

INFLUENCIA DE LA DENSIDAD DE LA MADERA EN LA ENCOLABILIDAD DE *Pinus radiata* D.DON

René J. Carmona C.¹
Francisco Espinoza¹
Carlos Bull S.¹

RESUMEN

Este trabajo evaluó el comportamiento mecánico de uniones de madera encolada, en función de las variaciones de densidad presentes en la madera de pino radiata (*Pinus radiata* D. Don.). Se utilizaron dos adhesivos, determinándose el esfuerzo de ruptura y la adherencia en dos tipos de ensayos mecánicos: cizalle por compresión para uniones laminadas y tracción para uniones dentadas; para tres rangos de densidad de la madera: densidad baja entre 430 y 471 kg/cm², media entre 476 y 509 kg/cm² y alta entre 522 y 570 kg/cm².

Los resultados permiten comprobar la influencia de la densidad de la madera en la encolabilidad, existiendo un aumento significativo de la resistencia mecánica con incrementos en la densidad. La adherencia no presentó una tendencia general clara, los valores promedio fueron superiores al 50% para todos los tratamientos, siendo un buen indicador de las adecuadas condiciones de encolado utilizadas, ya que la ruptura se produjo fundamentalmente en la madera y no en la línea de cola.

El análisis microscópico de la línea de cola permitió concluir que la penetración del adhesivo, para los tres rangos de densidad, es claramente superior en madera de primavera (alcanzando una distancia de 71,8 a 179,5μ) que en madera de verano (26,5μ- 79,4μ).

Palabras claves: adhesivos para madera, densidad, *Pino radiata*, encolabilidad.

SUMMARY

The present study evaluated the mechanical behaviour of glued wood joints, related to variability of radiata pine wood density (*Pinus radiata* D. Don). Two adhesives were used, establishing the bond strength and wood failure according to two types of mechanical tests: shear by compression loading (for laminated joints) and tension for finger joints, applied to 3 wood density levels, 430-471; 476-509 and 522-570 kg/cm².

Results show clearly the influence of wood density in gluability; there is a significant increase of mechanical strength on density increments. Wood failure did not show a clear tendency, but average results were always over 50% for all treatments; nevertheless it was a good indicator of the adequate gluing conditions, because failure occurred mostly in wood and not in the glueline.

A microscopic analysis of the glueline showed that adhesive penetration is clearly higher in earlywood (reaching a distance of 71,8μ to 179μ) than in latewood (26,5 -79,4μ).

Key words: wood adhesives, density, radiata pine, gluability.

¹ Departamento de Tecnología de la Madera, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, U. de Chile. Casilla 9206

INTRODUCCIÓN

La densidad es una de las propiedades más importantes de la madera, ya que presenta una estrecha relación con el comportamiento físico-mecánico de este material.

En general cuando la densidad de la madera aumenta, también lo hacen sus propiedades de resistencia. Por lo tanto es necesario emplear, en cada caso, la madera adecuada, considerando la variabilidad de la densidad como de vital relevancia.

En cuanto a la encolabilidad, varios autores coinciden en señalar que el factor de mayor incidencia es la densidad. Las menores resistencias de la unión encolada se obtienen con madera de densidades más bajas (Bassett, 1960; Skeist, 1966; Poblete, 1978); lo que es atribuible a que en ellas el adhesivo es totalmente absorbido por la madera, generándose uniones pobres, debido a que en estos sustratos la madera falla más fácilmente que la línea de cola, al existir una incidencia directa sobre la adhesión mecánica (Pizzi, 1983). En maderas con densidades altas (superiores a 0,7 gr/cm³) (Bassett, 1960), también se producen uniones débiles debido fundamentalmente a la mala transferencia de adhesivo entre los sustratos o a un excesivo escurrimiento lateral al momento de aplicar presión. Además, las mayores variaciones dimensionales por cambios en el contenido de humedad, producen tensiones que deben ser soportadas por las uniones encoladas, determinándose la ruptura en la línea de cola antes que en el sustrato.

Se considera una unión adhesiva satisfactoria, aquella en que la falla se produce en la madera y no en la línea de cola. Esto puede lograrse mediante una buena preparación de la madera o introduciendo cambios en el adhesivo, ya sea en el tipo, en su formulación o en las condiciones de aplicación (Poblete, 1978).

Se ha demostrado que la penetración de adhesivos hacia la madera incrementa la resistencia de la unión encolada (Blomquist, 1983). En efecto, es necesaria

la penetración en una escala molecular para crear una zona de transición, con propiedades mecánicas intermedias entre las del adhesivo y las de la madera, requiriendo 2 a 6 células de profundidad, dependiendo del tipo y condición del adhesivo. Además, la profundidad de penetración y su regularidad puede ser importante para una unión fuerte. Si la penetración es muy irregular, la resistencia de la unión puede reducirse y la falla puede tener lugar donde hay una menor cantidad de adhesivo o donde éste penetró en forma escasa.

La variabilidad que presenta la densidad de la madera dentro de una especie y aún dentro de un mismo árbol, particularmente en especies mejoradas genéticamente y manejadas intensivamente, como es el caso del pino radiata, es un factor que puede ser determinante en el comportamiento de elementos de madera, en los cuales hay una o más líneas de cola. Dado que esta especie es de densidad media-baja, presenta, por lo tanto, una baja resistencia mecánica intrínseca, hecho que influye, además en la obtención de una adecuada penetración del adhesivo y continuidad de la línea de cola. En consecuencia, el objetivo de este estudio fue profundizar en el conocimiento del uso de adhesivos para maderas, evaluando el comportamiento mecánico de uniones de madera encolada, definiendo las relaciones entre la densidad, de la madera de pino radiata, penetración del adhesivo y encolabilidad.

MATERIAL Y MÉTODO

Se utilizó madera de pino radiata (*Pinus radiata* D. Don), proveniente de la zona de Constitución (VII Región de Chile). De acuerdo con los objetivos, se seleccionó muestras de madera que abarcaron la mayor variedad posible de densidades entre las diferentes piezas. Para este efecto se realizó una clasificación visual basada en la textura de la madera como indicador (relación existente entre la proporción de la madera de primavera y la de verano en el anillo de crecimiento). Se escogieron piezas en corte radial, libres

de defectos de secado, pudrición o mancha. después de ser secadas a un contenido de humedad final de 9%, en un secador convencional.

En función de la variabilidad presentada por la densidad actual de la madera seleccionada, se diferenciaron tres rangos denotadas como: densidad baja (OB) entre 433 y 466 kg/cm²; densidad media (DM) entre 476 y 517 kg/cm² y densidad alta (DA) entre 523 y 591 kg/cm².

Para la realización de las uniones encoladas se utilizaron dos adhesivos: una dispersión de acetato de polivinilo (PVA) del tipo 04 de nombre comercial EXCEL 7 y resorcinol formaldehído de nombre comercial AEROOUX 185 B.

Las uniones encoladas se realizaron de acuerdo a las especificaciones técnicas entregadas por los fabricantes; en el caso particular del PVA significaron un gramaje de 200 g/m² una sola cara, tiempo de ensamble de 45 min y presión de 5 kg/cm²; para resorcinol se usó un gramaje de 250 g/m² de la mezcla resina endurecedor a una cara, tiempo de ensamble abierto de 5 min, cerrado de 10 min y el tiempo de prensado de 6 hrs. mínimo. Una vez terminadas y obtenidos los ensambles, se confeccionaron las probetas para los ensayos de cizalle por compresión para uniones laminadas y de tracción para uniones dentadas (finger joint), de acuerdo con las normas ASTM 0905-49 y ASTM 03110- 90 respectivamente, procediendo posteriormente a la realización de los ensayos mecánicos en una máquina universal de ensayos INSTRON modelo 4204, determinándose el esfuerzo de ruptura y la adherencia respectiva.

Los resultados de los ensayos mecánicos se analizaron estadísticamente de acuerdo a un diseño completamente aleatorizado, cuyo modelo es el de clasificación en un sentido. Se realizaron análisis de varianza con sus respectivas pruebas de comparaciones múltiples, aplicándose independientemente a cuatro grupos de datos, diferenciados de la siguiente manera:

1. Adhesivo PVA -cizalle por compresión

2. Adhesivo PVA -tracción paralela

3. Adhesivo resorcinol-cizalle por compresión

4. Adhesivo resorcinol tracción paralela

Además, se efectuó un estudio microscópico de la línea de cola para el adhesivo fenólico, realizándose un análisis cualitativo con el objeto de poder diferenciar la penetración del adhesivo en los tres rangos de densidad definidos y determinando su efecto sobre la encolabilidad de la madera de pino radiata.

RESULTADOS y DISCUSIÓN

Ensayo de cizalle por compresión En el Cuadro 1 se presentan los resultados obtenidos para el ensayo de cizalle por compresión para los tres rangos de densidad. Se observa que tanto para el esfuerzo de ruptura como para la adherencia, se presenta una misma tendencia, en el caso de resorcinol formaldehído, donde el encolado DB (densidad baja) presentó los promedios más bajos, seguidos por DA (densidad alta) y finalmente DM (densidad media) con valores ligeramente superiores a los encolados con densidad alta.

De forma similar, para el acetato de polivinilo, el esfuerzo de ruptura se incrementa con el aumento de la densidad, siendo muy similares los obtenidos para los rangos de densidad media y alta. En este caso, la adherencia presenta valores superiores al 70% y sobre un 80% en el caso de los encolados con densidad baja, donde la falla de la unión encolada se produjo fundamentalmente en la madera y no en la línea de cola.

El análisis de estos resultados permite establecer un comportamiento similar con ambos adhesivos donde, a mayor densidad. de la madera se mejora la calidad de la unión encolada, conclusión a la cual se ha llegado en la mayoría de los estudios sobre el tema. En cuanto a la adherencia, todos los valores promedio fueron superiores al 60% para este ensayo mecánico, considerándose como

un valor satisfactorio, ya que se obtuvo una línea de cola con una resistencia superior a la resistencia de la madera, siendo ella una condición necesaria para la realización de uniones encoladas.

Comparando estos resultados con los obtenidos en otros estudios, se puede señalar la alta incidencia que tienen las condiciones de encolado en la resistencia de la unión adhesiva, ya que utilizando la misma especie (Pino radiata), el mismo adhesivo y ensayo mecánico los resultados pueden variar

ampliamente. Asf, Garay (1 986) obtuvo valores similares a los de este estudio, 69,7kg/cm² para PVA y 70,2 kg/cm² para resorcinol; rango dentro del cual, también se encuentran los resultados obtenidos por Castillo (1988). Sin embargo, Molina (1993) obtuvo valores de resistencia tan altos como 143 kg/cm² para resorcinol, siendo un valor similar a los presentados por Álvarez (1985), encolando con urea y fenol formaldehído.

Cuadro N° 1: Valores promedio del esfuerzo de cizalle por compresión y porcentajes de adherencia con ambos adhesivos

Adhesivo	Densidad baja			Densidad media			Densidad alta		
	Esfuerzo de ruptura (kg/cm ²)	Coef. de variación (%)	Adherencia (%)	Esfuerzo de ruptura (kg/cm ²)	Coef. de variación (%)	Adherencia (%)	Esfuerzo de ruptura (kg/cm ²)	Coef. de variación (%)	Adherencia (%)
Resorcinol	58,89	10,01	61,5	71,5	8,37	78,75	70,08	5,05	66,25
P.V.A.	63,54	16,39	85,75	77,21	12,68	70,7	77,78	10	73,75

Ensayo de tracción

En el Cuadro 2, se presentan los resultados para el ensayo de tracción para ambos adhesivos, se observa que la tendencia mostrada por el esfuerzo de

ruptura es la misma obtenida en el ensayo de cizalle por compresión (en el caso del adhesivo resorcinol), es decir, a mayor densidad se incrementa la resistencia mecánica de la unión de encolada.

Cuadro N° 2: Valores promedio del esfuerzo de tracción y porcentajes de adherencia con ambos adhesivos

Adhesivo	Densidad baja			Densidad media			Densidad alta		
	Esfuerzo de ruptura (kg/cm ²)	Coef. de variación (%)	Adherencia (%)	Esfuerzo de ruptura (kg/cm ²)	Coef. de variación (%)	Adherencia (%)	Esfuerzo de ruptura (kg/cm ²)	Coef. de variación (%)	Adherencia (%)
Resorcinol	25,81	23,83	90	41,7	11,64	61	38,6	18,25	53,5
P.V.A.	37,21	17,58	95	38,6	17,75	92,75	50,33	14,02	62

En los resultados para el ensayo de tracción con PVA, se encuentra un comportamiento que difiere al presentado por el adhesivo resorcinol, ya que a pesar de producirse también un incremento en el esfuerzo de ruptura con aumento de la densidad, en este caso el incremento lo presenta el encolado con densidad alta respecto a los otros rangos de densidad (DB y DM) que presentan promedios similares.

En esta prueba, a diferencia del ensayo de cizalle por compresión, la adherencia presenta una clara tendencia con valores promedio superiores al 50%, donde a mayor densidad de la madera existe un decrecimiento en los promedios alcanzados por este parámetro, comportamiento que concuerda con el teórico esperado, sin embargo, no presentó en ningún caso una clara correlación con el esfuerzo de ruptura.

En las Figuras 1, 2, 3 y 4, se exponen en forma conjunta los resultados de los ensayos de cizalle por compresión tracción para ambos adhesivos, apreciándose con mayor claridad las tendencias antes descritas.

Los encolados con resorcinol registran un comportamiento similar al PVA en el esfuerzo de ruptura, en general, pero con menores valores promedio.

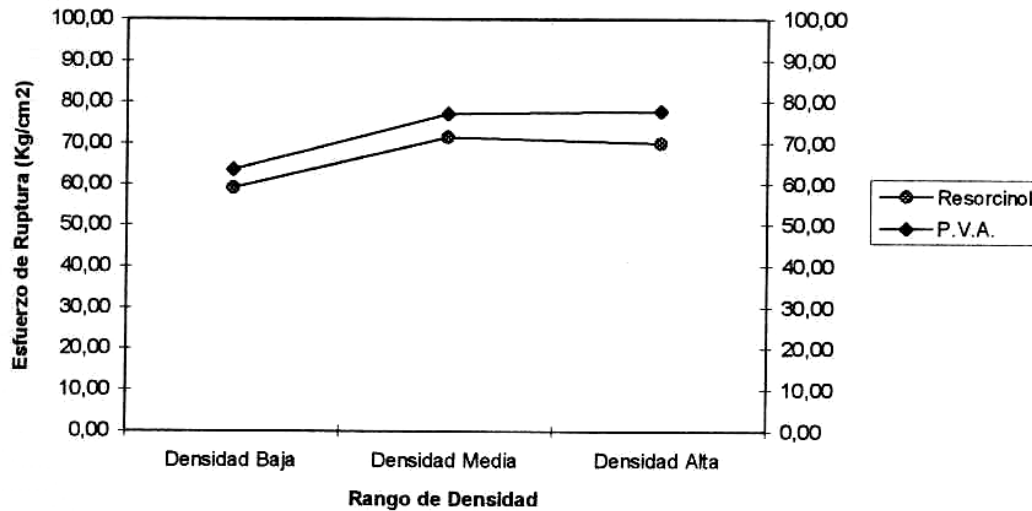


Figura N° 1: Resistencia al cizalle por compresión

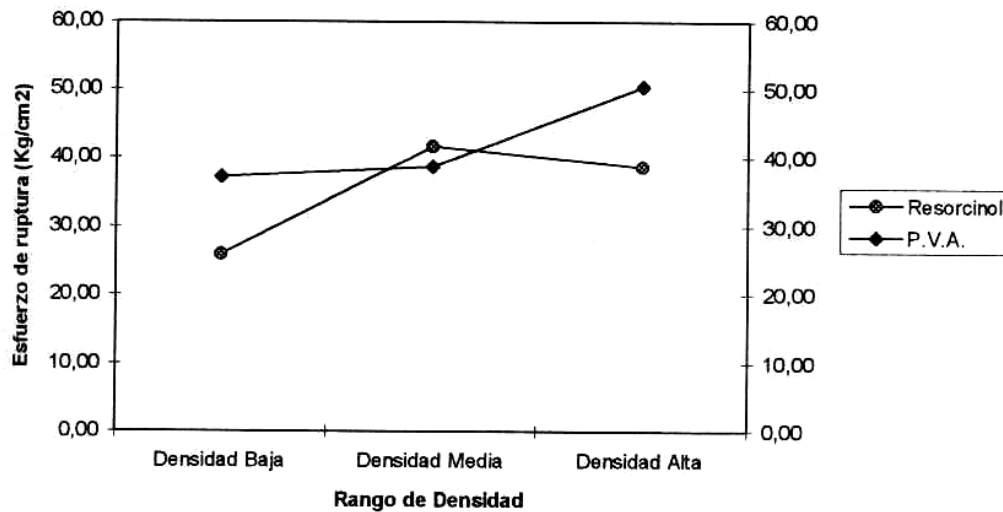


Figura N° 2: Resistencia al esfuerzo de tracción

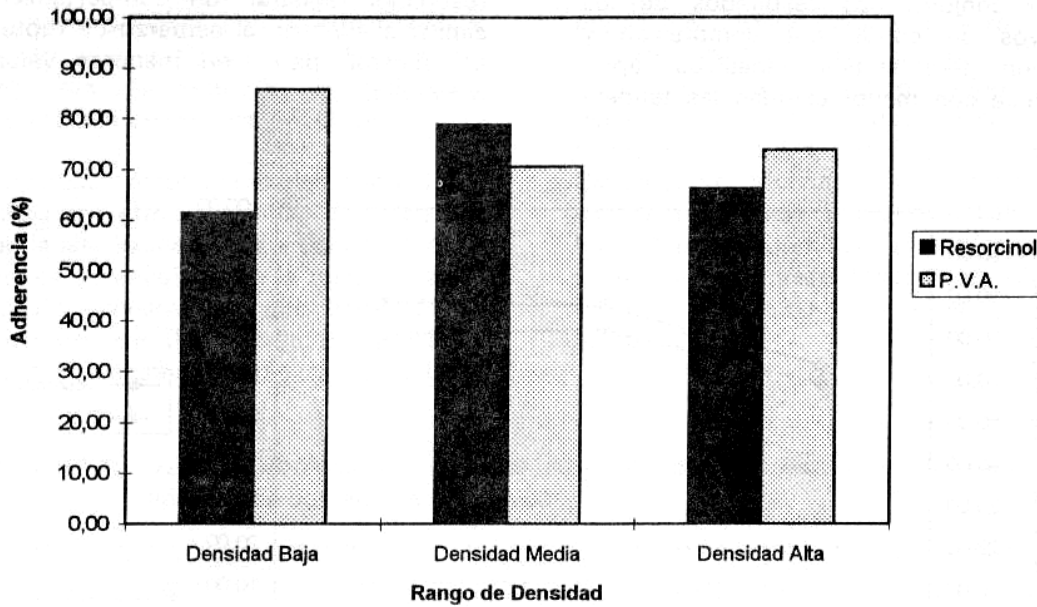


Figura N° 3: Adherencia en cizalle por compresión

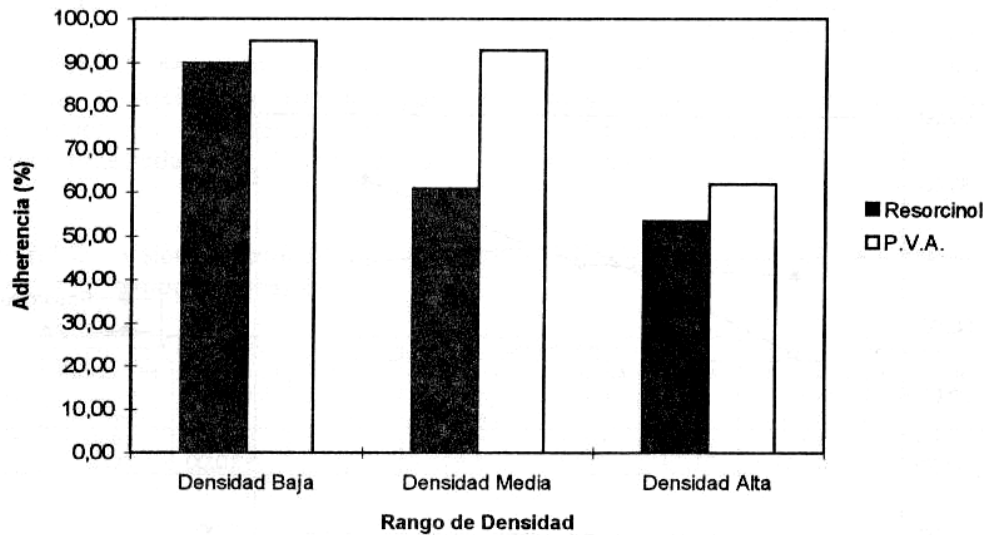


Figura N° 4: Adherencia en esfuerzo de tracción

Análisis microscópico

En el Cuadro 3 se presentan los resultados de la penetración relativa del adhesivo resorcinol formaldehído, en función de la densidad. Aparentemente,

a mayor densidad de la madera, la profundidad de penetración tiende a ser menor en número de células. Los valores observados representan la variación encontrada para cada rango de densidad, siendo estos valores los más frecuentes.

Cuadro N° 3: Penetración relativa en número de células y espesor de línea de cola para resorcinol formaldehido

Densidad	Penetración (n° de células)		Espesor Línea de cola promedio		
	Madera Primavera	Madera Verano	N° Obs.	(Micrones)	C.V.
Baja	2-5	1-3	20	112	24,23
Media	2-5	1-2	20	117	18,15
Alta	2-4	1-2	20	115	20,43

Para madera de verano, la penetración estuvo limitada a las células inmediatamente adyacentes a la línea de cola, en madera de densidad baja la penetración es de 1 a 3 células como máximo, lo que equivale a una distancia de 35,9 a 107, 7 μ . A diferencia de la madera de primavera en que la penetración fue claramente superior, con rangos de 2 a 5 células en promedio y con máximos de 6 a 7 células (158,9 a 185,4 μ).

En numerosos estudios (Ulloa, 1962; Morales, 1968; Diaz-Vaz, 1981; Oelmastro, et al, 1982; entre otros), se ha señalado que el incremento de la densidad de la madera de pino radiata va asociado a cambios en las dimensiones celulares de las traqueidas tanto en madera de primavera como en madera de verano, lo que también se obtuvo en este estudio, donde la madera de primavera y verano tienen traqueidas con un diámetro promedio de 35,9 μ y 26,5 μ ; diámetro de fumen de 24,8 μ y 15,8 μ ; y diámetro de puntuación de 21,2 μ y 11, 7 μ respectivamente. Estas diferencias en las dimensiones celulares entre madera de primavera y verano explican no sólo el aumento de la densidad al decrecer la relación madera de primavera/verano, sino que también, la mayor penetración del adhesivo en las células de la madera de primavera.

Estas variaciones dimensionales, a nivel celular, además del aumento en la proporción de la madera de verano y un menor ancho de los anillos, debido a una menor tasa de crecimiento, son los principales factores que determinan la variación de la densidad de la madera, fundamentalmente de médula a corteza. Por otro lado, también determinan una mayor penetración del adhesivo en la madera de primavera, la cual tiene células con lúmenes de mayor diámetro

y puntuaciones más grandes, lo que facilita el flujo del adhesivo hacia el interior de la madera.

La variación experimentada por la resistencia de la unión encolada, puede asociarse a la penetración del adhesivo en la madera, requisito necesario para crear una zona de transición con propiedades mecánicas intermedias entre las del adhesivo y las de la madera (Hare y Kutscha (1974); White (1977); Blomquist et al (1983).

En la bibliografía, se ha señalado la existencia de una disminución de la penetración del adhesivo en la madera con el aumento de la densidad, estando los valores más satisfactorios de resistencia mecánica asociados a un nivel intermedio de penetración, considerándose los niveles extremos como una causa importante en la disminución de la resistencia, ya sea por una excesiva penetración con densidades bajas o un excesivo escurrimiento lateral de adhesivo con densidades altas (Hse, 1968; Biblis y Chiu, 1971) y concordando de esta forma con los resultados obtenidos por Bassett (1960), quien estableció una relación de tipo cuadrática entre densidad de la madera de una especie tropical (*Ochroma lagopus* Sw.) y la resistencia mecánica de la unión encolada, lo cual concuerda con las tendencias encontradas en este trabajo.

En cuanto al espesor de la línea de cola se aprecia una regularidad en la magnitud, siendo un buen indicador de adecuadas condiciones de encolado, con valores dentro de los óptimos señalados en la literatura (0,1-0,2 mm), deduciéndose, que prácticamente, para los tres rangos de densidad se presentaron valores muy

similares, existiendo una leve tendencia al aumento del espesor de la línea de cola a medida que se incrementa la densidad de la madera.

CONCLUSIONES

Los resultados permiten establecer la existencia de una clara influencia de la densidad en la encolabilidad de la madera de pino radiata (*Pinus radiata* D. Don), considerando uniones adhesivas con una emulsión de acetato de polivinilo y resorcinol formaldehído, sometidos a ensayos mecánicos en cizalle por compresión para uniones laminadas y de tracción para uniones dentadas (finger joint).

En el ensayo de cizalle por compresión, el esfuerzo de ruptura para ambos adhesivos (con valores promedio superiores para acetato de polivinilo), tiende a incrementarse en una tasa decreciente a medida que aumenta la densidad de la madera, llegando incluso a bajar levemente en los encolados de densidad alta para el adhesivo resorcinol formaldehído.

En el ensayo de tracción, la tendencia presentada por los encolados con resorcinol formaldehído es la misma que para el ensayo de cizalle por compresión. Sin embargo, con acetato de polivinilo este incremento es diferente, ya que los encolados de densidad alta presentaron un valor claramente superior a los otros tratamientos (densidad baja y media). Este resultado es atribuible a una diferente forma de preparación del ensamble (unión dentada), adhesivo y las condiciones de aplicación.

La adherencia, en general no presenta una tendencia clara. Por el contrario exhibe una gran variabilidad. Sin embargo, con acetato de polivinilo el porcentaje de falla de la madera tiende a disminuir con incrementos en el esfuerzo de ruptura, siendo tal comportamiento el teórico esperado.

La penetración del adhesivo resorcinol formaldehído en la madera, difiere en forma evidente entre la densidad de la madera de primavera y la madera de

verano; en ésta última, la penetración es claramente menor, debido a su más baja porosidad, asociada a pequeños lúmenes, mayor espesor de la pared celular, menor diámetro de traqueidas y puntuaciones.

En madera de primavera la penetración promedio varió en un rango de 2 a 5 células de profundidad y 1 a 3 células en madera de verano.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero del Departamento Técnico de Investigación de la U. de Chile (D.T.I.), a través del Proyecto N° A 3041 /9011 del cual este estudio forma parte.

LITERATURA CITADA

Alvarez, M. 1985. Comportamiento de la inclinación del plano de encolado respecto a la dirección de las fibras. Tesis Ing. Forestal. Universidad Austral de Chile. 46 p.

Bassett, K. 1960. Effect on certain variables on strength of glued end promediand joints. Forest Products Journal. 10(11): 579-585.

Biblis, J. y Chiu, Y. 1971. Gluability of loblolly pine earlywood and latewood. Wood and fiber. 3(4): 220-229.

Blomquist, R. 1983. Adhesive bending of wood and other structural materials. Educational and Modules for materials. Science and Engineering Proyecto Pennsylvania State University, Materials Research Laboratory.

Castillo, E. 1988. Propiedades mecánicas de uniones encoladas para dos adhesivos de tipo termoplástico. Tesis I. Forestal. U. de Chile. 142 p.

Delmastro, R.; Diaz-Vaz, J.; Schlatter, V. 1982. Variabilidad de las características tecnológicas hereditarias de *Pinus radiata* (D. Don). CONAF/ PNUD/FAO. Doc. de Trabajo N° 43.

- Ojal-Val, J. 1981. Delimitación de madera temprana-tardía y juvenil madura en Pino oregón. *Bosque* 4(1): 55-58.
- Garay, R.M. 1986. Influencia del ángulo de incidencia y posición relativa de las fibras en la resistencia mecánica de madera encolada. Tesis Ingeniería Forestal. U. de Chile. 114 p.
- Hare, A. y Kutscha, P. 1974. Microscopy of eastern spruce plywood gluelines. *Wood Science* 6(3):294-304.
- Hse, C. V. 1968. Gluability of Southern pine earlywood and latewood; *Forest Products Journal*. 18(12):32-36.
- Molina, J. 1993. Caracterización mecánica de elementos de madera laminada para usos especiales. Tesis Ing. Forestal. U. de Chile. 108 p.
- Morales, R. 1968. Variación del peso específico y largo de traqueidas según edad y sitio en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don. Tesis Ingeniería Forestal. Universidad de Chile. 59 p.
- Pizzi, A. 1983. *Wood Adesives and Technology*. Marcel Dekker. Inc. New York.
- Poblete, H. 1978. Uniones de madera con adhesivos. Publicación Técnica N° 1. U. Austral de Chile.
- Skeist, Y. 1966. *Manual de Adhesivos*. México, editorial Continental S.A.
- Ulloa, I. 1962. Variación del largo de traqueidas en relación al peso específico en pino insigne. Tesis Ingeniería Forestal. Universidad de Chile. 46 p.
- White, M.S. 1977. Influence of resin penetration on the fracture toughness of wood adhesive bonds. *Wood Science*. 10(1): 6-14.