesives. *Progress in Adhesion and Adhesives*, *6*, 203–336.
- Dupleix, A., Denaud, L.-E., Bleron, L., Marchal, R., & Hughes, M. (2013). The effect of log heating temperature on the peeling process and veneer quality: beech, birch, and spruce case studies. *European Journal of Wood and Wood Products*, *71*(2), 163–171.
- Ek, M., Gellerstedt, G., & Henriksson, G. (2009). *Wood Chemistry and Wood Biotechnology* (Walter de Gruyter).
- Esposito, L., Ciannamea, E. M., Solaberrieta, I., Piter, J. C., Ruseckaite, R. A., & Stefani, P. M. (2021). Tannin-modified soybean protein concentrate for wood adhesive. *Journal of Applied Research in Technology & Engineering*, *3*(1), 1–7.
- Falk, R. H. (2009). Wood as a sustainable building material. *Forest Products Journal*, *59*, 6–12.
- FAO. (2021). *FAO Rice Market Monitor*. Disponible Online En: <https://www.fao.org/markets-and-trade/commodities/rice> (Acceso 20 de Noviembre de 2022).
- Feijoo, C. E., Armijos, D. R., & Pucha Cofrep, D. A. (2018). *Guía para cortes anatómicos de la madera*. Universidad Nacional de Loja.
- Frank, P. Y. (2018). *Caracterización físico-mecánica del pino resinoso (Pinus taeda y Pinus elliottii) cultivado en el nordeste argentino para uso estructural* [Tesis doctoral]. Facultad Regional Concepción del Uruguay - UTN.
- Gadelmawla, E., & Koura, M. (2002). Roughness parameters. *Journal of Materials Processing Technology*, *123*(1), 133–145.
- Gamboa, C. B., Martín-Béjar, S., Javier, F., Vilches, T., Castillo López, G., Hurtado, L. S., & Ramos, O. (2019). 2D–3D Digital Image Correlation Comparative Analysis for Indentation Process. *Materials*, *12*(24).

- García Romero, A. M., & Monasterio Guisasola, N. (2018). *Introducción a la ciencia de los materiales y sus propiedades*. Universidad del País Vasco.
- Giménez, A. M., & Moglia, J. G. (2005). *Anatomía de madera*. Universidad Nacional de Santiago del Estero - Facultad de Ciencias Forestales.
- Gorzycycki, R. M., & Ruggiero, M. (2016). *Informe de cadenas de valor - Forestal, papel y muebles*. Disponible Online En: <https://es.scribd.com/document/357297269/SSPE-Cadenas-de-Valor-Forestal-Papel-y-Muebles> (Acceso: 10 de octubre 2022).
- Green, D. W., Winandy, J. E., & Kretschmann, D. E. (1999). Mechanical Properties of Wood. In *Wood handbook: wood as an engineering material*. (Madison, Vol. 113, pp. 1–45).
- Gro Intelligence. (2017). *Can Soy Protein Become the Next Whey?* Disponible Online En: <https://gro-intelligence.com/insights/soy-protein-next-whey-protein> (Acceso: 14 de Noviembre 2022).
- Hein, P. R. G., & Brancheriau, L. (2018). Comparison between three-point and four-point flexural tests to determine wood strength of Eucalyptus specimens. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 20(3), 333–342.
- Hoffmeyer, P. (1995). Wood as a building material. Timber Engineering. Basis of design, material properties, structural components and joints. *STEP 1*.
- Hrázský, J., & Král, P. (2005). Assessing the bending strength and modulus of elasticity in bending of exterior foiled plywoods in relation to their construction. *Journal of Forest Science*, 51(2), 77–94.
- Huang, C. L., Ralston, J., Nakada, R., & Lindstrom, H. (2003). Cell wall structure and wood properties determined by acoustics: a selective review. *Holz Als Roh- Und Werkstoff*, 61(5), 321–335.
- Hughes, M. (2015). Plywood and other veneer-based products. In *Wood Composites* (pp. 69–89). Woodhead Publishing.
- Iwakiri, S., Keinert, S., Guilherme Prata, J., Rosso, S., & Florestal, E. (2007). Produção de painel compensado estrutural de Eucalyptus grandis e Eucalyptus dunnii. *Revista Floresta*, 37(3).
- Iwakiri, S., Luis, J., de Matos, M., Guilherme Prata, J., Trianoski, R., & Soares Da Silva, L. (2013). Evaluation of the use potential of nine species of genus Eucalyptus for production of veneers and plywood panels. *Cerne*, 19, 263–269.
- Kabir, M., & Bhattacharjee, D. (1995). Strength properties and drying characteristics of Eucalyptus wood grown in Bangladesh. *Revista de Ciencia Tailandesa*, 14(2), 103–109.
- Kallakas, H., Rohumaa, A., Vahermets, H., & Kers, J. (2020). Effect of different hardwood species and lay-up schemes on the mechanical properties of plywood. *Forests*, 11(6), 1–13.
- Kamke, F. A. (2001). Wood: nonstructural panel processes. In *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* (pp. 9673–9678).
- Kamperidou, V., Aidinidis, E., & Barboutis, I. (2020). Impact of Structural Defects on the Surface Quality of Hardwood Species Sliced Veneers. *Applied Sciences*, 10(18), 6265.

- Kawalerczyk, J., & Dziurka, D. (2021). The reduction of adhesive application in plywood manufacturing by using nanocellulose-reinforced urea-formaldehyde resin. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(7), 49834.
- Kretschmann, D. E., & Cramer, S. M. (2007). *THE ROLE OF EARLYWOOD AND LATEWOOD PROPERTIES ON DIMENSIONAL STABILITY OF LOBLOLLY PINE*. Wood Technology Research Centre, University of Canterbury.
- Lam, F. (2001). Modern structural wood products. In *Progress in structural engineering and materials* (Vol. 3, pp. 238–245).
- Lebo, S. E., Gargulak, J. D., & McNally, T. J. (2002). Lignin. In *Encyclopedia of Polymer Science and Technology* (Vol. 3). John Wiley & Sons, Inc.
- Leiva, P., Ciannamea, E., Ruseckaite, R. A., & Stefani, P. M. (2007). Medium-density particleboards from rice husks and soybean protein concentrate. *Journal of Applied Polymer Science*, 106(2), 1301–1306.
- León H., W. J. (2010). Anatomía y densidad o peso específico de la madera. *La Revista Forestal Venezolana*, 54(1), 67–77.
- Li, G., Wu, Q., & He, Y. (2018). Surface roughness of thin wood veneers sliced from laminated green wood lumber. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 20(1), 3–10.
- Li, K., & Peshkova, S. (2004). Investigation of soy protein-Kymene® adhesive systems for wood composites. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 81(5), 487–491.
- Liu, M., Wang, Y., Wu, Y., & He, Z. (2018). "Greener" adhesives composed of urea-formaldehyde resin and cottonseed meal for wood-based composites. *Journal of Cleaner Production*, 187, 361–371.
- Liu, Y. (2007). Development and characterization of adhesives from soy protein for bonding wood. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 27(1), 59–67.
- Lorenz, L. F., Conner, A. H., & Christiansen, A. W. (1999). The effect of soy protein additions on the reactivity and formaldehyde emissions of urea-formaldehyde adhesive resins. *Forest Products Journal*.
- Lorenz, L., & Frihart, C. R. (2005). Analysis of soy flour/phenol-formaldehyde adhesives for bonding wood. *Wood Adhesives*, 49(3), 73–78.
- Luo, J., Luo, J., Yuan, C., Zhang, W., Li, J., & Gao, Q. (2015). An eco-friendly wood adhesive from soy protein and lignin: Performance properties. *RSC Advances*, 5(122), 100849–100855.
- Marchal, R., Mothe, F., Denaud, L.-E., Thibaut, B., & Bleron, L. (2009). Cutting Forces in basic and real life wood machining processes. *Holzforschung*, 63 (2), 157–167.
- Martinuzzi, F. (2010). *Fichas técnicas de Maderas: INTI Madera y muebles*. Disponible Online En [Http://Www.inti.gov.ar/MadEraymuebles/Pdf/Caracterizacion\\_maderas/KIRI.Pdf](http://www.inti.gov.ar/MadEraymuebles/Pdf/Caracterizacion_maderas/KIRI.Pdf) (Acceso: 11 septiembre de 2022).
- Merhar, M. (2020). Determination of Elastic Properties of Beech Plywood by Analytical, Experimental and Numerical Methods. *Forests*, 11(11), 1221.

- Merhar, M., Antov, P., Zhou, Y., & Savov, V. (2021). Application of Failure Criteria on Plywood under Bending. *Polymers*, *13*(24), 4449.
- Monteoliva, S., Barotto, A. J., & Fernandez, M. E. (2015). Anatomía y densidad madera de Eucalyptus: variación interespecífica e implicancia en la resistencia al estrés abiótico. *Revista de La Facultad de Agronomía, La Plata*, *114*(2), 209–217.
- Naidoo, S., Zbonak, A., & Ahmed, F. (2006). Effect of moisture availability on wood density and vessel characteristics of Eucalyptus grandis in the warm temperate region of South Africa. *Proceedings of the 5th International Symposium on Wood Structure and Properties*, 117–122.
- Nicolao, E. S., Leiva, P., Chalapud, M. C., & Ciannamea, E. M. (2020). Flexural and tensile properties of biobased rice husk-jute-soybean protein particleboards. *Journal of Building Engineering*, *30*, 101261.
- Nicolao, E. S., Monteoliva, S., Ciannamea, E. M., & Stefani, P. (2022). Plywoods of Northeast Argentinian wood and soybean protein-based adhesives: relationship between morphological aspects of veneers and shear strength values. *Maderas-Cienc Tecnol*, *24*, 3–4.
- Niklas, K. J., & Spatz, H. C. (2010). Worldwide correlations of mechanical properties and green wood density. *American Journal of Botany*, *97*(10), 1587–1594.
- Pandey, K. (1999). A study of chemical structure of soft and hardwood and wood polymers by FTIR spectroscopy. *Journal of Applied Polymer Science*, *71*(12), 1969–1975.
- Pérez Olvera, C. de la P., Dávalos Sotelo, R., & Quintanar, P. A. (2005). Influencia de los radios en algunas propiedades físicas y mecánicas de la madera de ocho encinos (Quercus) de Durango, México. *Madera y Bosques*, *11*(2), 49–68.
- Pittermann, J., Limm, E., Rico, C., & Christman, M. A. (2011). Structure-function constraints of tracheid-based xylem: A comparison of conifers and ferns. *New Phytologist*, *192*(2), 449–461.
- Pizzi, A. (2003). Urea–Formaldehyde Adhesives. *Handbook of Adhesive Technology, Revised and Expanded*.
- Pot, G., Denaud, L., & Butaud, J.-C. (2016). Experimental study of the influence of veneer lathe checks on LVL elastic mechanical properties. *World Conference on Timber Engineering*.
- Prakash, V., Singh, M. P., Uday, D. N., Sujatha, D., Kiran, M. C., & Murthy, N. (2021). Indian Timbers for Veneering - A Review. *Indian Forester*, *147*(5), 431.
- Réh, R., Uboš Krišt'ák, L. ', Sedliačik, J., Bekhta, P., Božiková, M., Kunecová, D., Vozárová, V., Tudor, E. M., Antov, P., & Savov, V. (2021). Utilization of birch bark as an eco-friendly filler in urea-formaldehyde adhesives for plywood manufacturing. *Polymers*, *13*(4), 511.
- Renault, H., le Werck-Reichhart, D., Weng, J.-K., by Wout Boerjan, E., & Ralph, J. (2019). Harnessing lignin evolution for biotechnological applications. *Current Opinion in Biotechnology*, *56*, 105–111.
- Resquin, F., Fariña, I., Rachid, C., Rava, A., & Doldán, J. (2012). Influencia de la edad de corte en el pulpeo de Eucalyptus globulus plantado en Uruguay. *Agrociencia*, *16*(2), 27–38.

- Riesco Muñoz, G., & Remacha Gete, A. (2017). Influencia del peso específico de la pared celular en la variabilidad del peso específico aparente de la madera de roble. In *7mo Congreso Forestal Español*. Sociedad Española de Ciencias Forestales.
- Rivas Siota, S. (2014). *Valorización de hemicelulosas de biomasa vegetal* [Tesis doctoral]. Universidad de Vigo.
- Rohumaa, A., Hunt, C. G., Hughes, M., Frihart, C. R., & Logren, J. (2013). The influence of lathe check depth and orientation on the bond quality of phenol-formaldehyde - Bonded birch plywood. *Holzforschung*, 67(7), 779–786.
- Ross, R. J. (2010). Wood handbook: wood as an engineering material. *USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL- GTR-190, 2010: 509 p. 1 v., 190*.
- Rowell, R. M. (2005). *Handbook of wood chemistry and wood composites*. CRC Press.
- Sellers, T., & Dekker. (1985). Plywood and adhesive technology. *Journal of Polymer Science Part C: Polymer Letters*, 25 (2), 84.
- Seng Hua, L., Wei Chen, L., Antov, P., Kristak, L., & Md Tahir, P. (2022). Engineering Wood Products from Eucalyptus spp. *Advances in Materials Science and Engineering*, 22, 1–14.
- Shigley, J., Mischke, C., Bocanegra, F., & Correa, C. (1990). *Diseño en ingeniería mecánica*.
- Silekol. (n.d.). *Impregnating materials*. Disponible Online En: <https://Silekol.PI/En/Impregnation/Impregnating-Materials/> (Acceso: 14 de noviembre de 2022).
- Soto-Hernández, M., Terrazas, T., Trejo, C., & Maceda, A. (2021). Lignina: composición, síntesis y evolución. *Maderas y Bosques*, 27(2).
- Sotomayor, J. R., & Ramírez, M. (2014). Vista de Anisotropía del módulo de elasticidad y de resistencia en compresión de la madera de Pinus michoacana, Pinus douglasiana y Pinus pringlei. *Acta Universitaria*, 24(5), 3–12.
- Sulle, U., Meija, A., Kūliņš, L., Kopeika, E., Liepa, K. H., Šillers, H., & Zudrags, K. (2021). Influence of Hot Pressing Technological Parameters on Plywood Bending Properties. *BioResources*, 16(4), 7550–7561.
- Stefani, P. M., Peña, C., Ruseckaite, R. A., & Piter, J. C. (2008). Processing conditions analysis of Eucalyptus globulus plywood bonded with resol-tannin adhesives. *Bioresource Technology*, 99(13), 5977–5980.
- Su, P. (2015). *Sorption of Metal Ions to Wood, Pulp and Bark Materials*. April.
- Suárez Soledispa, E. N. (2021). *La resistencia a la flexión en la madera - Trabajo de investigación recopilatorio*.
- Susainathan, J., Eyma, F., & Luycker, E. de. (2017). Manufacturing and quasi-static bending behavior of wood-based sandwich structures. In *Composite Structures* (Vol. 182, pp. 487–504).
- Thomas, R. J. (1977). Wood: Structure and Chemical Composition. In *In Wood Technology: Chemical Aspects*.

- Walker, A. (2007). *Enciclopedia de la madera. 150 tipos de madera del mundo* (BLUME, Ed.). BLUME.
- Wang, L., Toppinen, A., & Juslin, H. (2014). Use of wood in green building: a study of expert perspectives from the UK. *Journal of Cleaner Production*, *65*, 350–361.
- Wessels, C. B., Nocetti, M., & Brunetti, M. (2020). Green-glued engineered products from fast growing Eucalyptus trees: a review. *European Journal of Wood and Wood Products*, *78*(5), 933–940.
- Yoshihara, H. (2011). Bending properties of medium-density fiberboard and plywood obtained by compression bending test. *Forest Products Journal*, *61*(1), 56–63.
- Zhang, H., Song, M., Ruan, L., & Zhang, F. (2019). Von mises strain as a risk marker for vulnerability of carotid plaque: Preliminary clinical evaluation of cerebral infarction. *Ultrasound in Medicine & Biology*, *45*(5), 1221–1233.

## 8. ANEXO

### 7.1 Caracterización de la madera: densidad y humedad

En primer lugar, se pesaron las muestras en una balanza analítica (Ohaus,  $\pm 0.0001$ ).

Para la determinación de la humedad, las muestras fueron secadas en un horno de convección a  $103 \pm 2$  °C hasta alcanzar peso constante. Se considera que la masa es constante cuando los resultados de dos pesadas sucesivas realizadas en un intervalo de 6 horas no difieren en más del 0,1% en peso con relación a la masa inicial de la probeta.

Se calculó la humedad siguiendo la siguiente fórmula:

$$H = \frac{m_H - m_0}{m_0} \times 100$$

Donde  $m_H$  es la masa inicial de la probeta, en gramos, y  $m_0$  es la masa de la probeta después del secado, en gramos.

Para determinar la densidad, se midieron las muestras con un calibre digital (Asimeto 307-06-4, Alemania,  $0-150$  mm  $\pm 0.01$  mm) y el espesor fue medido utilizando un micrómetro digital (Asimeto IP65, Alemania,  $0-25 \pm 0.01$  mm) en ocho ubicaciones al azar de las probetas. La densidad se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{m}{b_1 \cdot b_2 \cdot t} \cdot 10^6$$

Donde  $\rho$  es la densidad en  $\text{kg/m}^3$ ;  $b_1$  y  $b_2$  son largo y ancho en milímetros;  $t$  es el espesor en milímetros.

### 7.2 Microscopía electrónica de barrido

El microscopio electrónico de barrido o *SEM (Scanning Electron Microscope)* es un instrumento muy versátil que facilita la observación y caracterización de materiales brindando información morfológica, estructural y de composición química. El principio fundamental de funcionamiento se basa en un haz de electrones acelerados, producidos en alto vacío mediante el calentamiento de un elemento metálico, los cuales impactan sobre la superficie de la muestra generando una interacción con ella. Al incidir el haz de electrones, se producen diversas señales que son captadas y visualizadas por los distintos detectores del equipo. Algunos electrones, al impactar cerca de un núcleo atómico de la muestra, proporcionan suficiente energía a los electrones interiores para

abandonar el material. Estos se conocen como secundarios y brindan valiosa información topográfica. Luego de que uno de ellos abandona el material, otro electrón más externo puede saltar hacia el interior para llenar este hueco. El exceso de energía provocado por este desplazamiento puede ser corregido emitiendo un nuevo electrón de la capa más externa, llamado Auger. Estos son utilizados para obtener información sobre la composición de pequeñísimas partes de la superficie de la muestra. Otros electrones, llamados retrodispersados, chocan frontalmente con núcleos atómicos y son repelidos; la intensidad del efecto varía de acuerdo al número atómico de la muestra por lo que brinda datos de su composición superficial. Por último, el exceso de energía es balanceada por la emisión de rayos X; son característicos de cada elemento de la muestra por lo que se utilizan para obtener información sobre su composición (Rowell, 2005; Zhou, Apkarian, Wang, & Joy, 2006).