



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
INGENIERÍA FORESTAL

**EFFECTO DE LA PROCEDENCIA, TIPO DE ROLLIZO, UBICACIÓN
RELATIVA Y CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MADERA EN LOS
NIVELES DE ADHERENCIA DE TABLEROS CONTRACHAPADOS DE PINO
RADIATA**

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de
Concepción para otorgar al título profesional de Ingeniero/a Forestal

POR: Paula Belén Soto Paredes

Profesor Guía: Juan Pedro Elissetche Martínez

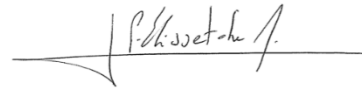
Marzo, 2024

Concepción, Chile

© 2024, Paula Belén Soto Paredes

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

DETERMINAR EL EFECTO DE LA PROCEDENCIA, TIPO DE ROLLIZO,
UBICACIÓN RELATIVA Y CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MADERA EN
LOS NIVELES DE ADHERENCIA DE TABLEROS CONTRACHAPADOS DE
PINO RADIATA



Profesor Guía

Juan Pedro Elissetche Martínez

Profesor Asociado

Ingeniero Forestal, PhD



Profesor Guía

Rosa Maria Alzamora Mallea

Profesora Asociada

Ingeniero Forestal, PhD



Profesor Guía

Cristián Barría Contreras

Colaborador Externo

Ingeniero Forestal

DEDICATORIA

A mi abuelo Domingo por hacerme sentir siempre como una niña y apoyarme ante cualquier cosa. A mis guías y protectoras Juana y Gabriela. A mi madre, por ser mi alma gemela, gracias por ser la mujer más valiente y enseñarme a ser la mujer que soy hoy. Y a mis hermanas, Javiera y Carla, por ser mis confidentes y mis amigas de vida.

A mis tíos, Natalia y Rodrigo, por ser un soporte y darme energías cuando no podía más. A mi Feñita, por entregarme su alegría y permitirme ser niña con ella. A Marcela, Nelson y Francisca, por ser una segunda familia para mí y entregarme siempre el cariño y apoyo. A Katalina y Nicolás, por estar para mí en mis peores momentos. También a Antonia y Mauricio por acogerme siempre.

A mis roomies y amigos, Alejandra, Diego y Nina por convertirse en unos hermanos para mí, gracias por abrirme las puertas de sus familias, por darme la mano desde mi primer día y ser mi familia en Concepción. A mi perrita Cleo, que llegó cuando no sabía que la necesitaba.

Y, por último, dedicárselo a mi Cami, por ser mi compañera de vida, que sin ella no estaría acá. Gracias por entregarme tu apoyo incondicional, por levantarme cada vez que no podía más, por tu complicidad, que a pesar de la distancia lograste llegar a mi corazón siempre. Eternamente agradecida contigo.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi agradecimiento a mis profesores guías. Al profesor Juan Pedro Elissetche por entregarme siempre su apoyo y confianza incondicionalmente. Al profesor Cristián Barría, por la oportunidad y por acompañarme en cada muestreo. Y, por último, a la profesora Rosa Alzamora, por su motivación constante y preocupación. A todos, gracias por sus conocimientos y por confiar en mí.

Agradezco profundamente a las y los trabajadores de Nueva Aldea y Horcones, quienes, con su apoyo y gestión, hicieron posible este trabajo. Sin su colaboración, no estaría aquí.

A mis amigos Alejandra, Belén, Diego, Gabriela, José, Nina, Paulina y a todos los que fueron mis amigas y amigos durante estos años universitarios, por su compañía, sacarme una risa cada día, por su apañe y apoyo en este tortuoso camino llamado Universidad.

Finalmente, a mi Cami, por ayudarme con su sabiduría, con sus conocimientos e inteligencia. Por estar ahí siempre.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
I. INTRODUCCIÓN	16
II. METODOLOGÍA	26
2.1. Variables a considerar en la caracterización	26
2.1.1. Procedencia de producción	26
2.1.2. Tipo de rollizo	27
2.1.3. Ubicación relativa de las chapas	28
2.1.4. Contenido de humedad de la madera	29
2.1.5. Espesor de la chapa	30
2.2. Información de parámetros operacionales	31
2.2.1. Riego.....	32
2.2.2. Macerado	32
2.2.3. Debobinado	32
2.2.4. Secado	33
2.2.5. Dimensionadora.....	33
2.3. Preparación de muestras	34

2.4.	Densidad y Contenido de Humedad	36
2.5.	Análisis morfología de las chapas	39
2.5.1.	Tipo de grietas	41
2.5.2.	Frecuencia de grietas.....	42
2.5.3.	Longitud y ancho de grietas	42
2.5.4.	Apertura de grietas	44
2.5.5.	Ángulo de propagación de grietas	45
2.6.	Análisis compactación superficial	46
2.6.1.	Preparación de muestras	46
2.6.2.	Definición de Célula Compactada.....	47
2.6.3.	Medición de muestras	48
2.7.	Análisis de los datos para morfología de chapas	52
III.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
3.1.	Contenido de Humedad y Densidad	53
3.2.	Resultado correlaciones.....	55
3.2.1.	Relación Forma-Humedad	57
3.2.2.	Relación Abertura – Espesor.....	59
3.2.3.	Relación Largo - Calidad.....	62
3.2.4.	Relación Frecuencia – Humedad.....	65

3.3.	Resultados Análisis Compactación Superficial.....	68
3.3.1.	Resultados de medición del lumen celular	68
3.3.2.	Resultados de conteo de células compactadas.....	70
IV.	CONCLUSIONES	74
V.	GLOSARIO.....	77
VI.	BIBLIOGRAFÍA.....	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Diseño de muestreo y evaluación	30
Tabla 2. Resultados del coeficiente de correlación Rho para Nueva Aldea.....	56
Tabla 3. Resultados de los coeficientes de correlación Rho para Horcones. ...	56

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Orientación de las fibras para chapa corta y larga en tablero contrachapado. Fuente: Creación propia, imagen obtenida de Ayatecno (2016)	17
Figura 2. Diagrama del proceso de fabricación para los tableros contrachapados. Fuente: Elaboración propia.	19
Figura 3. Proceso de debobinado: (a) Rollizo, (b) Barra de compresión (“cara apretada”), (c) Grieta producida por debobinado (d) Cuchillo (“cara suelta”). (Darmawan et al. 2015 en Rahayu et al. 2015)	21
Figura 4. Ubicación de las plantas de procedencia de las chapas utilizadas. Fuente: Elaboración Propia.....	27
Figura 5. Procedencia de contenido de humedad (AH o BH) de chapas según ubicación relativa en la troza. Fuente: Elaboración propia.....	29
Figura 6. Esquema de corte para chapa larga para la obtención de probetas: (a) Sección central seleccionada para chapas obtenidas en planta. (b) Submuestra de chapa obtenida de la dimensionadora.	34
Figura 7. Esquema de corte para análisis morfológico: (a) Selección de la zona central de la submuestra obtenida en la dimensionadora. (b) Corte central de la submuestra para la obtención de probetas.	35
Figura 8. Esquema de corte para análisis microscópico: (a) Selección de la zona central de la submuestra obtenida en la dimensionadora, (b) Corte central dentro de la submuestra. (c) Muestra para análisis de compactación superficial.	36

Figura 9. Esquema de cortes para Contenido de humedad y Densidad: (a) Selección de la zona central de la submuestra obtenida en la dimensionadora, (b) Seis cortes provenientes la submuestra, tres para cada análisis y (c) Dimensión de cada muestra.....	37
Figura 10. Ilustración del método de inmersión en agua aplicado en chapas. ...	39
Figura 11. Vista superior y lateral de los soportes en el análisis morfológico: (a) Soporte para chapas de 2,6mm de espesor. (b) Soporte para chapas de 3,2 de espesor.	40
Figura 12. Tipos de grietas identificadas: (a) Grietas del tipo 1, (b) grietas tipo 2. (c) grieta tipo 3 y (d) grietas del tipo 4.	41
Figura 13. Imagen ilustrando la medición de longitud de grietas.....	43
Figura 14. Imagen ilustrando la medición del ancho de grietas.	44
Figura 15. Imagen ilustrando la medición de apertura de la grieta.	45
Figura 16. Imagen ilustrando la medición de ángulo de propagación de la grieta	46
Figura 17. Celulas de referencia para diferenciación de células compactadas y no compactadas. (a)Células no compactadas. (b) Células compactadas	47
Figura 18. Zona de medición en fotografías obtenidas por SEM. (A)Imagen macroscópica de la obtención de la chapa. (B) Imagen SEM de la obtención de la chapa. (a) Rollizo, (b) Barra de compresión, (c) grieta formada por el cuchillo, (d) Cuchillo.	49

Figura 19. Forma de medición de fotografías de compactación. (a)Sección 1. (b) Sección 2. (c)Sección 3.	50
Figura 20. Esquematización del conteo de células compactadas. (A) Delimitación de zonas. (B) Identificación de células compactadas y no compactadas en Línea 1, 2 y 3.	51
Figura 21. Comparación de promedios del contenido de humedad entre las plantas de Horcones y Nueva Aldea.	53
Figura 22. Comparación de densidades entre las plantas de Horcones y Nueva Aldea.	55
Figura 23. Frecuencia de forma de grietas según contenido de humedad de las chapas por planta.	58
Figura 24. Representación fotográfica de los distintos tipos de grietas según la variable "forma". (A) Grieta del tipo 1. (B) Grieta del tipo 2. (C) Grieta del tipo 3. (D) Grieta del tipo 4.	59
Figura 25. Promedio del ancho de abertura de grietas según el espesor de chapas por planta.	60
Figura 26. Representación fotográfica del ancho de abertura de las grietas en función del espesor de chapas, comparando ambas plantas. (A) NA espesor 2,6 mm. (B) Ho espesor 2,6 mm. (C) NA espesor 3,2 mm. (D) Ho espesor 3,2 mm.	61
Figura 27. Promedio del largo de la grieta por la calidad de la chapa por cada planta.	63

Figura 28. Representación fotográfica del largo de la grieta en función de la calidad de la chapa, comparando entre plantas. (A) NA 2,6 podada. (B) HO 2,6 podada. (C) NA 2,6 regular. (D) HO 2,6 regular.	64
Figura 29. Frecuencia de grietas con respecto a la humedad de chapas.	66
Figura 30. Comparación de tableros conformados con chapas de alta y baja humedad. (a) Línea de resina en toda la cara de las chapas	67
Figura 31. Resultados de mediciones promedios de lúmenes por zonas de medición para Nueva Aldea y Horcones.	69
Figura 32. Fotografías de las muestras con resultado de compactación positiva. (A) Muestra NA3,2RAH. (B) A2,6PAH.	70
Figura 33. Resultados de conteo de células compactadas por zona de medición.	71
Figura 34. Fotografía de la muestra A3,2PAH, ilustrando la compactación observada.	72
Figura 35. Representación efecto de compactación esperado en las chapas. Fuente: Cristián Barría, comunicación personal.	73

RESUMEN

Se realizó un estudio comparativo en las plantas de terciados Arauco (Nueva Aldea y Horcones) para determinar de las causas de la reducción de los niveles de adherencia asociada a la materia prima (rollizo) en los tableros contrachapados de *Pinus radiata* (D. Don). Este estudio se centró en la morfología de las grietas en las chapas de diferentes espesores y calidades. Se midieron la frecuencia, longitud, ancho y apertura de las grietas, realizando correlaciones entre variables. La segunda parte del estudio consistió en un análisis microscópico de la zona de compactación, caracterizando y relacionando un conteo de células compactadas y no compactadas producidas por la barra de compresión. Los principales resultados indicaron una relación entre el espesor de la chapa y la apertura de las grietas, siendo mayor en las chapas de Nueva Aldea. Además, se encontró una relación entre la forma de las grietas y la humedad de las chapas, con una alta frecuencia de la forma tipo 2 en ambas plantas. Las chapas de calidad podada presentaron un mayor largo de grietas, especialmente en Horcones y se encontró diferencia en Nueva Aldea entre la frecuencia de grietas con la humedad de chapas. El análisis de compactación superficial no mostró un nivel de compactación óptimo en ninguna de las plantas.

ABSTRACT

A comparative study was conducted at Arauco plywood plants (Nueva Aldea and Horcones) to determine the causes of reduced adhesion levels associated with the raw material (logs) in *Pinus radiata* plywood boards. This study focused on the morphology of lathe checks in veneers of different thicknesses and qualities. The frequency, length, width, and opening of the lathe checks were measured, and correlations between variables were performed. The second part of the study involved a microscopic analysis of the compaction zone, characterizing and relating a count of compacted and non-compacted cells produced by the compression bar. Main results indicated a relationship between veneer thickness and lathe check opening, with greater openings observed in the Nueva Aldea veneers. Additionally, a relationship was found between the lathe check shape and veneer moisture, with a high frequency of type 2 lathe checks in both plants. Veneers of pruned quality exhibited a longer lathe check length, particularly in Horcones. The cellular compaction analysis did not show an optimal level of compaction in either plant.

I. INTRODUCCIÓN

Según la norma Chilena NCh 724 Of.79 (INN, 1979), un tablero puede definirse como una placa fabricada con materiales como chapas, fibras, partículas, listones, entre otros. Estos tableros se clasifican en diversos tipos, y para los propósitos de esta investigación, el enfoque será específicamente en los tableros contrachapados, también conocidos como terciados o *plywood*. De acuerdo con la misma norma y Acevedo (2012), un tablero contrachapado se define como aquel que se forma mediante la superposición de láminas o chapas de madera secas, previamente encoladas con adhesivo fenólico o ureico, mediante un proceso de prensado en caliente.

Estas chapas se superponen formando un ángulo recto con sus fibras, este ordenamiento cruzado potencia la resistencia y la estabilidad del tablero (CORMA, 2016). Según Acevedo (2012), las chapas internas, o chapas cortas, tienen sus fibras perpendiculares al largo del tablero. Por otro lado, las chapas externas, o chapas largas, tienen la dirección de la fibra orientada en forma paralela a la longitud del panel, como muestra la Figura 1.

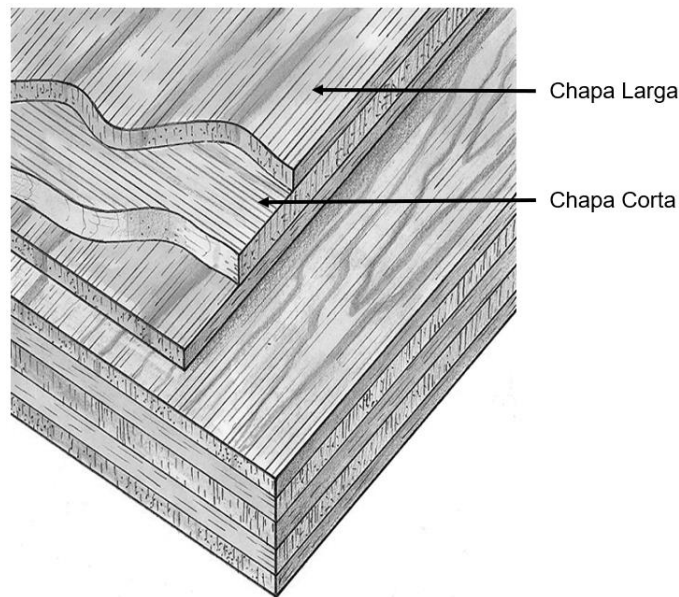


Figura 1. Orientación de las fibras para chapa corta y larga en tablero contrachapado. Fuente: Creación propia, imagen obtenida de Ayatecno (2016)

El resultado final es un tablero de alta resistencia mecánica a flexión, tracción y compresión (Acevedo, 2012; Rodríguez, 2018), además de tener un alto nivel de rigidez y gran estabilidad dimensional. Este tablero es fácil de trabajar con herramientas comunes y posee un acabado superficial libre de uniones, lo que lo hace adecuado para revestimientos, mueblería, moldaje y madera estructural (Rodríguez, 2018).

Los tableros contrachapados tienen diversos usos tanto estructurales, como de apariencia, como entablado diagonal, vigas doble T, vigas de cajón, tabiques soportantes, mueblería, revestimientos, pisos, entre otros. Además, ofrecen

ventajas sobre las soluciones tradicionales, como una mayor eficacia estructural y rendimiento económico superior en términos de fabricación y uso de horas hombre (CORMA, 2016).

Dependiendo del uso del tablero contrachapado, se determina la especie y calidad adecuadas. Los tableros no estructurales, incluidos los decorativos, suelen estar compuestos por chapas de especies latifoliadas (Gysling et al., 2021) como en el caso de Finlandia, donde la especie principal es *Betula pendula* Roth (Rohumaa et al., 2013). Otros tableros no estructurales se utilizan en lugares ocultos, como los fondos de cajones o como componentes de partes y piezas para la industria automotriz y naviera, por lo que se fabrican con maderas de menor calidad (Gysling et al., 2021).

Pinus radiata (D. Don) es la especie más empleada en la construcción debido a su disponibilidad actual y proyectada, así como por sus atributos físicos y su desempeño mecánico en estructuras (CORMA, 2016).

Las dimensiones estándar de los tableros son de 1,22 x 2,44 metros, y están disponibles en espesores que van desde los 3mm hasta los 25 mm. Durante el

2021, la producción nacional de tableros contrachapados (o *plywood*) alcanzó los 1,38 millones de metros cúbicos (Soto et al., 2022).

El proceso de fabricación de los tableros contrachapados consta de una serie de pasos esenciales, donde cada uno desempeña una función crucial para lograr un producto final de alta calidad. De acuerdo con el esquema propuesto por Rodríguez (2018), en la Figura 2 se representan estos pasos en el orden secuencial correspondiente.

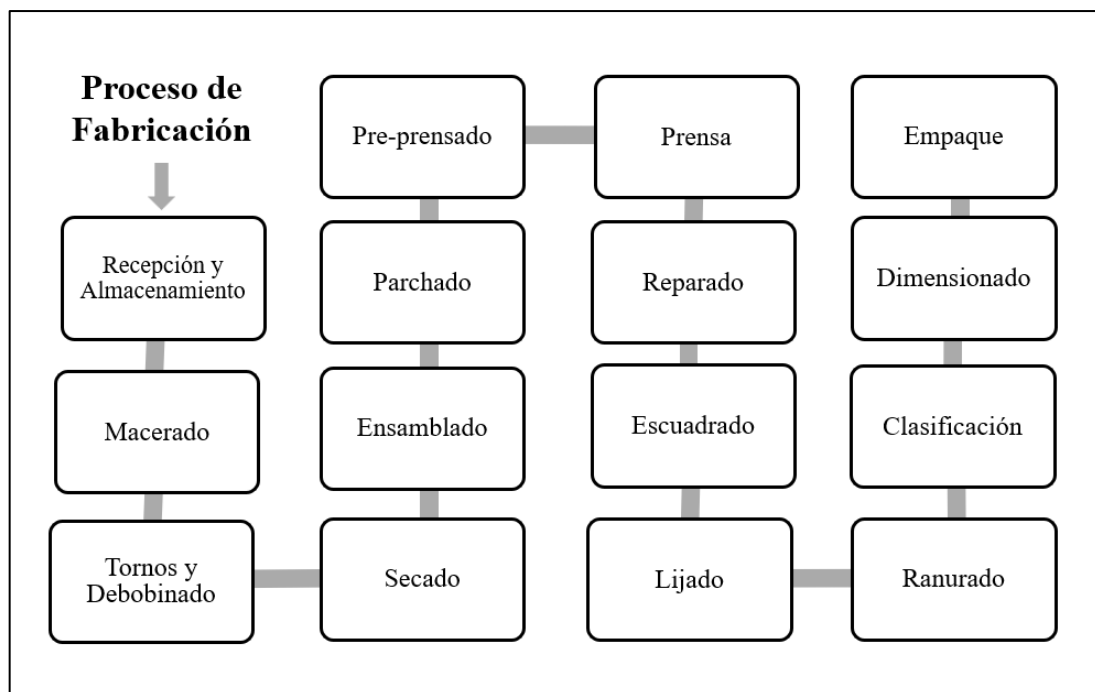


Figura 2. Diagrama del proceso de fabricación para los tableros contrachapados. Fuente: Elaboración propia.

En este esquema, se destaca el proceso de macerado, y como indica Rodríguez (2018), los rollizos descortezados se colocan en los túneles de macerado, que cuentan con un sistema que incluye intercambiador de calor y aspersores, con el fin de ablandarlos y hacerlos más plásticos mediante saturación con agua. Durante al menos 16 horas, se les aplica agua caliente a 80°C y una solución de soda cáustica para ajustar el pH a un nivel cercano a la neutralidad.

Además, en este esquema se destaca el proceso del debobinado, ya que constituye la etapa inicial para obtener el material básico utilizado en la producción, es decir, las chapas de madera. Durante el debobinado, se procesa de la madera proveniente de los tornos, que pueden tener tres longitudes diferentes: 4, 8 y 9 pies (1.2192, 2.4384 y 2.7432 metros, respectivamente).

El debobinado se lleva a cabo mediante tres rodillos móviles, donde el rollizo avanza a una alta velocidad controlada antes de entrar en contacto con el cuchillo dispuesto en un ángulo de corte específico (Rodríguez, 2018). Es fundamental mantener los rollizos en condiciones óptimas de humedad y temperatura para obtener chapas con espesores que van desde los 0,5 mm hasta los 10 mm, con y sin defectos (Nutsch, 2000 citado en Tapia, 2016).

El proceso debobinado, representado en Figura 3, genera un manto continuo de madera mediante un corte tangencial a los anillos de crecimiento. Para ello, se utiliza un cuchillo debobinador y una barra de presión. Esta última mantiene la chapa firmemente presionada sobre el cuchillo, garantizando así un corte estable y un espesor constante. En la chapa resultante, se distinguen dos caras: la “cara apretada”, que es aquella que se enfrenta a la barra, y la “cara suelta”, que es la que da al cuchillo (Acevedo et al., 2012).

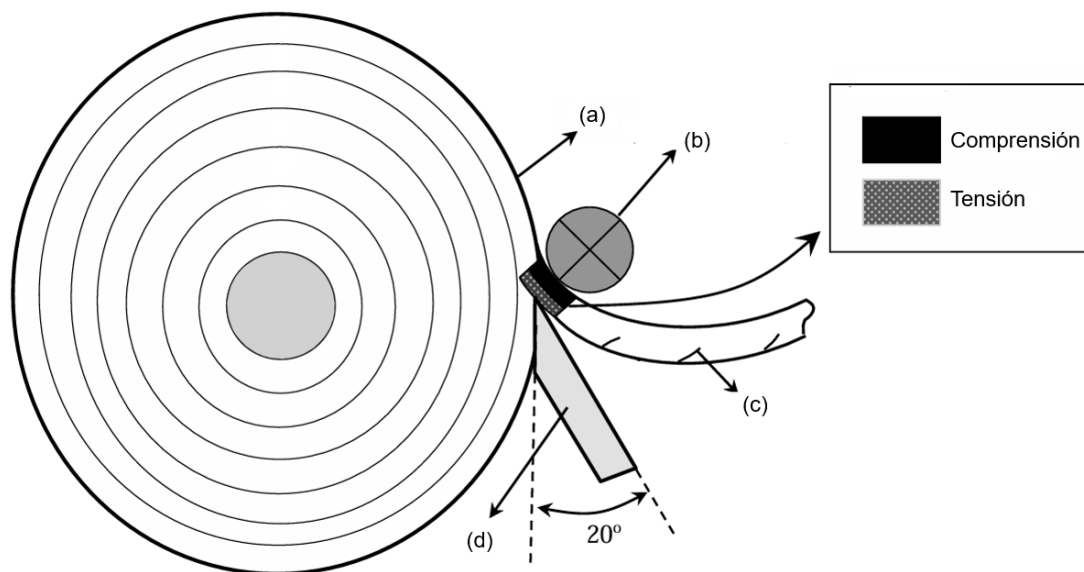


Figura 3. Proceso de debobinado: (a) Rollizo, (b) Barra de compresión (“cara apretada”), (c) Grieta producida por debobinado (d) Cuchillo (“cara suelta”). (Darmawan et al. 2015 en Rahayu et al. 2015)

Las modificaciones de las condiciones del proceso de debobinado, como la temperatura de la troza o variar la velocidad de debobinado, entre otros factores, causan cambios en las propiedades de la superficie de la chapa, como la

rugosidad y la humectabilidad (Bethel y Huffman, 1950; Aydin et al. 2006; Rohumaa et al., 2013).

El proceso de debobinado es crítico en la fabricación de tableros contrachapados, ya que las grietas derivadas del cuchillo debobinador pueden surgir debido a la fuerza de corte. Sin embargo, también existen factores previos que pueden contribuir a la formación o afectar la relación adhesivo-madera. Khoo et al. (2019) también vinculan estos defectos con características del árbol, como la especie, el diámetro, la calidad, la densidad de la madera, la porosidad, la estructura de la veta, y la edad de la madera juvenil y madura.

DeVallance (2003) afirma que las grietas se originan en la “cara suelta” cuando la fuerza de tensión del cuchillo separa la chapa de la barra de presión, aplanándola y eliminando su curvatura natural, lo que resulta una rugosidad significativa. Junto con ello, la formación de estas grietas varía según diversos factores, como la velocidad del torno, el afilado y el ángulo de la chuchilla, la presión aplicada en la barra, así como las condiciones de humedad y temperatura tanto de las trozas como de la maquinaria utilizada.

Estas grietas están estrechamente relacionadas con los fallos de la madera en los ensayos de cizallamiento de los tableros contrachapados, debido a

concentraciones de esfuerzos alrededor de las mismas, lo que puede llevar a una falla eventual del tablero y, por ende, afectar así sus propiedades mecánicas (Acevedo, 2012).

Neese et al. (2004) corroboran que la mayoría de las uniones de madera contrachapada mostraban tendencia a fallar a lo largo de la “cara suelta”. Este fenómeno se interpreta como una interacción entre las grietas y la rugosidad de la superficie, lo que afecta negativamente el rendimiento de la unión (Rohumaa et al., 2013).

En cuanto a la evaluación de la calidad de la chapa, según DeVallance (2003), se consideran varios aspectos como la variación del espesor, la rugosidad, y la profundidad y frecuencia de las grietas, siendo estas últimas dos características indicadoras claves de la calidad.

Además, el nivel de adhesión entre la chapa y el adhesivo, así como la resistencia al cizallamiento, reflejan la calidad de la chapa. Por lo tanto, una chapa de alta calidad se caracteriza por ser lisa, uniforme en espesor y relativamente apretada, es decir, libre de grietas profundas (Chow y Warren 1972 en DeVallance, 2003).

En las últimas producciones de tableros contrachapados de las Plantas de Terciados de Arauco se ha observado variaciones importantes en los valores de adherencia determinados, afectando la calidad del producto final obtenido, según las normas implementadas (Norma PS1-22, Americana ex PS1-19).

Bajo este contexto, se propone un estudio, en una primera instancia, a nivel de laboratorio, que busca caracterizar y evaluar de manera cuantitativa la soltura, e inactividad superficial y estimar la penetración potencial del adhesivo en chapa de *P. radiata*.

Se tiene como principal objetivo determinar de las causas de la variación de los niveles de adherencia asociada a la materia prima (rollizos) en los tableros contrachapados producidos en las plantas de terciados Arauco.

El objetivo general de este trabajo es determinar el efecto de la procedencia, tipo de rollizo, ubicación relativa y contenido de humedad de la madera en los niveles de adherencia de tableros contrachapados de pino radiata.

De este objetivo, se despliegan los siguientes objetos específicos:

1. Analizar la morfología de las chapas a través del estudio de tipo, frecuencia, longitud y ángulo de propagación de las grietas de debobinado (lathe checks).
2. Desarrollar una metodología para analizar la compactación superficial (cara y trascara) de las chapas, a través del estudio de la anatomía celular de la madera.

De acuerdo con ello, en este trabajo se lleva a cabo una caracterización de grietas, las cuales son un reflejo de calidad, que se presentan en las chapas de madera producidas en el proceso de debobinado. Y se realiza un análisis de compactación de la compactación superficial de estas mismas chapas.

II. METODOLOGÍA

2.1. Variables a considerar en la caracterización

Para este trabajo, se determinaron diversas variables que serían objeto de análisis en relación a las chapas de *Pinus radiata*. Estas variables se presentan y se describen en detalle a continuación:

2.1.1. Procedencia de producción

Las chapas a evaluar fueron producidas y obtenidas de dos lugares diferentes. El primer grupo de muestras provino de la Planta de Terciados Nueva Aldea, ubicada en la comuna de Ranquil, Región de Ñuble, mientras que el segundo grupo se obtuvo de la Planta de Terciados Arauco ubicada en el complejo Horcones, comuna de Arauco, Región del Bío-Bío. En la Figura 4 se puede observar la ubicación de cada una de las plantas. Ambas procedencias fueron consideradas para realizar un análisis comparativo en el estudio.

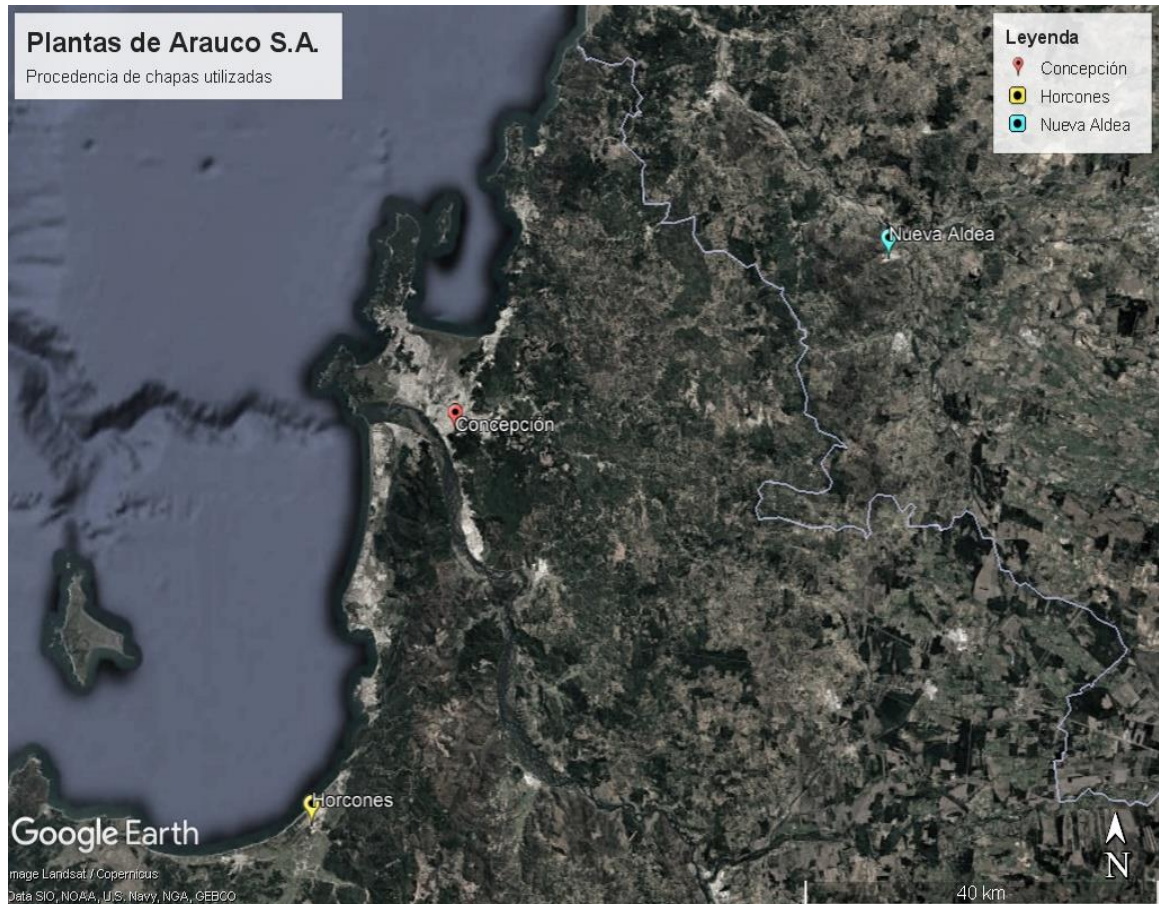


Figura 4. Ubicación de las plantas de procedencia de las chapas utilizadas.
Fuente: Elaboración Propia.

2.1.2. Tipo de rollizo

En ambas plantas, se procesan rollizos debobinables de diámetro medido en la sección transversal menor del rollizo en el rango 24 a 70 cm y largo 2,65 m. En esta investigación, se compararon dos tipos de calidad de rollizo: podados y no podados (regulares). Esta distinción permitió evaluar si la poda o la falta de poda podría ser un factor relevante en la formación de grietas en las chapas. Es de

importancia destacar que para la selección de rollizos para el debobinado se desarrolló de manera aleatoria, pero concentrado en las clases diamétricas de 32 a 36 cm. Esta estrategia de muestreo garantizó la representatividad y evitó sesgos en la muestra.

2.1.3. Ubicación relativa de las chapas

La selección se realizó considerando la ubicación relativa radial de las chapas en el rollizo. Como ilustra la Figura 5, se diferenciaron dos grupos: las chapas provenientes de la madera lateral o semi-lateral, caracterizadas por tener un mayor contenido de humedad (Alta Humedad - AH), y una mayor densidad de la madera, y las chapas que provienen de la parte central del rollizo, con un contenido de humedad y densidad más baja (Baja Humedad - BH). Durante los muestreos, se recolectaron un total de diez chapas por cada ubicación relativa (e.g. AH).

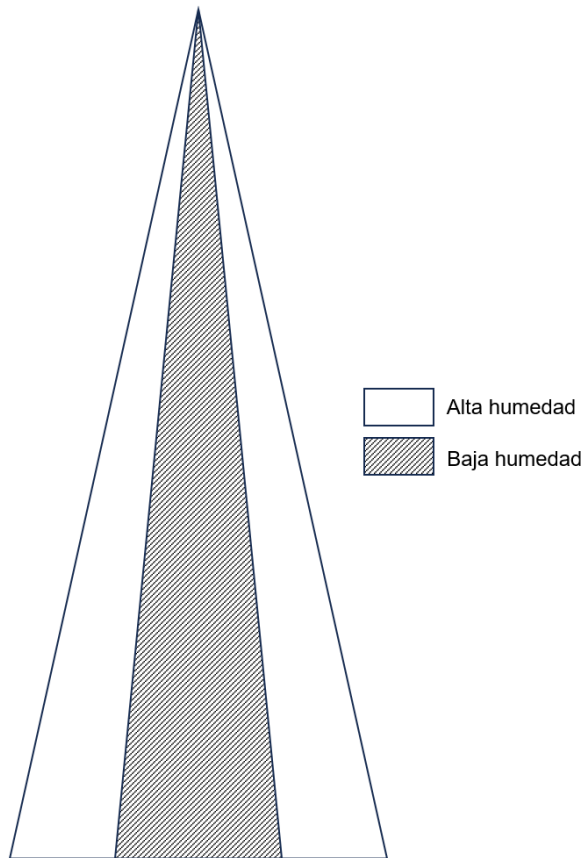


Figura 5. Procedencia de contenido de humedad (AH o BH) de chapas según ubicación relativa en la troza. Fuente: Elaboración propia

2.1.4. Contenido de humedad de la madera

De las diez muestras tomadas en cada ubicación relativa, se seleccionaron, al azar, cinco chapas que se mantuvieron en su estado verde, es decir, recién salidas del proceso de debobinado y conservando su humedad original, utilizando un film envolvente y dejándolas en una cámara de frío. Las otras cinco chapas, fueron inmediatamente, sometidas al proceso de secado operacional en cada

planta, reduciendo así su contenido de humedad hasta los niveles medios de 8 a 10%.

2.1.5. Espesor de la chapa

Para el muestreo, se consideraron dos espesores de chapa: 2,6 mm y 3,2 mm, respectivamente.

A continuación, en la Tabla 1, se muestra un resumen del diseño de muestreo y evaluación llevado a cabo en las Plantas de Terciados Nueva Aldea y Horcones.

Tabla 1. Diseño de muestreo y evaluación

Procedencia Pino radiata	Tipo rollizo	Posición radial chapa	Contenido Humedad Chapa	*Espesor Chapa (mm)	**Frecuencia Muestreo Chapas	Réplicas (n) ^{***}	Muestras totales
Planta 1	Podado	AH	Verde	2	2	5	20
			Seca	2	2	5	20
		BH	Verde	2	2	5	20
			Seca	2	2	5	20
	Regular	AH	Verde	2	2	5	20
			Seca	2	2	5	20
		BH	Verde	2	2	5	20
			Seca	2	2	5	20
Planta 2	Podado	AH	Verde	2	2	5	20
			Seca	2	2	5	20
		BH	Verde	2	2	5	20
			Seca	2	2	5	20

Regular	AH	Verde	2	2	5	20
		Seca	2	2	5	20
	BH	Verde	2	2	5	20
		Seca	2	2	5	20
Total				64	80	320

*Chapa 2,6 y 3,2 mm **Frecuencia muestreo toma muestras martes y jueves de la semana productiva. **Se seleccionaron, al azar, 3 de las 5 chapas muestreadas para análisis morfológico y anatómico.

En la tabla anterior, se detallan las variables analizadas, incluyendo la procedencia de producción de los rollizos, el tipo de rollizo (podado o regular), la ubicación relativa radial de las chapas (alta humedad o baja humedad), el contenido de humedad (verde o seco) y los dos espesores de las chapas (2,6 mm y 3,2 mm).

Este diseño riguroso de muestreo y evaluación permitió obtener la base de datos para el análisis de la morfología de las chapas y la compactación superficial.

2.2. Información de parámetros operacionales

Para garantizar que el proceso productivo en ambas plantas mantuviera parámetros operacionales consistentes, se desarrolló e implementó un protocolo para el muestreo. Este protocolo se diseñó con el propósito de asegurar la uniformidad de los datos obtenidos en ambas plantas.

Este protocolo consideró los siguientes procesos operacionales:

2.2.1. Riego

Los rollizos utilizados en la investigación fueron seleccionados al azar desde la cancha de almacenamiento y se mantuvieron durante al menos tres días bajo condiciones de riego homogéneo. Esto aseguró que los rollizos tuvieran un contenido de humedad uniforme antes de continuar con el proceso.

2.2.2. Macerado

Los rollizos pasaron por un periodo de dieciséis horas en una cámara de maceración tipo ducha. La temperatura de ambas plantas fue mantenida a niveles operacionales, es decir, a 80°C de agua caliente.

2.2.3. Debobinado

Las chapas obtenidas de este proceso fueron recogidas veinte minutos después del cambio operacional de cuchillos, con el propósito de simular de la mejor manera posible el proceso normal de producción en ambas plantas.

Las pilas de chapas seleccionadas fueron identificadas con pintura en aerosol con la oración “Pila-Estudio Tesis” y dejadas en un sector definido bajo resguardo de uso. En cada planta se rescató el diagrama de humedad de chapas obtenidas,

registrando los porcentajes de humedad y gráficos correspondientes (temperatura y humedad).

2.2.4. Secado

El proceso de secado de las pilas fue operacional, es decir, utilizando los programas de secado definidos para cada espesor (2,6 mm y 3,2 mm) y contenido de humedad (AH y BH) de la madera. En este caso, también fue rescatado los programas utilizados en cada planta, como también los valores de temperatura, presión y humedad de la zona de secado empleado en las chapas.

2.2.5. Dimensionadora

De cada chapa seleccionada de dimensiones 1200 x 2650 mm, se extrajo una submuestra de dimensiones 600 x 600 mm desde la parte central de esta como muestra la Figura 6. Las chapas dimensionadas fueron identificadas con lápiz indeleble y embaladas con film, para evitar la pérdida de humedad de estas.

Posteriormente fueron llevadas hasta el laboratorio de maderas de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción y las chapas en verde se mantuvieron en refrigeración para evitar pudrición.

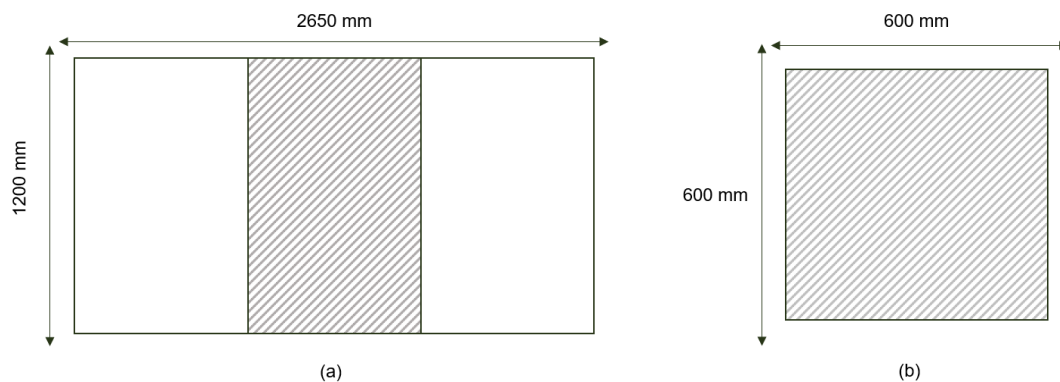


Figura 6. Esquema de corte para chapa larga para la obtención de probetas: (a) Sección central seleccionada para chapas obtenidas en planta. (b) Submuestra de chapa obtenida de la dimensionadora.

2.3. Preparación de muestras

En el laboratorio de maderas de la Facultad de Ciencias Forestales, se llevó a cabo la preparación de las muestras para el análisis morfológico macroscópico y para el análisis de compactación microscópico.

Las 320 muestras, cada una con dimensiones de 600 x 600 mm, fueron cuidadosamente cortadas utilizando un cutter de cuchillas estándar y siguiendo el esquema de corte proporcionado en la Figura 7. Mediante este proceso, se obtuvieron probetas rectangulares de 30 x 200 mm, que fueron utilizadas para llevar a cabo la caracterización de las grietas de debobinado por medio del análisis morfológico.

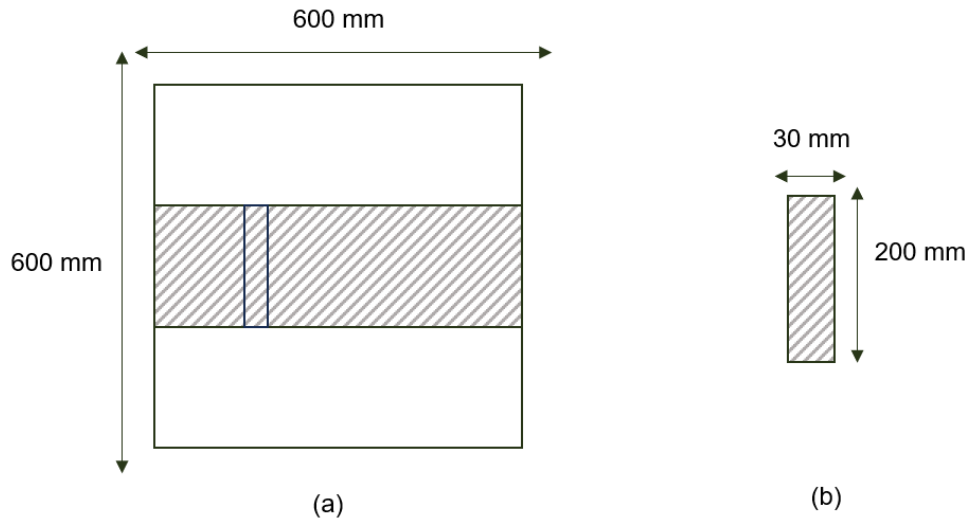


Figura 7. Esquema de corte para análisis morfológico: (a) Selección de la zona central de la submuestra obtenida en la dimensionadora. (b) Corte central de la submuestra para la obtención de probetas.

Por otro lado, como se muestra en el esquema de la Figura 8, se seleccionó una porción central de la chapa de 600 x 600 mm para realizar el análisis microscópico de compactación superficial, de la cual se extrajo un cuadrado de 100 x 100 mm. Posteriormente, se procedió a cortar un cuadrado más pequeño de 10 x 10 mm a partir de esta muestra central. Para este análisis, solo se utilizaron las muestras que pasaron por el proceso de secado en las plantas.

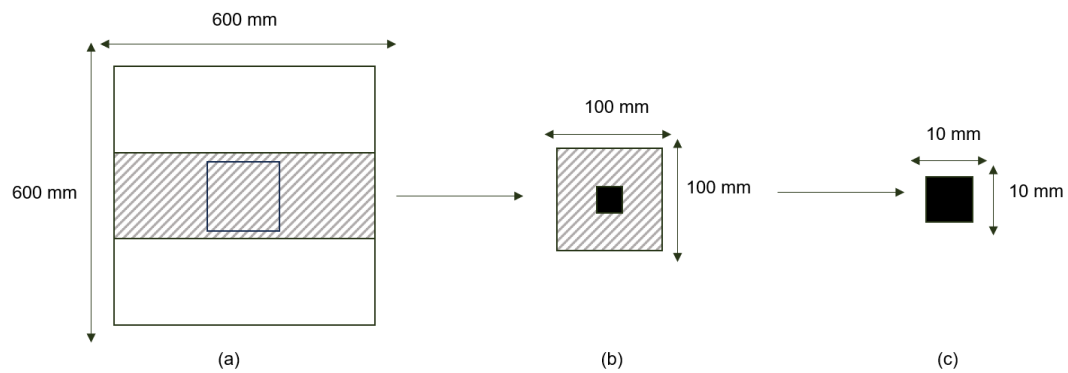


Figura 8. Esquema de corte para análisis microscópico: (a) Selección de la zona central de la submuestra obtenida en la dimensionadora, (b) Corte central dentro de la submuestra. (c) Muestra para análisis de compactación superficial.

2.4. Densidad y Contenido de Humedad

Para cada chapa en verde obtenida en el muestreo, se apartaron seis secciones de la muestra seleccionada de dimensiones de 30mm x 50 mm, como se muestra en la Figura 9. Estas con el fin de realizar mediciones del contenido de humedad y la determinación de densidad. Los datos fueron obtenidos para todas las chapas muestreadas de cada planta, permitiendo así realizar una comparación entre las muestras provenientes de distintas plantas.

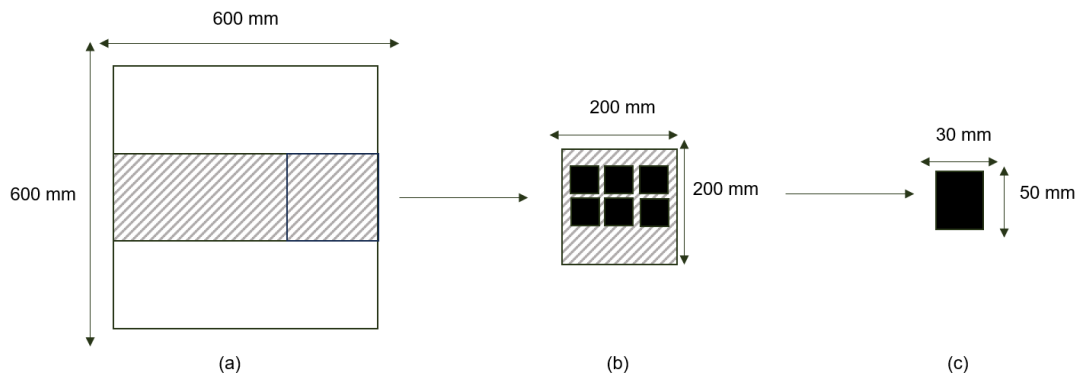


Figura 9. Esquema de cortes para Contenido de humedad y Densidad: (a) Selección de la zona central de la submuestra obtenida en la dimensionadora, (b) Seis cortes provenientes la submuestra, tres para cada análisis y (c) Dimensión de cada muestra.

Para determinar el contenido de humedad, se siguió la Norma NCh 176/1 (INN 1986), donde inicialmente, las muestras recién cortadas fueron pesadas en una balanza y luego colocándolas en un horno a una temperatura de 70°C por 24 horas. Una vez completamente secas y frías, las muestras fueron pesadas nuevamente. Utilizando estos datos, se calculó el contenido de humedad aplicando la fórmula 1, obteniendo el resultado en %.

$$CH = \frac{P_H - P_0}{P_0} \times 100 \quad (1)$$

Donde,

CH corresponde a Contenido de Humedad (%)

P_H corresponde a peso húmedo (gr)

P_0 corresponde a peso anhidro (gr)

Por otro lado, para obtener la densidad, se utilizó el método de inmersión en agua según la Nch176/2 (INN, 1988). Para este proceso, primero se debe lograr la saturación completa de las tres secciones restantes, sometiéndolas a un periodo de inmersión aproximada de tres semanas a un mes.

En segundo lugar, las muestras se sumergen en un vaso precipitado, sobre una balanza, que contiene agua de peso conocido. Estas se colocan en soporte para facilitar su inmersión y asegurando un proceso controlado (Figura 10). Finalmente, las muestras saturadas se introducen en el horno, utilizando una temperatura igual a 70°C por 48 horas. Posteriormente, la muestra anhidra se volvió a pesar en la balanza. Con estos datos se hizo la siguiente relación (Formula 2):

$$\delta = \frac{P_s}{P_0} \times 1000 \quad (2)$$

Donde:

δ corresponde a densidad (kg/m³)

P_s corresponde a peso saturado (gr)

P_0 corresponde a peso anhidro (gr)



Figura 10. Ilustración del método de inmersión en agua aplicado en chapas.

2.5. Análisis morfología de las chapas

Para determinar la morfología de las grietas, se siguió la metodología descrita por Acevedo et al. (2012), con algunas modificaciones específicas adaptadas a las características de las muestras obtenidas en esta investigación.

Se fabricaron dos piezas de impresión 3D con forma de semi circunferencia de radio 15 cm y aperturas de 3,2 y 2,6 mm, tal como se muestra en la Figura 11. Estas piezas se utilizaron como soporte para las probetas de 30 x 200 mm con el fin de exponer de manera óptima las grietas presentes en ellas.

Las probetas junto con los soportes se llevaron al laboratorio de Patología Forestal, donde se observaron bajo una lupa equipada con cámara digital MOTIC. Las imágenes fueron capturadas y procesadas utilizando el programa MOTIC Images Plus 3.0.

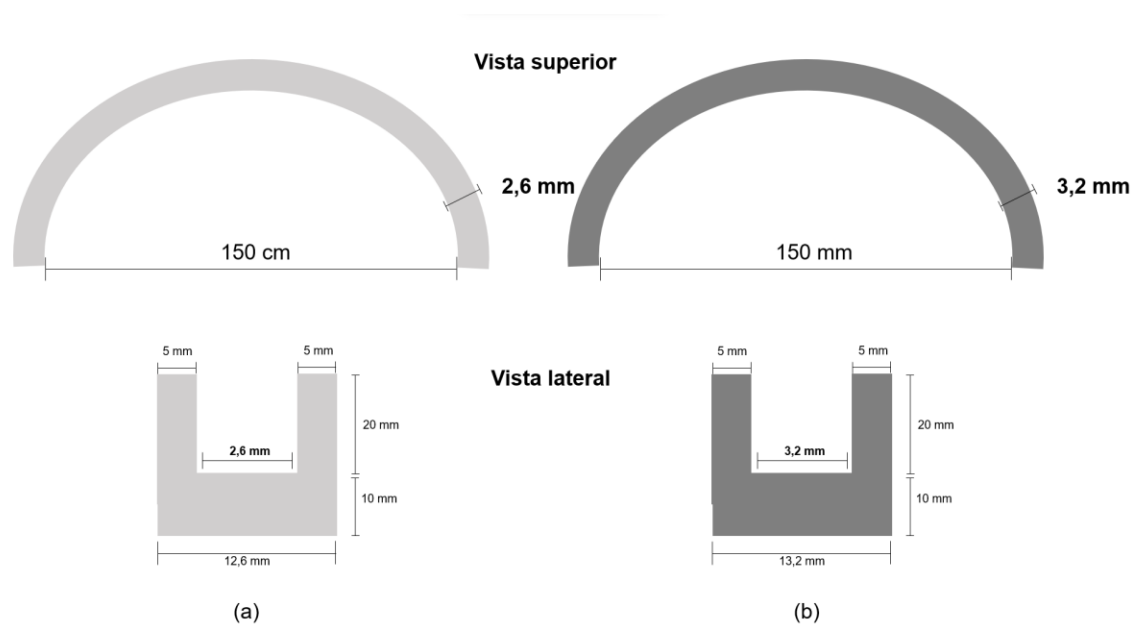


Figura 11. Vista superior y lateral de los soportes en el análisis morfológico: (a) Soporte para chapas de 2,6mm de espesor. (b) Soporte para chapas de 3,2 de espesor.

Para el análisis, se seleccionaron al azar tres de las cinco chapas muestreadas de cada categoría y se obtuvieron tres fotografías de cada probeta, correspondientes al centro y a los extremos. Durante la captura de imágenes, se utilizó una magnificación de 2x. En las imágenes capturadas, se realizaron

mediciones del tipo, frecuencia, longitud, apertura y ángulo de propagación de las grietas.

2.5.1. Tipo de grietas

Se identificaron cinco tipos de grietas mediante la observación de formas repetidas en las imágenes a través de la lupa. Estos tipos de grietas se esquematizan en la Figura 12.

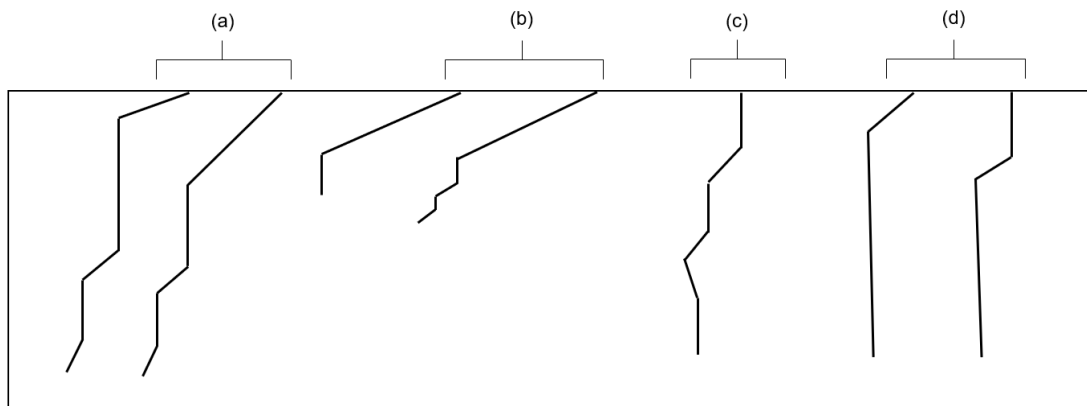


Figura 12. Tipos de grietas identificadas: (a) Grietas del tipo 1, (b) grietas tipo 2. (c) grieta tipo 3 y (d) grietas del tipo 4.

A continuación, se detalla el tipo de grietas identificadas y sus características más importantes:

- a) Grietas tipo 1: Estas son grietas que se asemejan a una “escalera” en su forma y son profundas en su mayoría.

- b) Grietas tipo 2: Estas grietas no son tan profundas como el tipo anterior. Se caracterizan por ser diagonales y tener una terminación recta o similar a una “escalera” en la punta
- c) Grietas tipo 3: Estas grietas son rectas y perpendiculares a la parte superior de la chapa.
- d) Grietas tipo 4: Estas grietas se caracterizan por tener un inicio corto y una terminación profunda y recta.

2.5.2. Frecuencia de grietas

Para determinar la frecuencia de grietas en las chapas que corresponde a la presencia de grietas por unidad de área, se realizó el conteo de todas las grietas en el área de observación de la lupa siendo este de 5,6 mm.

2.5.3. Longitud y ancho de grietas

Para determinar la longitud de las grietas, se midió desde el comienzo de la grieta en la parte superior de la chapa hasta su finalización, siguiendo el curso natural de la grieta, tal como se muestra en la Figura 13. El resultado se expresó en micrómetros (μm).

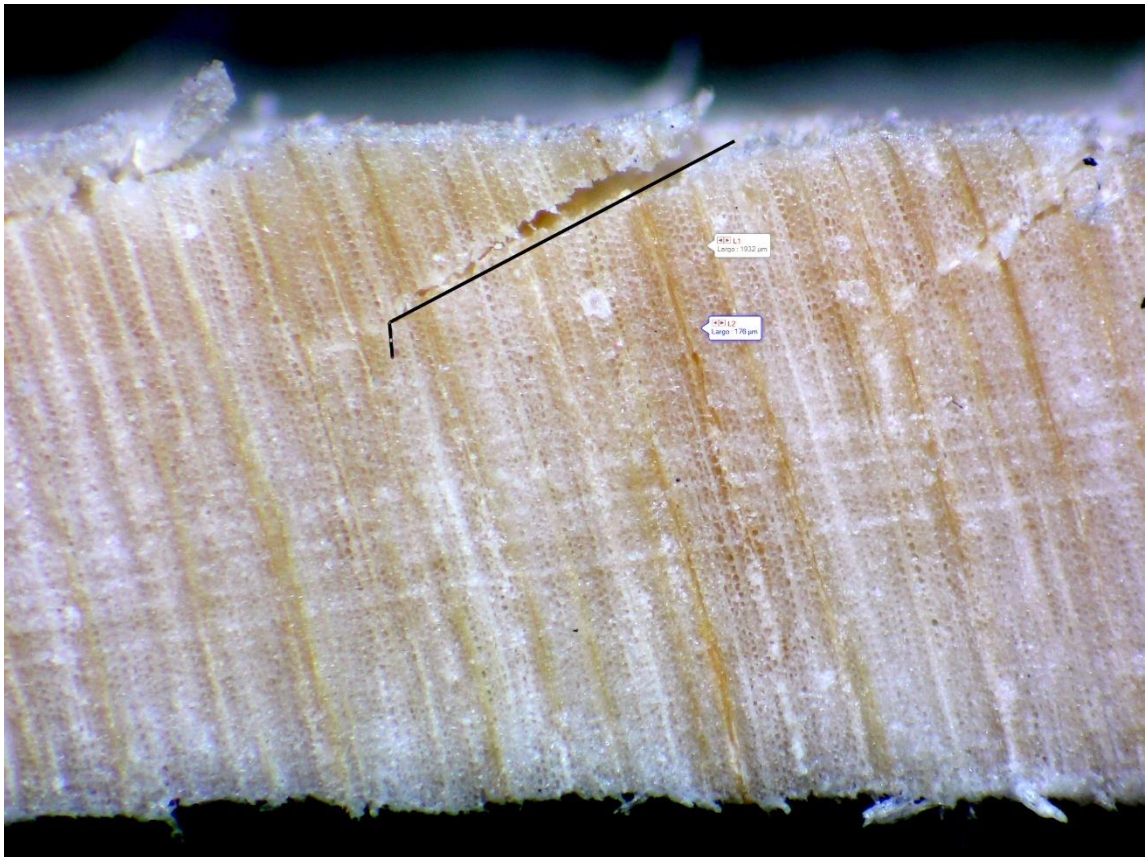


Figura 13. Imagen ilustrando la medición de longitud de grietas.

Para medir el ancho de las grietas, se midió desde la parte superior hasta el final de grieta, pero esta vez de manera recta y tangencial a la chapa como muestra la Figura 14. Este valor también se expresó en micrómetros (μm).

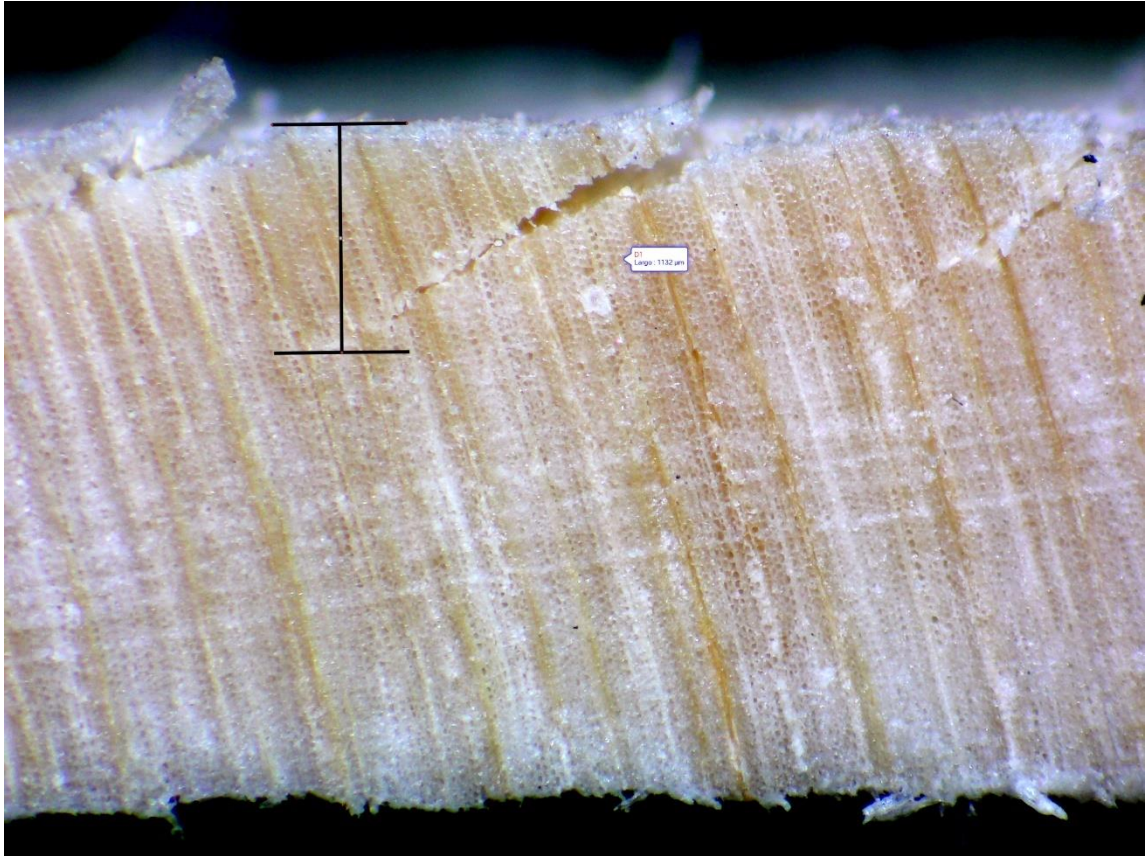


Figura 14. Imagen ilustrando la medición del ancho de grietas.

2.5.4. Apertura de grietas

Para medir la apertura, se midió en la parte superior de la chapa desde el punto donde esta deja de ser continua, es decir, desde el inicio de la grieta hasta el punto donde la chapa retoma su continuidad. Este procedimiento se ilustra en la figura 15.

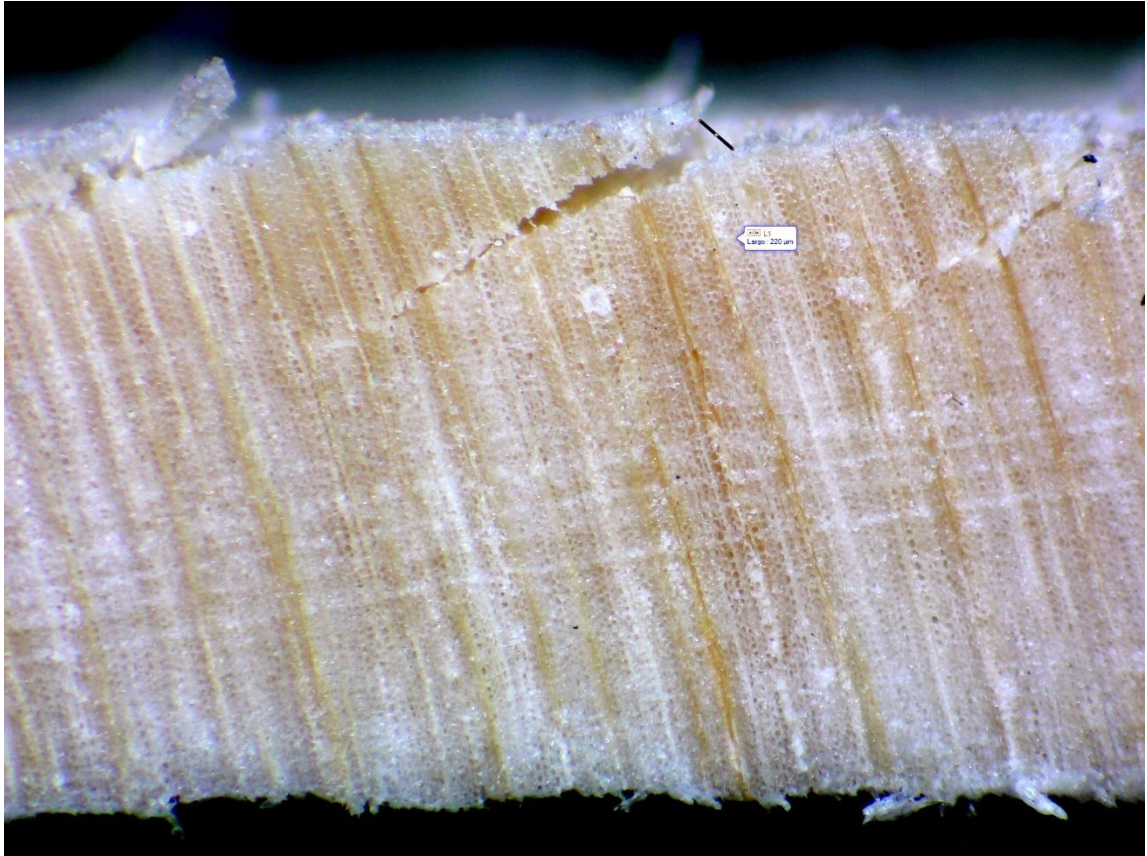


Figura 15. Imagen ilustrando la medición de apertura de la grieta.

2.5.5. Ángulo de propagación de grietas

Para medir el ángulo de propagación, se tomó en cuenta el ángulo del cuchillo del proceso de debobinado y se midió de la parte superior de la chapa justo en el punto donde la grieta comienza, como se muestra en la Figura 16.

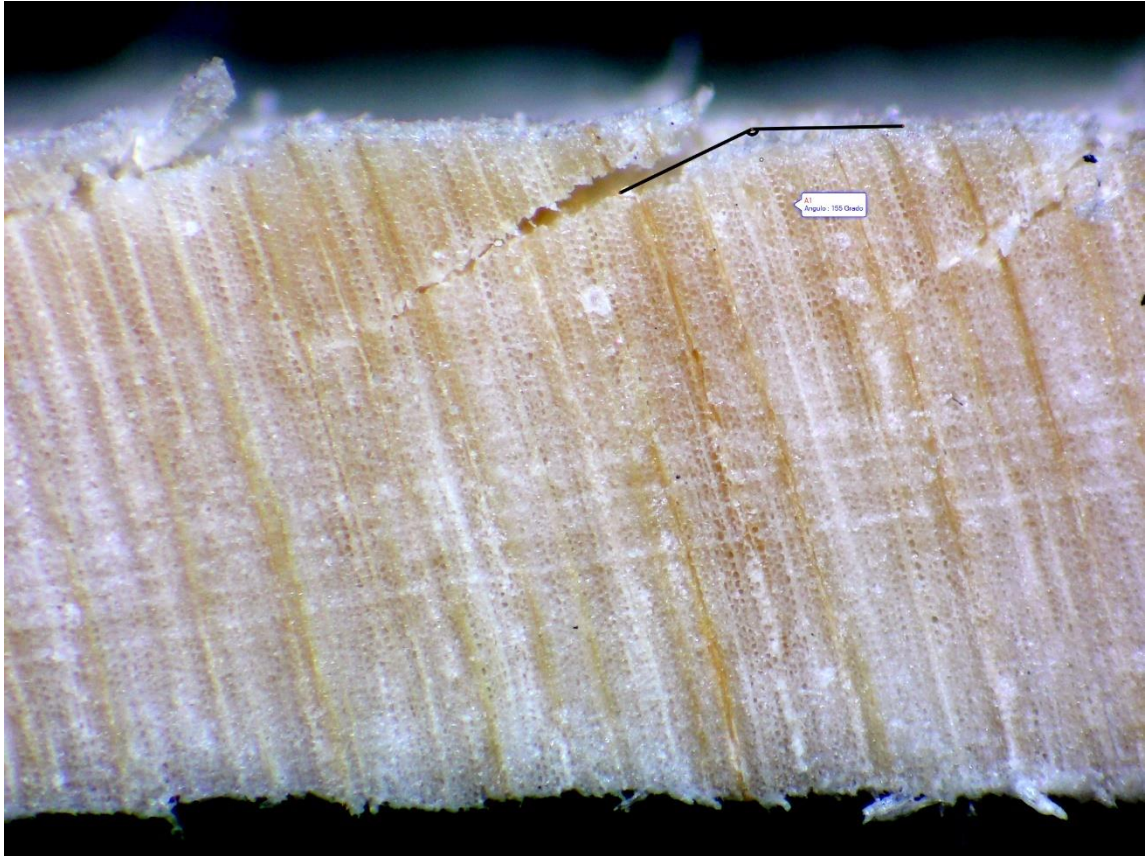


Figura 16. Imagen ilustrando la medición de ángulo de propagación de la grieta

2.6. Análisis compactación superficial

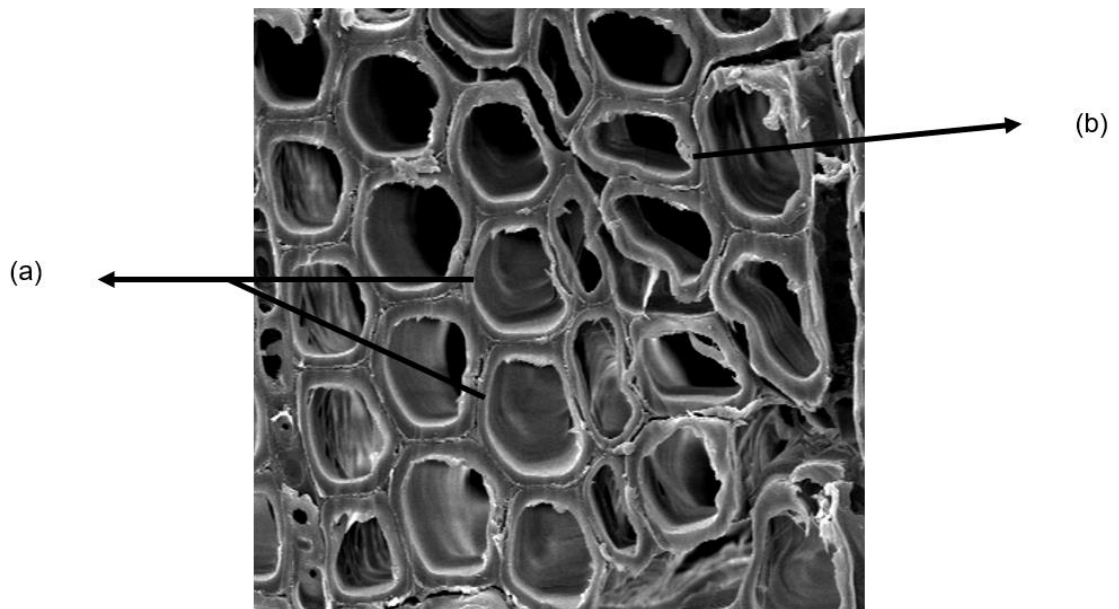
2.6.1. Preparación de muestras

Para la caracterización y el análisis de la morfología superficial de las chapas seleccionadas, se utilizó la técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM) disponible en el Centro de Microscopía Avanzada de la Universidad de Concepción (CMA). Las muestras fueron preparadas de acuerdo con lo descrito

en el punto 2.3. Específicamente, se tomaron muestras secas de 1x1 cm y se realizaron cortes transversales microtomizados, en la dirección del espesor de la chapa, con el fin de obtener cortes lo más limpio posibles.

2.6.2. Definición de Célula Compactada

Durante la revisión de fotografías, se consideró importante definir claramente las diferencias entre una célula compactada y una célula no compactada. En la Figura 17 se presenta esta distinción, fundamental para el análisis.



Fotografía de la muestra NA2,6PAH

Figura 17. Células de referencia para diferenciación de células compactadas y no compactadas. (a) Células no compactadas. (b) Células compactadas

Una célula no compactada (a) se caracteriza por mantener su morfología normal, presentando una forma cuadrada u ovalada sin deformaciones y conservando su integridad estructural. Por otro lado, una célula compactada (b) se identifica por evidentes deformaciones y aplastamiento, lo que sugiere que ha sido sometida a fuerzas de compresión significativas.

2.6.3. Medición de muestras

La medición de muestras se realizó en la zona de compresión de la chapa, como se explica en la Figura 18. Esta zona corresponde al área en la que la barra de compresión ejerce presión contra el cuchillo durante el corte de la chapa. En las imágenes proporcionadas el Centro de Microscopía Avanzada (CMA), se midieron dos parámetros clave: el ancho del lumen celular en la zona de compresión y el conteo de células compactadas.

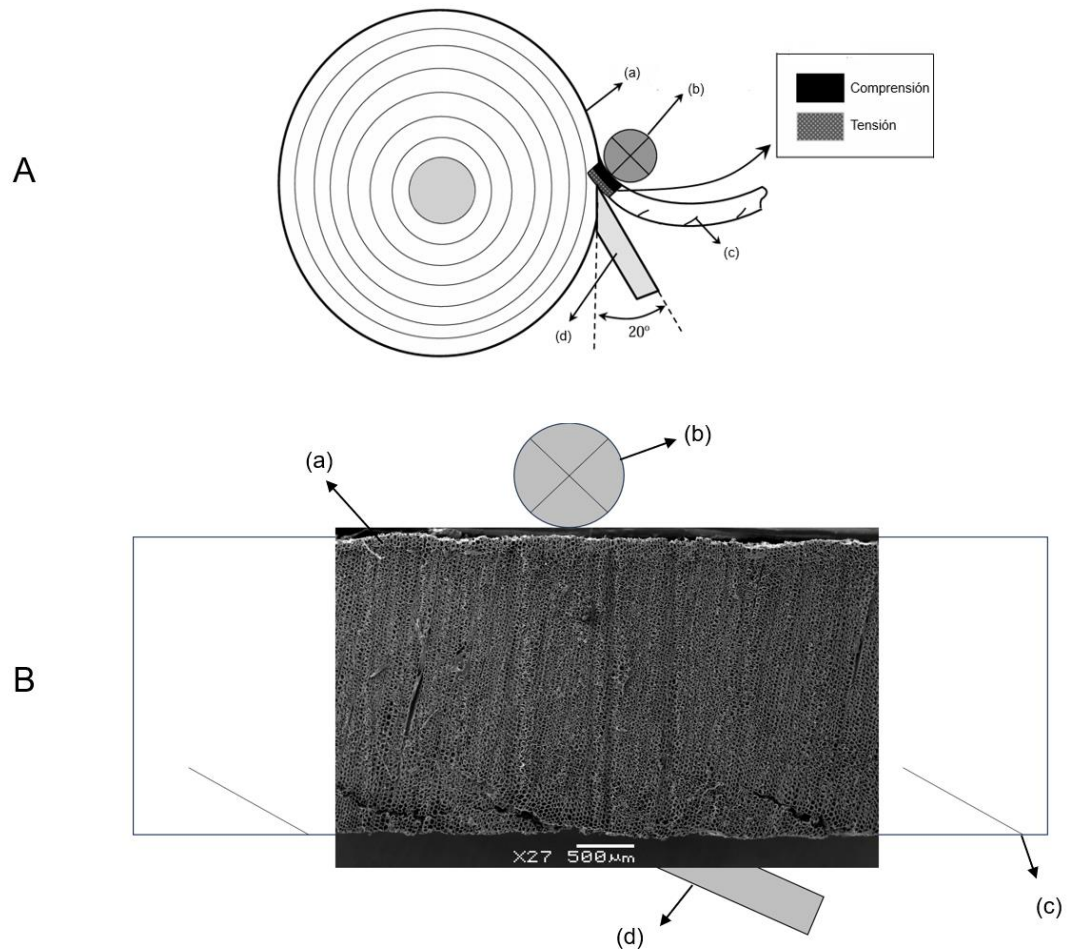


Figura 18. Zona de medición en fotografías obtenidas por SEM. (A) Imagen macroscópica de la obtención de la chapa. (B) Imagen SEM de la obtención de la chapa. (a) Rollizo, (b) Barra de compresión, (c) grieta formada por el cuchillo, (d) Cuchillo.

2.6.3.1. Medición del Ancho de Lumen Celular

Para llevar a cabo estas mediciones, se seleccionaron tres zonas en la fotografía, ubicadas de manera estratégica en relación con las grietas: en el

lado izquierdo, el centro y el lado derecho. Esta selección se realizó con el objetivo de obtener resultados más representativos. Tal como ilustra la Figura 19, en cada una de las zonas se realizaron mediciones de tres filas, cada una compuesta de cinco células. Se asumió que, si el promedio del tamaño celular en la fila 1 era menor que el promedio de la fila 2, y este a su vez era menor que en la fila 3, se podía inferir la presencia de una compactación celular ($1 < 2 < 3$).

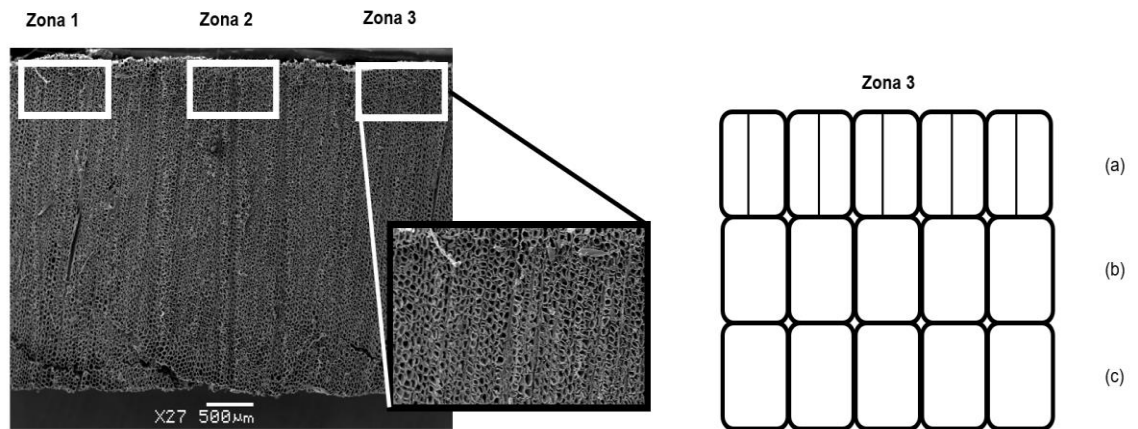


Figura 19. Forma de medición de fotografías de compactación. (a)Sección 1. (b) Sección 2. (c)Sección 3.

2.6.3.2. Conteo de células compactadas

De la misma manera, se seleccionaron tres zonas al lado contrario de las grietas, donde se realizó un conteo de células compactadas y no

compactadas. Las células compactadas fueron identificadas con un valor de 1 y mientras que las células se identificaron con un 0. Para determinar la existencia de compactación, se estableció que, si la frecuencia de células compactadas de la primera línea era mayor que la segunda, y esta a su vez es mayor que la tercera ($1 > 2 > 3$), se consideraba que había compactación celular. Como se ilustra en la Figura 20 (B), si la línea 1 contiene tres células compactadas, la línea 2 tiene dos, y la línea 3 una, se confirmaría la compactación de la zona. Este procedimiento de conteo se repitió en las tres zonas seleccionadas para asegurar la representatividad de los resultados.

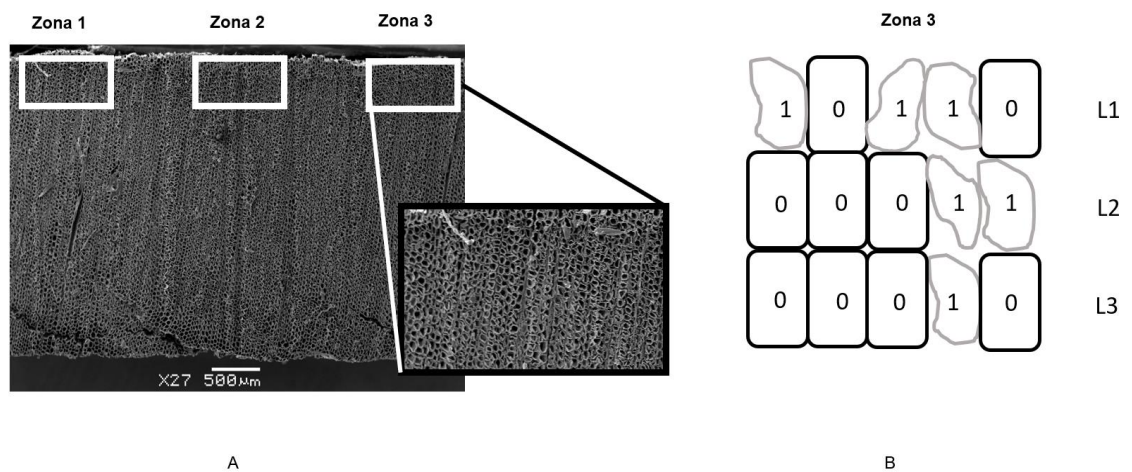


Figura 20. Esquematización del conteo de células compactadas. (A) Delimitación de zonas. (B) Identificación de células compactadas y no compactadas en Línea 1, 2 y 3.

2.7. Análisis de los datos para morfología de chapas

Para realizar el análisis estadístico de los datos obtenidos, se aplicaron varios métodos. En primer lugar, se realizó una prueba de normalidad de Kolmogorov con un p valor establecido en 0,05 para determinar si las variables seguían una distribución normal. Posteriormente, se aplicó la prueba de Mann-Whitney para comparar las diferencias entre grupos, evaluando la normalidad y la homogeneidad de las varianzas.

Además, se aplicó una correlación de Spearman para investigar las posibles relaciones entre todas las variables medidas, que incluyen la frecuencia, forma, apertura, largo, profundidad y ángulo de las grietas, con los otros factores de las chapas, como estado (verde o seca), espesor (3,2 mm o 2,6 mm), calidad (podado o no podado) y humedad (alta o baja).

Además, dado que la variable “forma” es cualitativa, se aplicó una prueba de Chi-cuadrado para evaluar su asociación con otras variables. Ello permitió determinar relaciones significativas con los otros factores del estudio.

Los resultados fueron analizados mediante pruebas de significancia con un nivel de confianza del 95%. Las correlaciones significativas se identificaron utilizando un $p < 0,05$ y teniendo en consideración el coeficiente de correlación de Spearman (ρ) para evaluar la fuerza y dirección de las asociaciones entre las variables.

Para el caso de la variable “Forma” se utilizó *Cramer's V*.

Los análisis estadísticos se llevaron a cabo utilizando el software R-studio.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Contenido de Humedad y Densidad

En la Figura 21, se presenta la comparación del promedio de contenido de humedad obtenido en el laboratorio con la variable humedad de la chapa (alta o baja) según su origen (Horcones o Nueva aldea). Se observa que las chapas de alta humedad en Horcones tienen un promedio del 120,5%, mientras que en Nueva Aldea es del 125,1%. Respecto a la desviación estándar, se registra un valor de 22,07 para Horcones y 27,52 para Nueva Aldea.

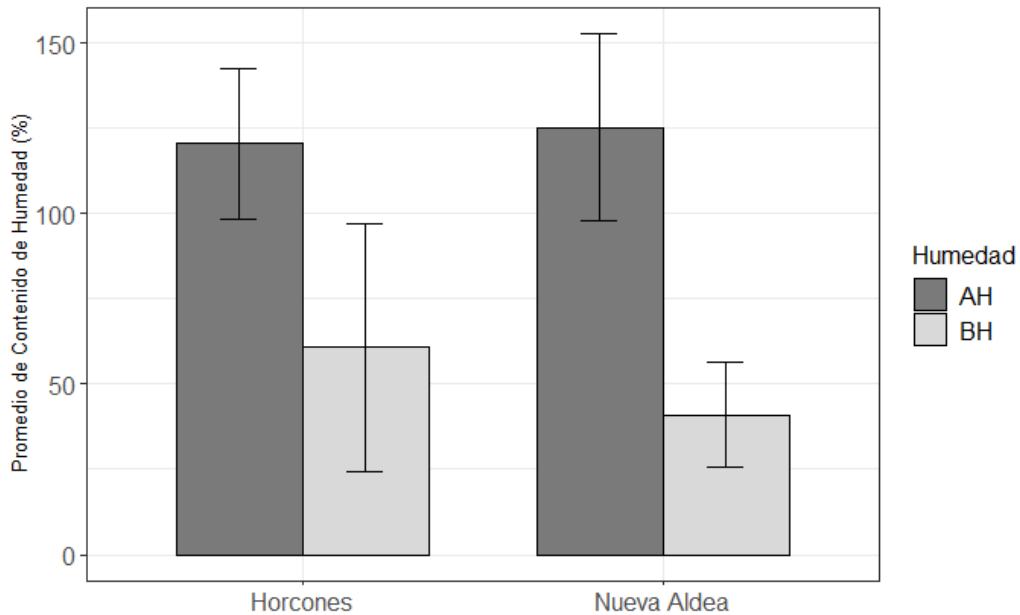


Figura 21. Comparación de promedios del contenido de humedad entre las plantas de Horcones y Nueva Aldea.

Por otro lado, en cuanto a las chapas de baja humedad, se encontró que en Horcones el promedio es de 60,7%, mientras que en Nueva Aldea es del 40,3%. En este caso, la diferencia es significativa, ya que la desviación estándar es de 36,35 y 15,36 para Nueva Aldea.

Se observa que no hay diferencias significativas entre las chapas de alta humedad entre ambas plantas. Sin embargo, si existe una diferencia en las chapas de baja humedad. Esta diferencia podría indicar una variabilidad en el proceso de debobinado, que depende directamente del contenido de humedad inicial de las trozas. Es posible que exista algún inconveniente en el proceso de riego en la planta, afectando el contenido de humedad de las chapas.

En la Figura 22 se presenta la comparación de los promedios de densidades entre las plantas de Horcones y Nueva Aldea. Los resultados muestran que la densidad promedio de alta humedad en Horcones es de 375,7 kg/m³, mientras que para las chapas de baja humedad es de 363,0 kg/m³, con desviaciones estándar de 24,3 y 23,0, respectivamente. En comparación, Nueva Aldea presenta una densidad de 372,2 kg/m³ para chapas de alta humedad y de 367,0 kg/m³ para las de baja humedad. Las desviaciones estándar en Nueva Aldea también muestran diferencias mínimas (24,3 y 23,0 respectivamente). Estas diferencias en las densidades entre plantas y los estados de humedad son relativamente pequeñas, sugiriendo una similitud entre ellas.

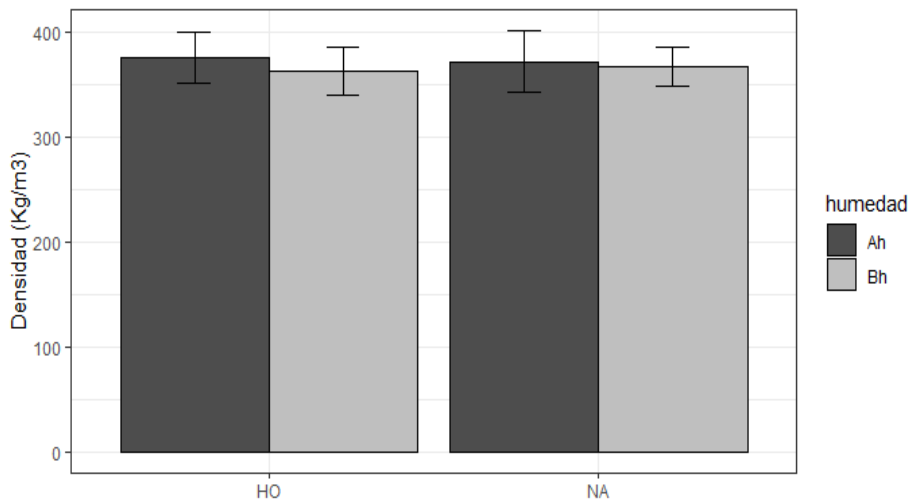


Figura 22. Comparación de densidades entre las plantas de Horcones y Nueva Aldea.

3.2. Resultado correlaciones

En las Tablas 2 y 3 se presentan los resultados de la prueba de Spearman, incluyendo la variable “Forma”, evaluada mediante el test de Chi-cuadrado para las plantas de Nueva Aldea y Horcones, respectivamente.

En estas tablas se compararon las variables macroscópicas, medidas a partir de las fotografías, con los siguientes valores: Estado (verde o seca), Espesor (2,6 mm y 3,2 mm), Calidad (podado o no podado) y Humedad (alta o baja).

Los valores de Rho, presentados en las tablas, muestran la fuerza de correlación entre las variables. Solo se reportan los resultados que presentaron significancia estadística, es decir, aquellos cuyo valor p-valor fue menor a 0,05.

Además, los valores resaltados en negrita indican que la correlación fue significativa para ambas plantas.

Tabla 2. Resultados del coeficiente de correlación Rho para Nueva Aldea

	Estado	Espesor	Calidad	Humedad
Frecuencia	-	-	-	0,2672*
Forma	-	-	-	0,3280*
Abertura	-	0,2936*	0,3710*	-
Largo	-	-	0,2624*	-
Profundidad	-	-	-	-
Angulo	-	-	-	-

*Significativos para un p -valor <0,05

Tabla 3. Resultados de los coeficientes de correlación Rho para Horcones.

	Estado	Espesor	Calidad	Humedad
Frecuencia	-	-	-	-
Forma	-	-	0,3640*	0,3640*
Abertura	-	-0,2351*	-	-
Largo	0,3191*	-	0,2983*	0,3879*
Profundidad	0,2494*	-	-	-
Angulo	0,3163*	-	-0,2589*	-

*Significativos para un p -valor <0,05

A continuación, se detallan las relaciones que alcanzaron un p-valor menor a 0,05 en ambas plantas, lo que permitirá enfocar la investigación en las variables con correlaciones más relevantes.

3.2.1. Relación Forma-Humedad

A continuación, se presenta la relación entre la variable “forma” (Grieta tipo 1, 2, 3 o 4) y la Humedad de las chapas (Alta humedad o Baja humedad), con un Rho de 0,3640 para Horcones (HO) y 0,3280 para Nueva Aldea (NA).

La Figura 23 muestra la frecuencia de las formas de grietas en las chapas de alta humedad (ah) y baja humedad (bh) por cada planta. Se observa que la Forma de grieta 2 es la que más se repite en todos los casos, seguida por la forma 1.

En Horcones, para chapas de alta humedad, la frecuencia de la Forma 2 es de 46, mientras que para chapas con baja humedad es de 45. En Nueva Aldea, las chapas de alta humedad presentan una frecuencia de la Forma 2 de 38, mientras que para las chapas con baja humedad es de 42.

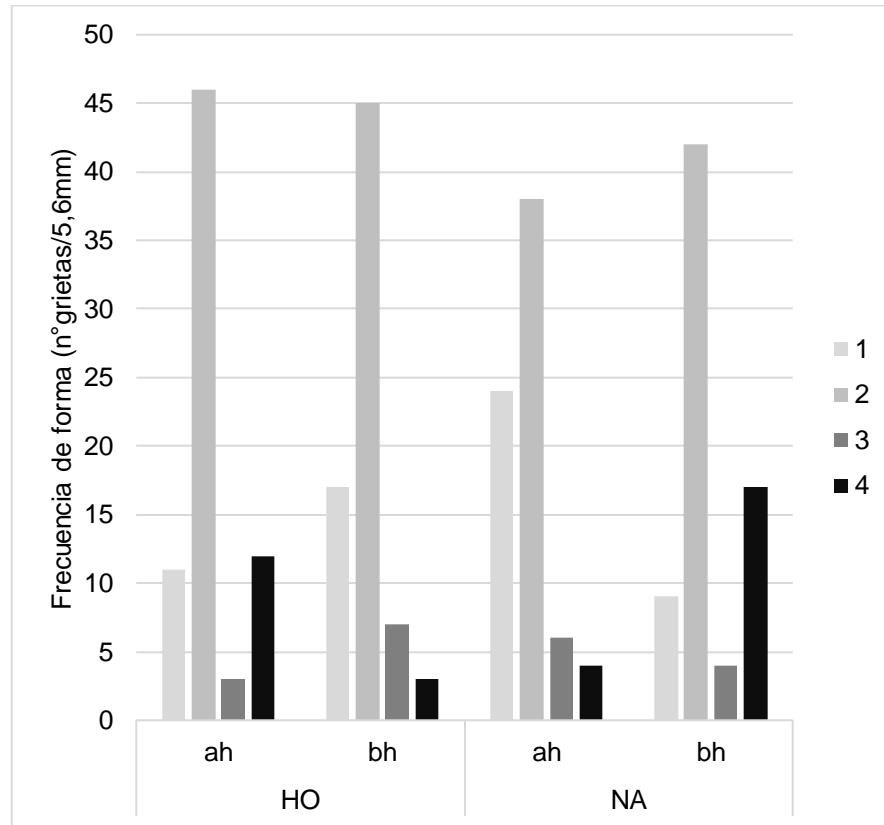


Figura 23. Frecuencia de forma de grietas según contenido de humedad de las chapas por planta.

En la Figura 24 se presentan los diferentes tipos de grietas (1, 2, 3 y 4) identificados mediante el análisis macroscópico realizado a partir de las fotografías obtenidas.

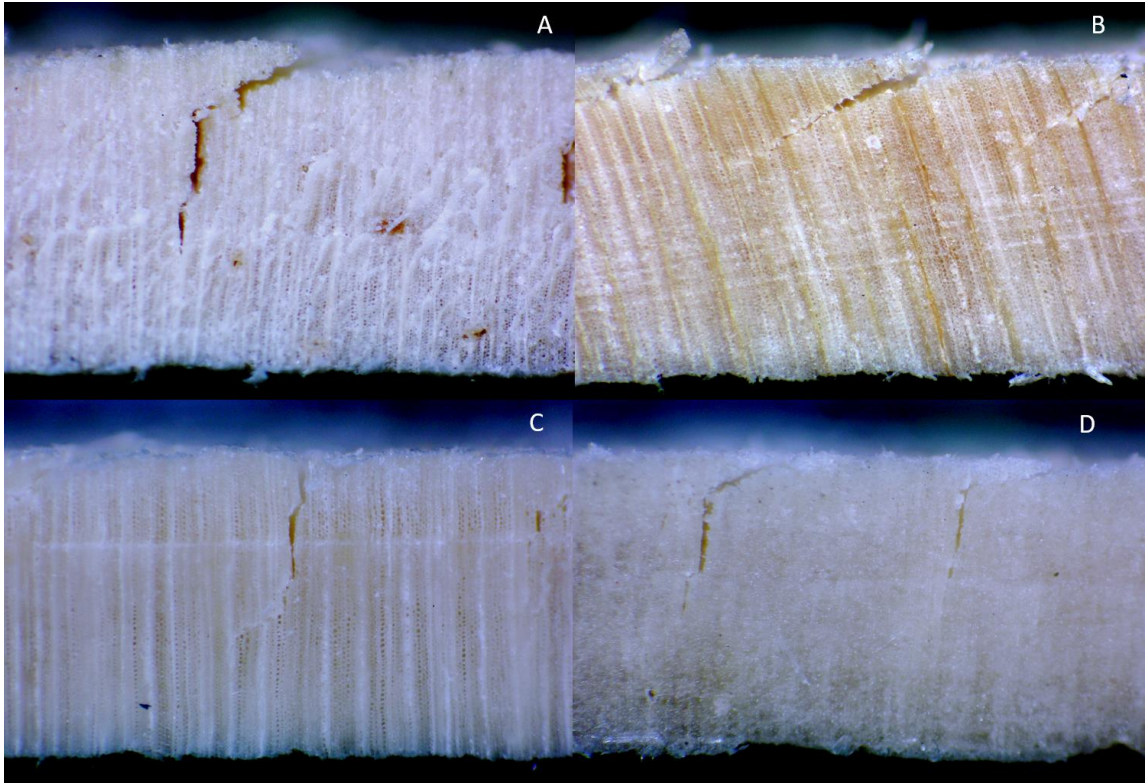


Figura 24. Representación fotográfica de los distintos tipos de grietas según la variable "forma". (A) Grieta del tipo 1. (B)Grieta del tipo 2. (C) Grieta del tipo 3. (D) Grieta del tipo 4.

3.2.2. Relación Abertura – Espesor

La relación entre la Abertura de Grieta (mm) y el Espesor de chapa (2,6 mm y 3,2 mm) muestra un Rho de -0,2351 para Horcones y 0,2936 para Nueva Aldea.

Para visualizar esta relación, se presenta la Figura 25 muestra el promedio del ancho de abertura de la grieta según el espesor para cada planta. En Horcones el promedio del ancho de abertura es de 0,120 mm para chapas de 2,6 mm de

espesor, mientras que para chapas de 3,2 mm es de 0,114 mm. Por otro lado, en Nueva Aldea, el ancho de apertura promedio de 0,183 mm para chapas de 2,6 mm y de 0,151 mm para chapas de 3,2 mm de espesor.

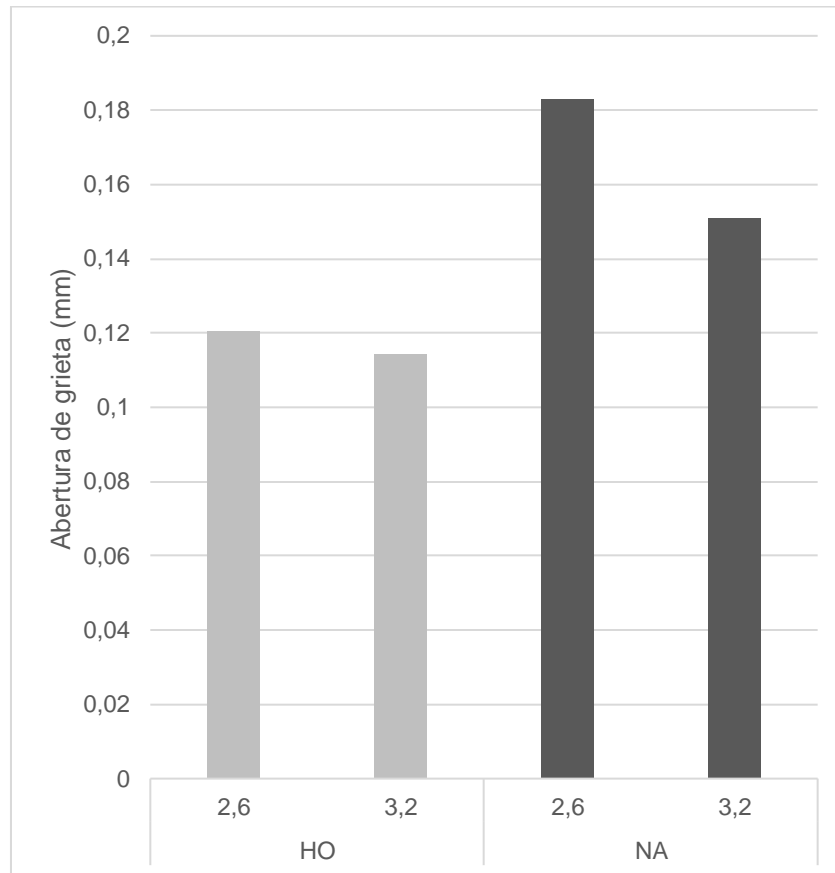


Figura 25. Promedio del ancho de apertura de grietas según el espesor de chapas por planta.

A continuación, en la Figura 26, se incluyen representaciones fotográficas de estos resultados, ilustrando visualmente el contraste en el comportamiento de las grietas entre las dos plantas.

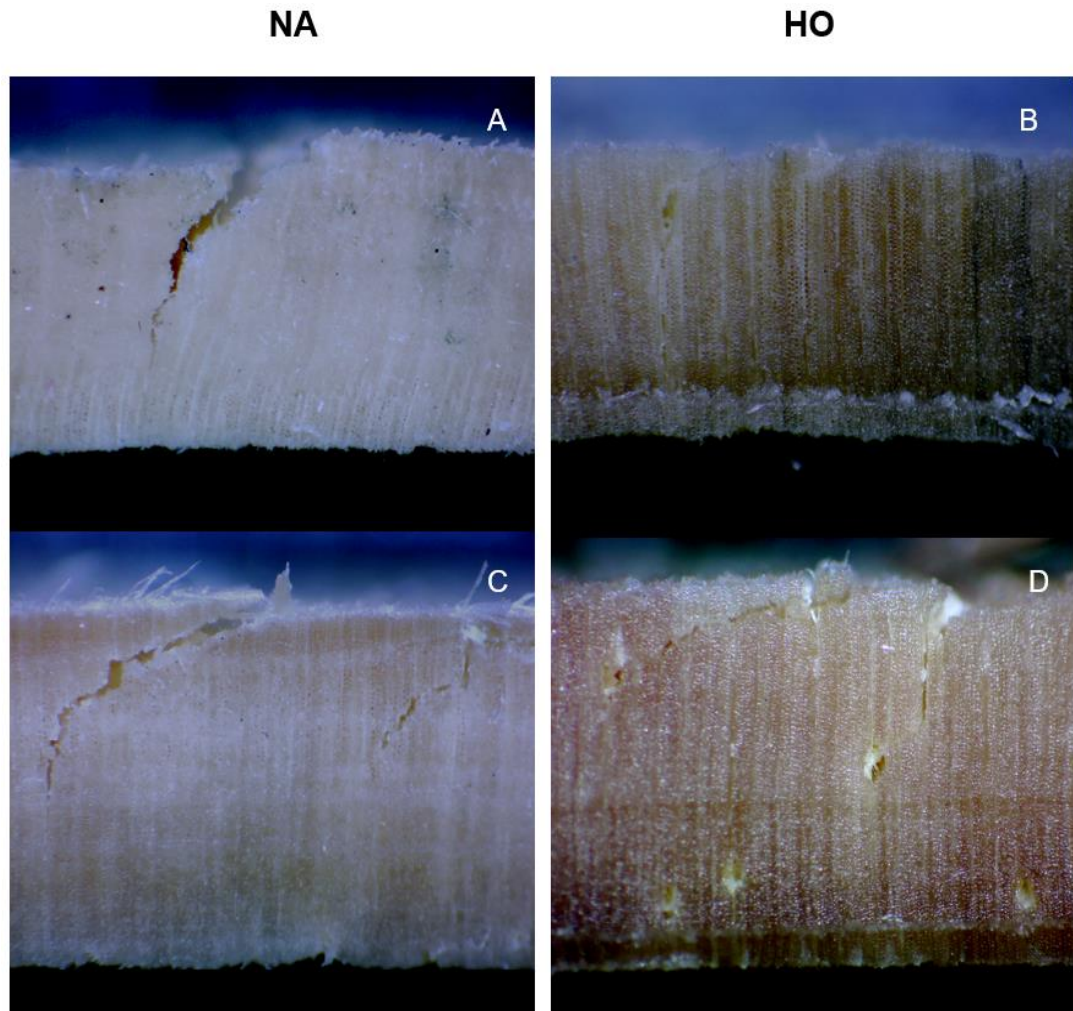


Figura 26. Representación fotográfica del ancho de abertura de las grietas en función del espesor de chapas, comparando ambas plantas. (A) NA espesor 2,6 mm. (B) Ho espesor 2,6 mm. (C) NA espesor 3,2 mm. (D) Ho espesor 3,2 mm.

El valor mayor de abertura en las chapas de Nueva Aldea podría generar una mayor penetración del adhesivo en las grietas. Sin embargo, este fenómeno también conlleva una mayor pérdida de adhesivo entre capas, lo que puede reducir la efectividad de la unión entre las chapas y aumentar el riesgo de despegue. Esta situación compromete la calidad del encolado, ya que el adhesivo

no se distribuye adecuadamente entre las superficies en contacto, afectando la resistencia del producto final.

3.2.3. Relación Largo - Calidad

Por último, se presenta la relación entre el Largo de la Grieta (mm) y la Calidad de la Chapa (Podada o Regular), con un Rho de 0,2983 para Horcones y 0,2624 para Nueva Aldea.

En la Figura 27 se observa que el largo promedio de las grietas en las chapas podadas de Horcones es de 2,52 mm, mientras que en las regulares es de 2,23 mm. En Nueva Aldea, el largo promedio de las grietas en las chapas podadas es de 2,41 mm y en las regulares es de 2,39 mm.

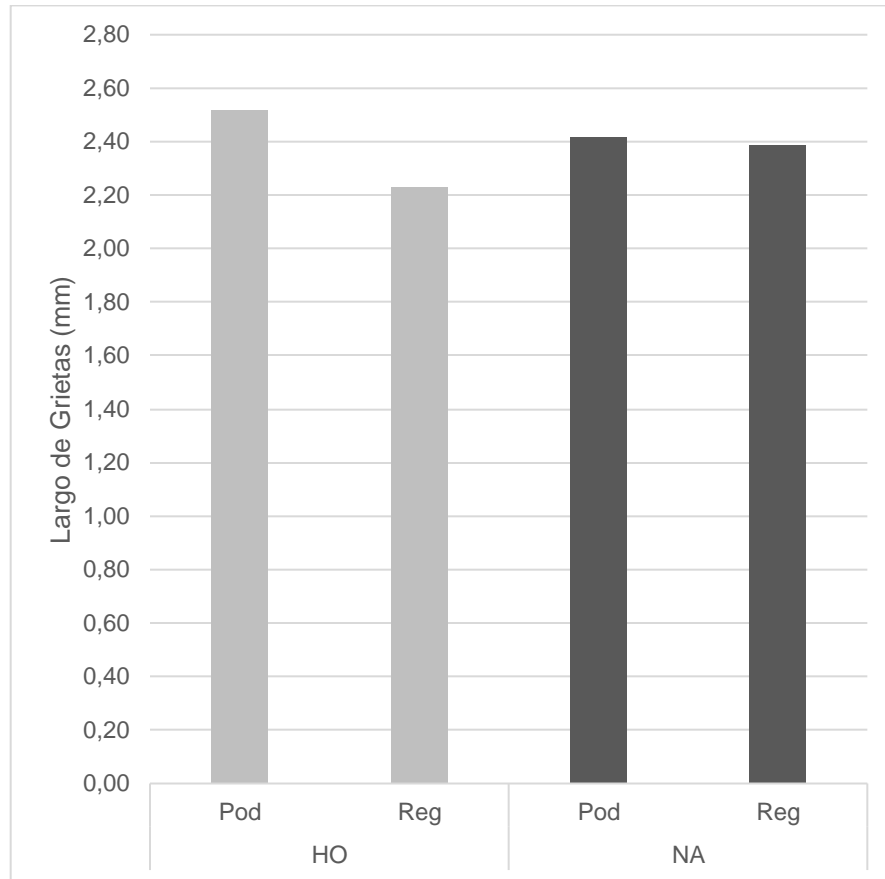


Figura 27. Promedio del largo de la grieta por la calidad de la chapa por cada planta.

En la Figura 28 se incluye representaciones fotográficas del largo de la grieta en relación con la calidad de la chapa, comparando los resultados entre las plantas.

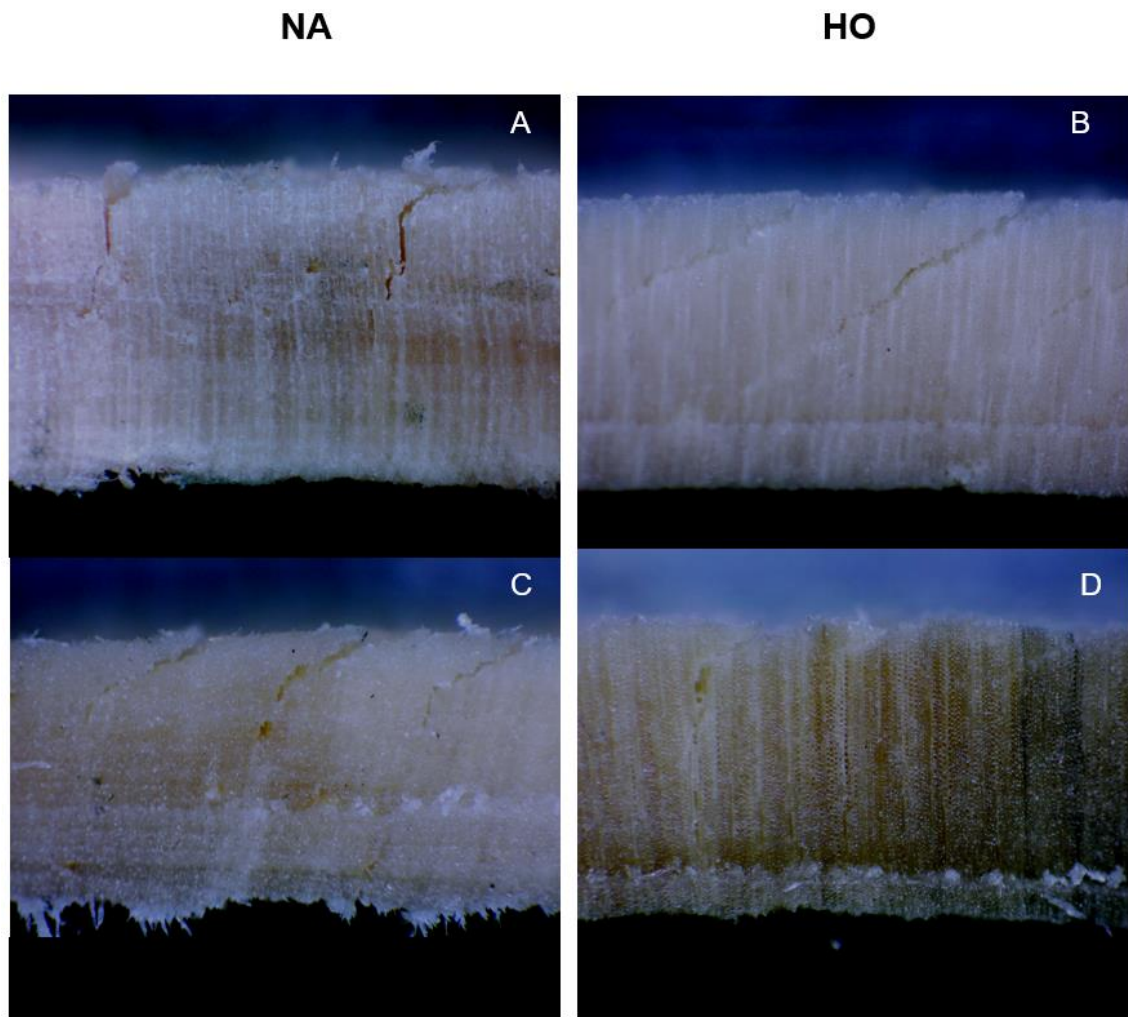


Figura 28. Representación fotográfica del largo de la grieta en función de la calidad de la chapa, comparando entre plantas. (A) NA 2,6 podada. (B) HO 2,6 podada. (C) NA 2,6 regular. (D) HO 2,6 regular.

Se destaca que las chapas podadas presentan un mayor largo de grietas, especialmente en Horcones, donde la diferencia en el largo de grietas es mayor en comparación con Nueva Aldea. Un mayor largo de grietas puede ser beneficioso para la penetración del adhesivo, pero no necesariamente mejorando la calidad de la unión. Sin embargo, es importante tener en cuenta que grietas

excesivamente largas pueden aumentar el riesgo de ruptura de la chapa, especialmente en chapas más delgadas (2,6 mm). Por otro lado, en Nueva Aldea se observa una distribución más uniforme en los valores de largo de grietas.

3.2.4. Relación Frecuencia – Humedad

Aunque la relación entre la frecuencia de grietas y la humedad no presenta una correlación significativa en Horcones (p -valor $>0,05$), en Nueva Aldea si se observó una interesante correlación positiva con un Rho de 0,2672. La Figura 29 muestra la frecuencia total de grietas en ambas plantas, donde se puede apreciar que, en Nueva Aldea, el número de grietas en chapas de baja humedad (obtenidas de la zona interior del rollizo) fue de 155, en comparación con las 145 grietas observadas en las chapas de alta humedad (provenientes de la parte exterior del rollizo).

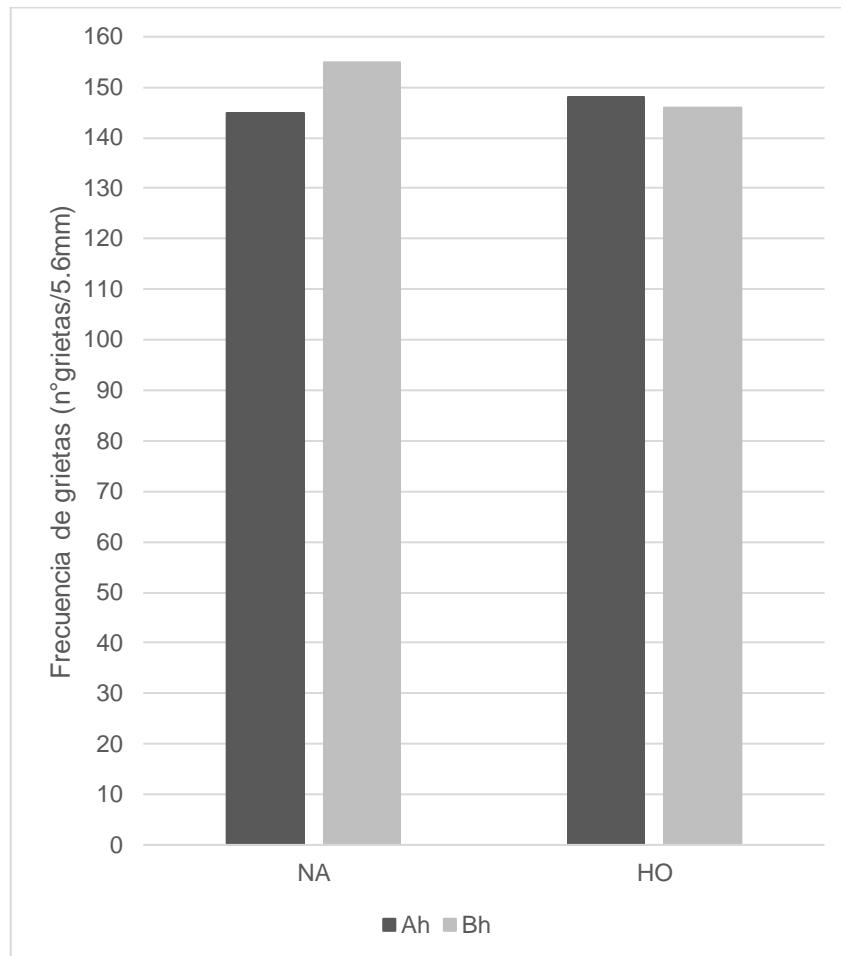


Figura 29. Frecuencia de grietas con respecto a la humedad de chapas.

Se ha llegado a la conclusión de que la variación en los niveles de adherencia podría estar relacionada con esta variación en frecuencia de grietas con respecto a la humedad. En la Figura 30 se ilustra una comparación de un tablero formado por chapas de alta humedad con otro de chapas de baja humedad. Las chapas de alta humedad, al presentar un menor número de grietas, generan menor pérdida de resina en las mismas, lo que aumenta la superficie efectiva de contacto y mejora la adhesión del tablero. En contraste, en las chapas de baja

humedad, el mayor número de grietas provoca una mayor pérdida de resina, lo que reduce la superficie de contacto y, en consecuencia, disminuye la adherencia.

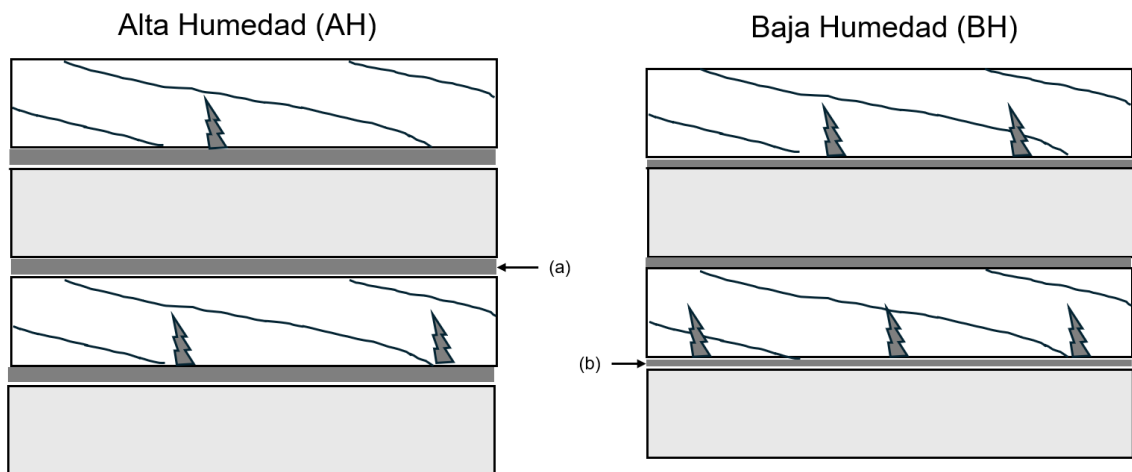


Figura 30. Comparación de tableros conformados con chapas de alta y baja humedad. (a) Línea de resina en toda la cara de las chapas

Dado que ambas plantas operaron con las mismas condiciones de producción (macerado, tiempo de actividad del cuchillo, secado, entre otros), se sugiere que esta diferencia se debe a las variaciones en los sistemas de riego observados en terreno y las condiciones climáticas. Horcones, siendo una zona más costera, presenta un ambiente más húmedo que Nueva Aldea, ubicada en la Región del Ñuble, lo cual podría influir en la humedad del rollizo y, por ende, en los niveles de adherencia. Esto resalta la importancia de realizar investigaciones adicionales para analizar más en profundidad la procedencia de los rollizos y su impacto en

la formación de grietas de debobinado, lo que permitiría optimizar la calidad del proceso de adhesión y mejorar la producción de tableros contrachapados.

3.3. Resultados Análisis Compactación Superficial

3.3.1. Resultados de medición del lumen celular

En la Figura 31 se presentan los resultados graficados para Nueva Aldea de la medición promedio de lúmenes en cada una de las zonas analizadas. De estos resultados, únicamente la muestra con un espesor de 3,2 mm, de calidad regular y alta humedad (NA3,2RAH), exhibe una compactación celular. Por otro lado, en se entregan los resultados para Horcones, la muestra con un espesor de 2,6 mm, de calidad podada y de alta humedad (A2,6PAH) presenta una compactación. En la Figura 32 se incluyen las fotografías de estas muestras que ilustran los resultados de compactación observados.

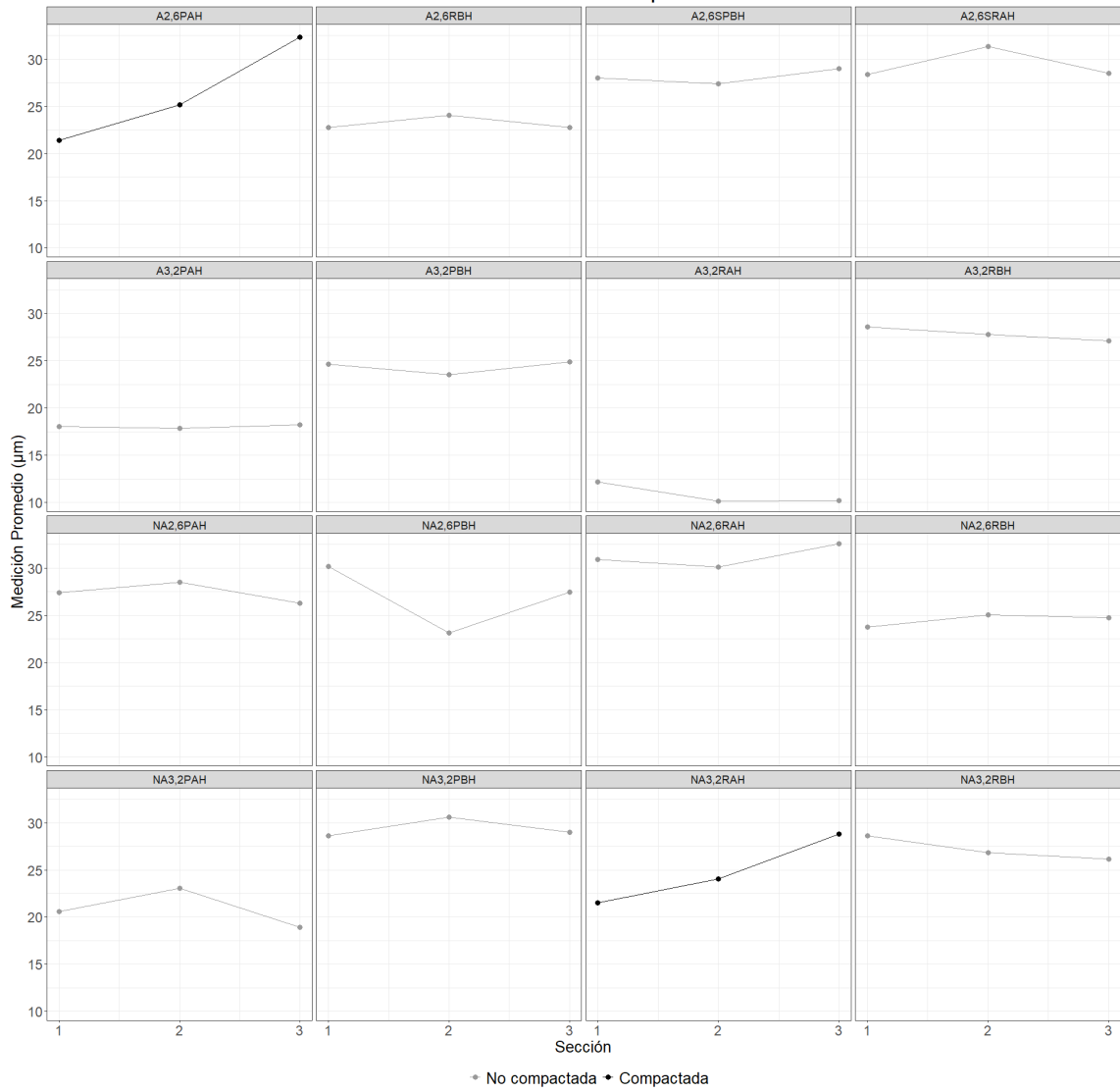


Figura 31. Resultados de mediciones promedios de lúmenes por zonas de medición para Nueva Aldea y Horcones.

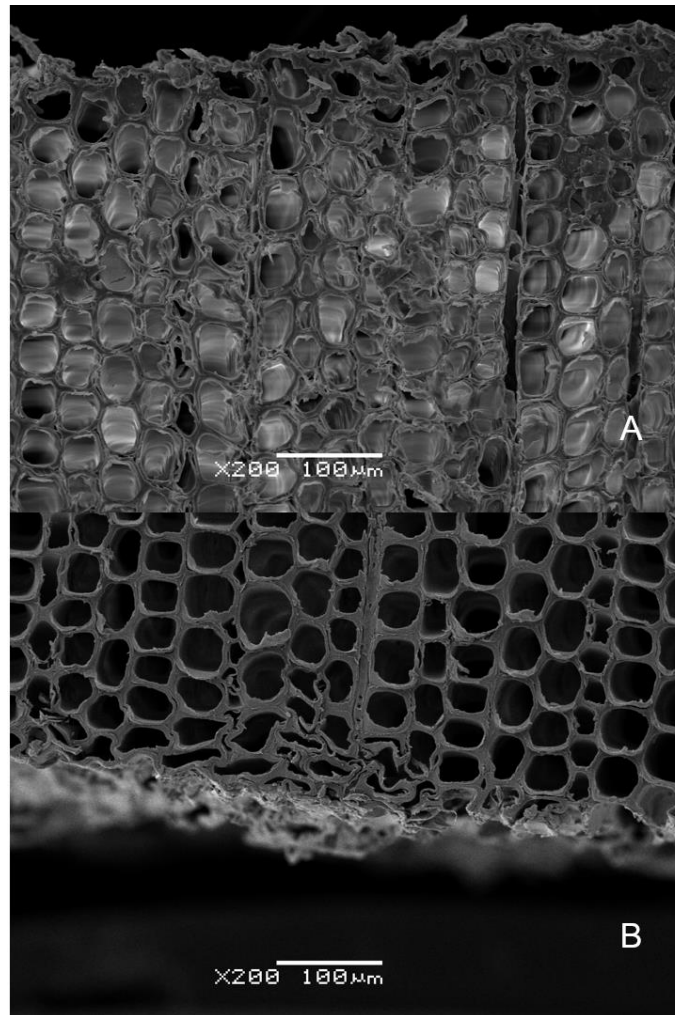


Figura 32. Fotografías de las muestras con resultado de compactación positiva. (A) Muestra NA3,2RAH. (B) A2,6PAH.

3.3.2. Resultados de conteo de células compactadas

En la Figura 33 se muestran los resultados graficados para el conteo de células compactadas promedio por zona de medición. De estos resultados, únicamente la muestra proveniente de Horcones, con un espesor de 3,2 mm, de calidad podada y alta humedad (A3,2PAH), exhibe una compactación celular. En la

Figura 34 se incluye una fotografía de la muestra, que proporciona una representación visual de la compactación observada.

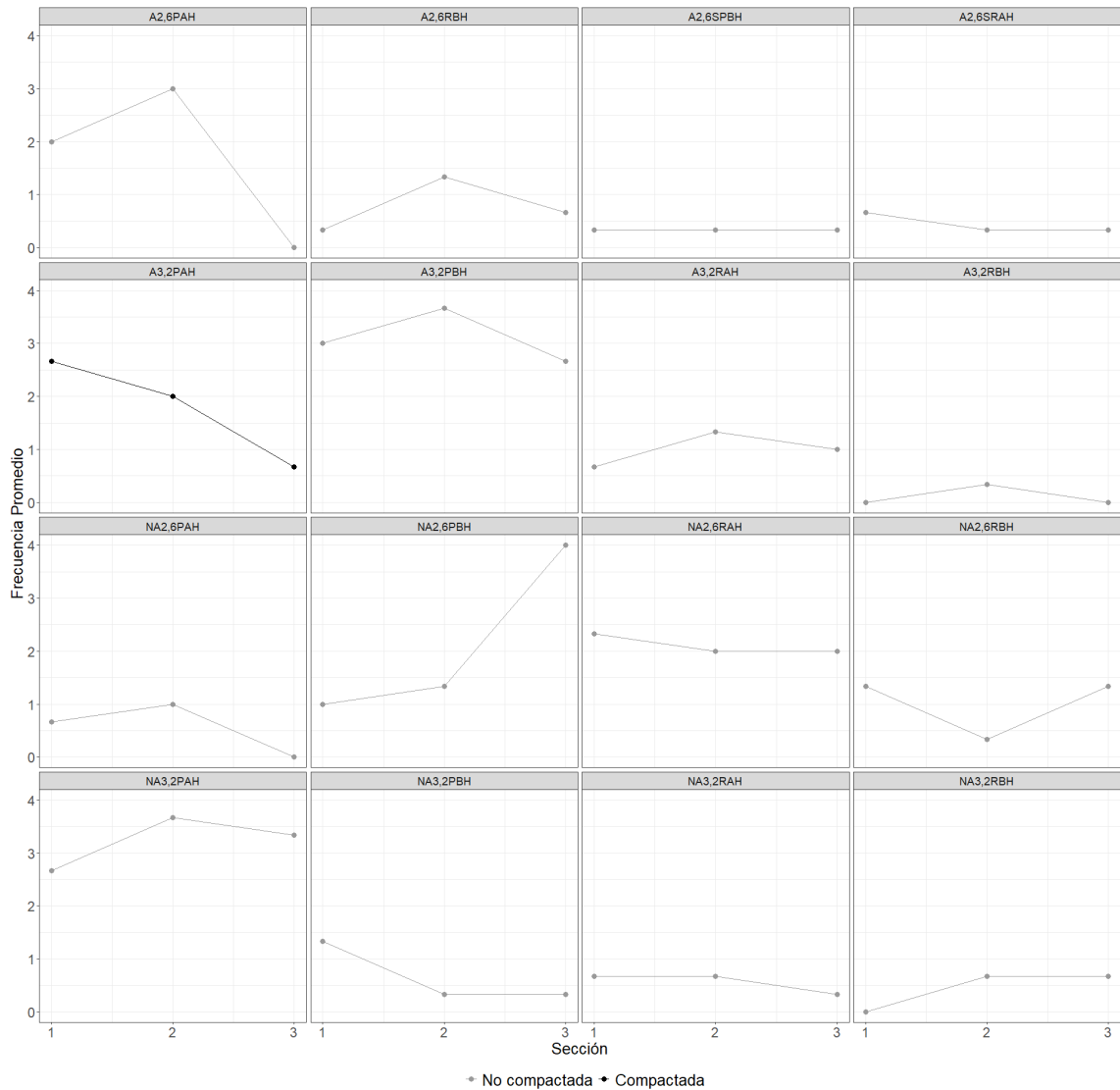


Figura 33. Resultados de conteo de células compactadas por zona de medición.

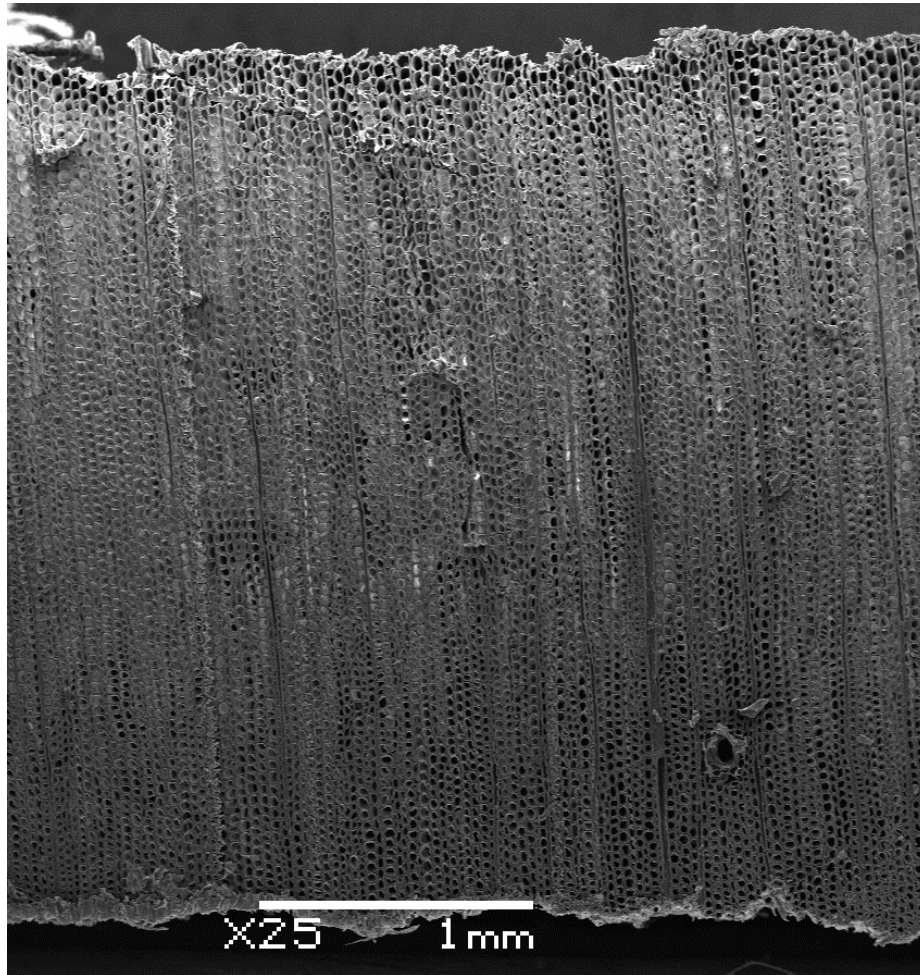


Figura 34. Fotografía de la muestra A3,2PAH, ilustrando la compactación observada.

Al analizar los resultados de ambas mediciones, se puede concluir que no existe compactación en las chapas evaluadas para ambas plantas. Esto se puede reafirmar con la Figura 35 que presenta el efecto de compactación esperado para alcanzar en estas mediciones y que no es lo que se logró observar.

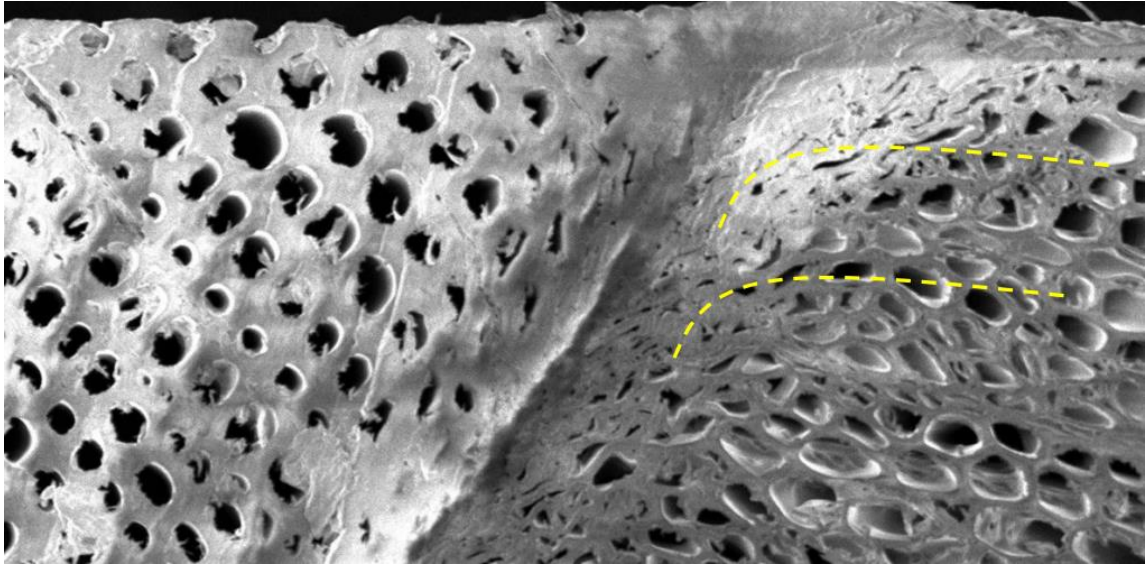


Figura 35. Representación efecto de compactación esperado en las chapas.
Fuente: Cristián Barría, comunicación personal.

IV. CONCLUSIONES

La relación entre la forma de la grieta y el contenido de humedad de las chapas muestra una correlación positiva en ambas plantas. La Forma de Grieta Tipo 2 es la más frecuente en todas las condiciones evaluadas, seguidas de la Forma de Grieta Tipo 1.

Existe una relación significativa entre la abertura de la grieta y el espesor de la chapa en ambas plantas. En Horcones, las chapas delgadas (2,6 mm) tienden a mostrar una abertura ligeramente menor, mientras que en Nueva Aldea ocurre lo contrario: las chapas más delgadas presentan una mayor abertura de grietas en comparación a las más gruesas (3,2 mm). La mayor abertura en las chapas de más delgadas en Nueva Aldea puede facilitar la penetración del adhesivo, pero también conlleva a una mayor pérdida de este, lo que afectaría negativamente a la calidad del encolado y compromete la calidad del producto final.

Por otro lado, la correlación entre el largo de la grieta y calidad de la chapa mostró que las chapas podadas presentan un mayor largo de grietas en ambas plantas. Si bien las grietas más largas pueden permitir una mejor penetración del pegamento, también incrementaría el riesgo de ruptura de las chapas,

especialmente las de menor espesor. En Nueva Aldea, los valores de largo de grietas fueron más uniformes que los de Horcones.

La relación entre la frecuencia de grietas y el contenido de humedad de las chapas también destaca aspectos importantes. En Nueva Aldea, se observó una correlación positiva entre la humedad y la frecuencia de grietas, lo que sugiere que un incremento de humedad del rollizo podría estar asociado a una disminución de grietas en las chapas. Esto implica que las chapas de alta humedad, al presentar un menor número de grietas, tienen a mejorar la adherencia al reducir la pérdida de resina, lo que, a su vez, podría impactar positivamente la calidad del encolado.

Por el contrario, las chapas de baja humedad, aunque presentan un mayor número de grietas, pueden resultar una pérdida de resina, comprometiendo así la superficie de contacto y afectando negativamente la calidad del producto final.

Por lo tanto, existe una importancia de controlar adecuadamente las variables como la humedad, el espesor de chapas y calidad durante el proceso de producción. Aunque algunos defectos, como las grietas, son inevitables, su manejo adecuado es crucial para garantizar un producto final de alta calidad y resistencia, minimizando los riesgos de fallos estructurales.

Por último, los resultados obtenidos sobre la compactación superficial mostraron que, aunque las mediciones iniciales indicaban una posibilidad de compactación celular, solo unas pocas muestras presenciaron compactación superficial clara. En el caso de Nueva Aldea, únicamente la muestra con un espesor de 3,2 mm, regular y alta humedad presentó compactación. En Horcones, una muestra de espesor 2,6 mm, podada y alta humedad también indicó compactación. Con el método de conteo de células compactadas solo la muestra de Horcones de espesor 3,2 mm, podada y de alta humedad presentó compactación.

A pesar de estas observaciones puntuales, en general, no se alcanzó el nivel ideal de compactación ideal que se esperaba. Esto sugiere y recomienda investigar más a fondo las condiciones que podrían influir en la compactación celular, así como explorar métodos alternativos para mejorar la calidad del encolado y minimizar la formación de grietas.

V. GLOSARIO

Chapa: Lámina de madera proveniente del proceso de debobinado.

Tablero Contrachapado: Formado por varias capas finas de madera encoladas de modo que sus fibras queden entrecruzadas.

VI. BIBLIOGRAFÍA

Acevedo A, Bustos C, Lasserre J, Gacitúa W. (2012). Efecto de la tasa de compresión en la morfología de grietas de debobinado para chapas de *Eucalyptus nitens*. Maderas. Ciencia y tecnología, 14(33): 289-301.

Ayatecno. (2016). Maderas prefabricadas. Ayatecno Blog.
https://ayatecno.blogspot.com/2016/01/maderas-prefabricadas_12.html.

Devallance, D. (2003). Influence of veneer roughness, lathe check, and annual ring characteristics on glue-bond performance of Douglas-fir Plywood. Master of Science in Wood Science.

Díaz M. (2018). Disminuir costo por medio de la optimización del recorte lateral de escuadrado.

Khoo, P. S., Chin, K. L., H'ng, P. S., Bakar, E. S., Lee, C. L., Go, W. Z., & Dahali, R. (2019). Physical properties and bonding quality of laminated veneer lumber produced with veneers peeled from small-diameter rubberwood logs. Royal Society Open Science, 6(9), 191763. <https://doi.org/10.1098/rsos.191763>

Marchal R., et al. (2009). Cutting forces in wood machining—Basics and applications in industrial processes. A review COST Action E35 2004–2008: Wood machining—micromechanics and fracture.

Moraga, A., Alberto A. (2012). Efecto de las grietas de debobinado en chapas de *Eucalyptus nitens* para la fabricación de tableros contrachapados.

Rahayu I, Darmawan W, Nugroho N y Marchal R. (2015). The Effect of Jabon Veneer Quality on Laminated Veneer Lumber Glue Bond and Bending Strength.

Tapia, J. A. (2016). Propuesta de mejora para la reducción de tiempos muertos en área tornos planta paneles Arauco SA.