

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA EN MADERA



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

**PISOS DE MADERA DENSIFICADA CON ESPECIES
DE RÁPIDO CRECIMIENTO: *PINUS RADIATA* Y
*EUCALYPTUS NITENS***

Tesis presentada en el Departamento de Ingeniería en Maderas de la Universidad del Bío-Bío para la obtención del grado de Magíster en Ciencia y Tecnología de la Madera.

Trabajo de Habilitación Profesional presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de Ingeniero Civil en Industrias de la Madera.

DÉBORA SOLEDAD PINO PALMA

Director de Tesis William Gacitúa Escobar. Ph.D., Depto. Ing. en Maderas
Facultad de Ingeniería, Universidad del Bío-Bío.

Co-Directora: Cecilia Bustos Avila. Ph.D., Depto. Ing. en Maderas
Facultad de Ingeniería, Universidad del Bío-Bío.

CONCEPCIÓN – CHILE

2017

AGRADECIMIENTOS

Al finalizar esta etapa, quisiera agradecer a todos los que me apoyaron durante este proceso, especialmente a mis profesores que me guiaron y enriquecieron de conocimientos durante toda la estadía en esta casa de estudio. Agradecer de forma especial a mi director de tesis y profesor William Gacitúa, por confiar en mí, por el cariño y por fortalecerme cada vez que lo necesite. Muchas gracias también a mi Co-directora Cecilia Bustos, por guiarme y asesorarme durante la ejecución de esta investigación, además de invitarme a participar del proyecto FONDEF IDEA CA 13i10310 a raíz del cual realicé mi tesis de magíster, también dar las gracias, al proyecto INES 14-40 por apoyo financiero durante mis estudios.

Agradecer también al Laboratorio de Biomateriales y Nanotecnología, en especial a Jorge Chávez y Alfredo Winterstein buena disposición, al personal del Pabellón de Tecnología de la Madera de la Universidad del Biobío, y al personal del CATEM de la universidad del Biobío, quienes hicieron posible la materialización de este proyecto. Agradecer también a Daniel Torres, por el trabajo realizado en conjunto en la ejecución de esta tesis. A mis Amigos y compañeros, que han dejado una hermosa huella en este largo camino.

Finalmente y lo mas importante, agradecer a Dios y a mi hermosa familia por ser un pilar fundamental en mi vida, en especial agradezco a mi Madre Eva Palma y a mis hermanos por su amor y su apoyo incondicional, agradezco además a mi persona especial, Ignacio Susperreguy por su amor verdadero, gran apoyo y por el tesoro más grande que me pudo dar, mi pequeño Sebastián, amor infinito.

RESUMEN

En esta investigación se fabricó un piso de ingeniería con la superficie densificada con maderas de *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens*. Adhesivo urea formaldehído y sustratos de OSB y contrachapado fueron usados. Las propiedades de cada uno de los componentes del piso fueron medidas para conocer sus propiedades físicas y mecánicas. Una vez el piso fue fabricado se analizaron sus propiedades físicas, mecánicas y nanomecánicas. Mediante el SEM (scanning electron microscopy) se evaluó la morfología de la zona de la interfase (madera-adhesivo-madera). El envejecimiento acelerado permitió observar y medir el comportamiento de la superficie del piso laminado sometida a rayos UV y a condensación. Luego con las propiedades de las láminas que componen el piso, se realizó un modelamiento a través de la teoría clásica de laminación, con el fin de obtener propiedades mecánicas del piso compuesto.

Se logró ratificar que las chapas de madera densificada que componen el piso de ingeniería tienen mayores propiedades físicas y mecánicas que las chapas sin tratamiento de densificación. Mediante los ensayos físicos, mecánicos y nanomecánicos realizados a los pisos fabricados, se logró corroborar que los pisos con tratamiento de densificación en su superficie, tienen un aumento significativo en sus propiedades en comparación con los pisos sin el tratamiento de densificación. La morfología de la interfase en pisos de ingeniería, mostró que el tratamiento de densificación afecta la penetración del adhesivo. A través del envejecimiento acelerado se logra observar el buen comportamiento de los pisos con la superficie densificada, además de comprobar la eficacia del barniz poliuretano para la protección de la superficie del piso de ingeniería. A través del software MatLab se realizó el modelamiento con la teoría clásica de laminación, sin embargo y luego de la comparación con las propiedades del compuesto obtenidas experimentalmente, no fue posible la validación de este.

ABSTRACT

In this research, an engineered wood flooring was fabricated with a densified surface of *Pinus radiata* and *Eucalyptus nitens*. Urea formaldehyde adhesive and OSB and plywood substrates were used. The properties of each of the floor components were measured to determine their physical and mechanical properties. Once the engineered wood flooring was fabricated, its physical, mechanical and nanomechanical properties were analysed. SEM (scanning electron microscopy) evaluated the morphology of the interface zone (wood-adhesive-wood). Accelerated aging allowed to observe and measure the behaviour of the surface of the laminate flooring treated with UV rays and condensation. Then with the properties of the veneers that form the floor, a model was made through the classical lamination theory, to obtain mechanical properties of the floor compound.

It was possible to confirm that the densified wood veneers that form the engineered wood floor have greater physical and mechanical properties than sheets without densification treatment. By means of the physical, mechanical and nanomechanical tests carried out on the manufactured floors, it was possible to corroborate that the floors with treatment of densification in their surface, have a significant increase in their properties compared to the floors without the treatment of densification. The morphology of the interface in engineering floors showed that the densification treatment affects the penetration of the adhesive. Through accelerated aging it is possible to observe the good behavior of the floors with the densified surface, besides checking the efficiency of the varnish polyurethane for the protection of the surface of the engineered wood floor. Through the MatLab software modeling was done with the classical lamination theory, however, and after the comparison with the properties of the compound obtained experimentally, it was not possible to validate this.

PREFACIO

Este estudio se desarrolló al alero del proyecto FONDEF IDEA CA 13i10310 denominado “Densificación y nanocaracterización de maderas de rápido crecimiento para productos de ingeniería de alto valor”.

Esta tesis se realizó en el contexto de la articulación entre la habilitación profesional de la carrera de Ingeniería Civil en Industrias de la Madera y el Magíster en Ciencia y Tecnología de la Madera, del Departamento de Ingeniería en Maderas de la Universidad del Bío-Bío. Desarrollada principalmente en el Centro de Biomateriales y Nanotecnología (CBN) de la Universidad del Bío-Bío.

La tesis es presentada en modalidad de artículos científicos; los cuales son presentados en 3 capítulos. Los resultados del capítulo 1 fueron sometidos en la Revista Maderas Ciencia y Tecnología, indicada en las bases de datos ISI Thomson Reuters (Web of Science).

Otros resultados de esta investigación, también fueron expuestos en el III encuentro de investigadores de estudiantes de Postgrado de la universidad del Bío-Bío, realizadas en año 2015 en la Universidad del Bío-Bío.

*A mi hijo Sebastián, a mi madre Eva, a mis hermanos y familia, a mi novio
Ignacio, profesores, compañeros y amigos.*

INDICE

CONTENIDO	90
AGRADECIMIENTOS.....	i
RESUMEN.....	ii
ABSTRACT.....	iii
PREFACIO.....	iv
ÍNDICE.....	vi
LISTA DE TABLAS.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii-ix
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1: Caracterización física y mecánica de la materia prima para la fabricación de pisos de ingeniería	10
CAPÍTULO 2: Fabricación y determinación de las propiedades físicas, mecánicas y nanomecánicas de los pisos de ingeniería	34
CAPÍTULO 3: Modelamiento de las propiedades mecánicas del piso de ingeniería a través de la teoría clásica de laminación.....	66
CONCLUSIONES GENERALES.....	82
BIBLIOGRAFÍA.....	83
ANEXO 1: Rutina computacional creada en MatLab, (código del modelamiento).	

LISTA DE TABLAS

TABLAS CAPÍTULO 1

Tabla 1-1: Densidades y contenido de humedad para chapas densificadas y sustratos del piso.

Tabla 1-2: Resultados de Viscosidad y pH de adhesivo urea formaldehído.

TABLAS CAPÍTULO 2

Tabla 2-1: Variables de prensado para la adhesión de madera densificada en los sustratos de OSB y contrachapado.

Tabla 2-2: Etapas del ciclo (12 horas) de envejecimiento UV.

Tabla 2-3: Espesor promedio (μm) de la interfase del piso de ingeniería.

Tabla 2-4: Módulo de Elasticidad (E_r) en pared celular y en adhesivo de pisos de *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens*.

Tabla 2-5: Módulo de elasticidad de la interfase (E_i) para pisos de *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens* con distintas condiciones.

Tabla 2-6: Módulo de elasticidad E del piso ingeniería en ensayo de tracción paralela

TABLAS CAPÍTULO 3

Tabla 3-1. Propiedades de los materiales para alimentar el modelo obtenidas en los capítulos 1 y 2 de esta tesis.

Tabla 3-2: Características del laminado.

Tabla 3-3: Módulo de elasticidad de los laminados E_l obtenidos a través del modelamiento con la teoría clásica de laminación y de forma experimental.

LISTA DE FIGURAS

FIGURAS INTRODUCCIÓN:

Figura Intro. -1: Diferencia entre madera sin densificar y madera densificada con el método de THM con una compresión de 130% (Rautkarie et al. 2011).

Figura Intro. -2: Diferencia que existe entre madera sin densificar y madera densificada a nivel microescala (Kamke, 2006), (i) Pared celular sin tratamiento de densificación; (ii) Pared celular con tratamiento de densificación.

Figura Intro. -3: Vista microscópica de la penetración del adhesivo PF en madera densificada (Kutnar et al. 2007).

Figura Intro. -4: Curvas de carga-desplazamiento típicos de nanoindentación en las paredes celulares de las fibras densificadas y no densificadas (Bustos et al., 2012).

FIGURAS CAPITULO N° 1:

Figura 1-1: Dimensiones probeta tipo I “hueso de perro” para sustratos.

Figura 1-2: Dimensiones probeta tipo V “hueso de perro” madera densificada.

Figura 1-3: Ensayo de tracción de probetas (Software TestXpert II V3.1).

Figura 1-4: Imágenes obtenidas a través del software Video x Tens versión 5.28

Figura 1-5: Probeta hueso de perro con marcadores en tiras adhesivas dispuestas con ángulo de 5°.

Figura 1-6: Tracción Paralela E (GPa): **(a)** Sustratos ; **(b)** Chapas densificadas y chapas sin densificar. Las barras de error representan la desviación estándar con respecto a la media.

Figura 1-7: Tracción perpendicular E (GPa): **(a)** Sustratos; **(b)** Chapas densificadas y chapas sin densificar. Las barras de error representan la desviación estándar con respecto a la media.

Figura 1-8: Razón de Poisson paralela (ν): **(a)** Sustratos ; **(b)** Chapas densificadas y Chapas sin densificar. Las barras de error representan la desviación estándar con respecto a la media.

Figura 1-9: Razón de Poisson perpendicular: **(a)** Sustratos ; **(b)** Chapas densificadas y Chapas sin densificar. Las barras de error representan la desviación estándar con respecto a la media.

FIGURAS CAPITULO N° 2:

Figura 2-1: Fabricación de piso laminado.

Figura 2-2: Perfilado del piso de ingeniería con sustrato contrachapado.

Figura 2-3: Esquema interfase adhesivo-madera (Müller *et al.* 2009).

Figura 2-4: Porta muestra con probetas ordenadas respectivamente en condiciones control, densificadas y densificada con barniz: **(a)** Probetas *Pinus radiata*; **(b)** Probetas de *Eucalyptus nitens*.

Figura 2-5: Escala de color, coordenadas cromáticas numéricas.

Figura 2-6: Dureza Brinell para pisos de *Eucalyptus nitens* con condiciones: control, densificado, densificado con barniz **(a)** Piso con sustrato OSB; **(b)** Piso Sustrato contrachapado. Gráfico de barras de error representando valores medios.

Figura 2-7: Dureza Brinell HB para pisos de *Pinus radiata* con condiciones: control, densificado, densificado con barniz: **(a)** Piso con sustrato OSB; **(b)** piso con sustrato contrachapado. Gráfico de barras de error representando valores medios.

Figura 2-8: Probetas con marcas de indentaciones después del test de dureza Brinell para cada especie y condición del piso **(a)** Probetas de piso *Pinus radiata*; **(b)** Probetas de piso *Eucalyptus nitens*.

Figura 2-9: Adsorción de Humedad en pisos de *Eucalyptus nitens*, según su condición y sustrato que lo componen.

Figura 2-10: Adsorción de Humedad en pisos de *Pinus radiata*, según su condición y sustrato que lo componen.

Figura 2-11: Diferencia de color pisos de *Pinus radiata*.

Figura 2-12: Diferencia de color pisos de *Eucalyptus nitens*.

FIGURAS CAPITULO N° 3:

Figura 3-1: Materiales compuestos. (a) Compuesto reforzado con partículas. (b) Compuesto reforzado con fibras, el cual es un compuesto laminado (la matriz se forma apilando láminas) unidireccional (las fibras están orientadas en este caso en una sola dirección).

Figura 3-2: Geometría y coordenadas de laminado. Suna, B. (2014).

Figura 3-3: Geometría de piso laminado según la teoría clásica de laminación.

INTRODUCCIÓN

Después de la segunda guerra mundial, una serie de productos alternativos a los pisos tradicionales, surgieron como alternativas a esto las alfombras y cubrepisos, el linóleo y sus variantes, las baldosas y cerámicas. Características tales como su rapidez de instalación, facilidad de mantención y precio, entre otros, hicieron que los consumidores los incorporaran rápidamente en sus preferencias. A partir, de años de los noventa, se produjo un vuelco hacia lo natural y, en particular, hacia aquellos productos con mayor tradición y nobleza, situación que ha traído un renovado interés por los pisos de madera. Soto y Gysling (2009).

En Chile, la producción de pisos es marginal respecto de otros productos forestales elaborados y las importaciones superan enormemente las exportaciones. Principalmente son importado desde Brasil, Alemania, Bélgica, España, Indonesia, Malasia o China. (INFOR, 2016).

Los pisos sólidos tienen mejores posibilidades de desarrollo dado que en el mercado mundial éstos son enteramente fabricados con maderas latifoliadas (madera duras). Sin embargo en Chile, la madera nativa limita su uso, debido a que están especies presentan una tasa de crecimiento muy lenta. El *Pinus radiata* en cambio, es la principal especie comercial de uso estructural en el país, con una superficie del 58% del total de los bosques plantados (INFOR, 2016). Con una densidad de 450 kg/m³, Akpabio, (2012). El *Eucalyptus nitens* es otra especie de importancia comercial, alcanza un 10,8% de la superficie total de bosques de plantación, siendo la tercera especie más plantada en Chile (INFOR, 2016). Su aplicación se concentra principalmente en la industria de celulosa. Se caracteriza por presentar crecimientos cercanos a 30 a 45 m³/ha/año. En determinaciones de densidades realizadas en la madera de *Eucalyptus nitens* de árboles en edades entre 15 y 16 años, se ha registrado una densidad básica promedio de 510 kg/m³ (Poblete, 2002). Sin embargo para la fabricación de pisos de madera estas especies están limitadas debido principalmente a su densidad, considerando que las densidades media de los de pisos de madera son los siguientes: piso laminado 938kg/m³, piso de madera maciza 709kg/m³, pisos de ingeniería 638kg/m³. Seo *et al.* (2011).

La densidad es una de las propiedades más importantes de la madera, ya que está fuertemente correlacionada con otras propiedades como la resistencia mecánica, la rigidez, la conductividad térmica y el calor específico. Su diferencia entre especies depende de varios factores, como por ejemplo; tipos de células, diámetro de las fibras, espesor de las paredes y contenido de extraíbles (Díaz-Vaz J. , 2003).

La densificación de la madera, permite aumentar la densidad y la dureza a través de la compresión. Se han creado varios procesos de densificación, los cuales han sido bien descritos por Navi y Heger (2004); Kamke *et al.* (2006).

Fang *et al.* (2010) observaron una reducción en la higroscopicidad de la madera, por efecto del aumento de la temperatura en el proceso de densificación. Inoue *et al.* (2008), mencionan que al aumentar la temperatura de densificación a 220°C se produce una disminución de la dureza Brinell.

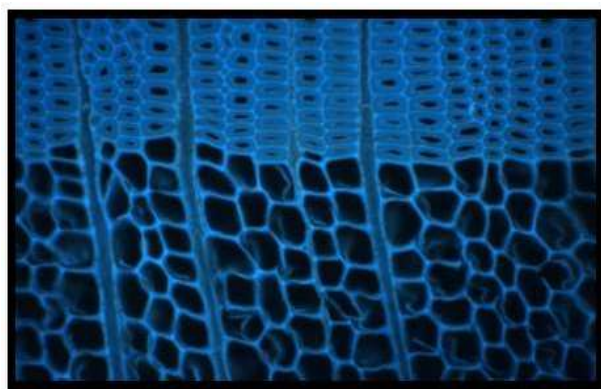
Recientemente, se han desarrollado diferentes procesos de densificación de madera, de los cuales los más utilizados han sido: Compresión Térmica Viscoelástico (VTC), Tratamiento de aceite térmico (OHT), Tratamiento de densificación con productos químicos, Proceso de Termo-Higromecánico (THM). Sin embargo el método (THM) ha logrado mejores propiedades (Navi y Heger, 2005).

Proceso de Termo-Higromecánico (THM)

El proceso de termo-higromecánico (**Figura 1 y 2**), fue desarrollado por Navi y Heger (2000) y aplicado por Bustos *et al.* (2012). Consiste en un método de densificación mediante la presión, calor y vapor. El proceso THM, además permite mejorar la estabilidad física, mecánica y dimensional de la madera (Navi y Girardet 2000, Li *et al.*, 2013). Figura (1 y 2).



Figura 1: Diferencia entre madera sin densificar y madera densificada con el método de THM con una compresión de 130% (Rautkari et al. 2011).



(a)



(b)

Figura 2: Diferencia que existe entre madera sin densificar y madera densificada a nivel microescala (Kamke, 2006), (a) Pared celular sin tratamiento de densificación; (b) Pared celular con tratamiento de densificación.

Bustos *et al.* (2012), concluyen que los módulos de elasticidad y dureza Brinell de la pared celular de maderas densificadas, fueron alrededor de dos veces más altos que el control. Por otro lado, Cloutier *et al.* (2008) relacionan el aumento de la temperatura con el cambio de color de la madera; a mayor temperatura de densificación, más oscura se torna la madera. Este fenómeno se atribuye, a la reacción de polimerización de los componentes químicos de la madera, en especial la lignina durante el tratamiento (Mayer y Koch 2007, Kutnar *et al.* 2009).

Fang *et al.* (2012), utilizan el método de densificación THM, para la fabricación de un piso de madera con una de madera densificada, logrando un material compuesto con altas propiedades físicas y mecánicas.

Entre las propiedades de mayor importancia para la fabricación de piso están: la densidad y la dureza, sin subestimar otros aspectos como la estética. Según, la Norma Chilena NCh 356 Of.62 para la fabricación de Parquet, la madera deberá ser sana y estar libre de defectos tales como gusaneras, albura, fibras sueltas, nudos sueltos, quemaduras, grietas y putrefacción, considerando estos aspectos para cualquier tipo de piso. Además, establece que la humedad media de las palmetas, deberá estar comprendida entre el 8% y el 12%. La determinación de la humedad se debe hacer de acuerdo a la NCh 176/1. Of 2003.

En la fabricación de un material compuesto como pisos de madera, se debe considerar otro aspecto importante, el cual está relacionado con la anisotropía del material. Así, el diseño del piso se convierte en un tema fundamental para su elaboración. Los compuestos laminados están formados por madera y otros materiales, y su diseño consiste en sobreponer una lámina sobre otra con una determinada orientación de fibra (Gutiérrez, 2007).

Existen varias teorías para el análisis de laminados. Dentro de estos modelos se encuentran la teoría clásica de laminación o CLT – Classical Laminated Theory.

La teoría CLT, permite conocer cómo se comporta cada lámina que compone el piso. En general se considera que cada lámina actúa como una capa individual al análisis y asume una interacción perfecta entre láminas (adhesión perfecta), condición que permite la transmisión continua de esfuerzos y deformaciones entre las capas del laminado (Gutiérrez, 2007). Considerando que el piso laminado debe tener adhesión perfecta entre láminas y que las chapas serán densificadas, Kutnar *et al.* (2007), demostraron que la ubicación del adhesivo en la interfase, cambia con el grado de densificación (**figura 3**). Además, observó que en la madera de control, el adhesivo penetra en los lúmenes, en cambio en la madera con tratamiento de densificación, penetra en los lúmenes de las fibras y también en los lúmenes de los radios. Según Kutnar *et al.* (2007), esto se debe principalmente a que la porosidad de la madera cambia producto de la densificación y el flujo del adhesivo sigue la dirección

menos resistente.

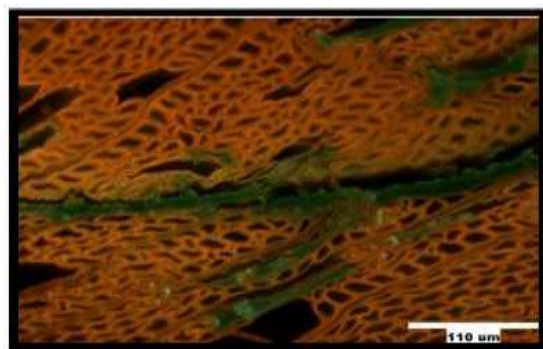


Figura 3: Vista microscópica de la penetración del adhesivo PF en madera densificada (Kutnar *et al.* 2007).

Para comprender y predecir el comportamiento de la adhesión y la región de la interfase madera-adhesivo-madera, se requiere del conocimiento de las interacciones que ocurren a nivel de nanoescala a través del método de la nanoindentación. La nanoindentación es una herramienta que permite evaluar el comportamiento mecánico de las células de la madera a escala micrométrica. Wang *et al.* (2013) definen esta técnica como una técnica de análisis no destructivo que proporciona valores de propiedades mecánicas de la madera con mucha exactitud.

Nanoindentaciones realizadas en la interfase, han demostrado que el módulo de elasticidad del adhesivo acetato de polivinilo (PVA) es menor al módulo de las paredes celulares de la madera, mientras que la dureza del adhesivo es ligeramente superior en comparación con las paredes celulares (Konnerth y Gindl, 2006).

Fang *et al.* (2012), con el fin de obtener información más detallada sobre las propiedades de la madera ya densificada, realizaron Nanoindentaciones de las muestras de madera, permitiendo obtener dureza y módulo de elasticidad de la estructura celular con mayor precisión.

Los datos de la curva carga-desplazamiento (**figura 4**) de los ensayos de nanoindentación se utilizan para calcular la dureza y modulo de elasticidad de la muestra.

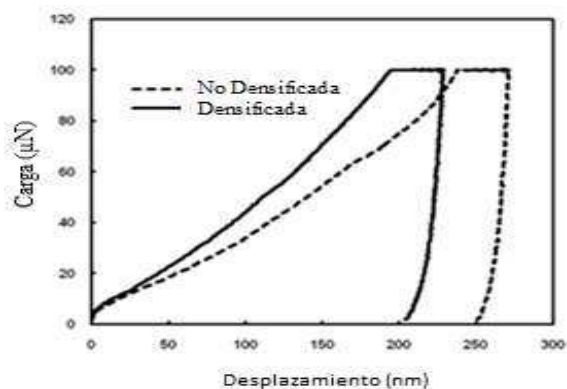


Figura 4: Curvas de carga-desplazamiento típicas de nanoindentación en las paredes celulares de las fibras densificadas y no densificadas (Bustos *et al.*, 2012).

Por otro lado, a escala macrométrica, la dureza es una de las propiedades más importantes en la madera destinada a la fabricación de parquet o pisos de madera (Lutz 1977, Niemz y Stübi 2000); la dureza tiene directa relación con la resistencia al rayado, el uso diario y la abrasión. En Europa, el método de determinación de dureza más utilizado para pisos es la prueba Brinell.

Las pruebas de Dureza Brinell se iniciaron en Suecia en el año 1900 por el Dr. J.A. Brinell. La prueba se usa principalmente para materiales metálicos y normalmente se aplican fuerzas entre 5000 y 30000 N con bolas de diámetro entre 5 y 10 mm. Para materiales más blandos como la madera se usan fuerzas más pequeñas que llega hasta 1000 N con una bola de 10 mm de diámetro, El procedimiento se encuentra planteado en la norma EN 1534.

La dureza Brinell en chapas densificadas según Fang *et al.* (2012) fue de aproximadamente el doble a la del control. Un cambio significativo en la dureza debido a la densificación también se ha informado de diferentes procesos de densificación (Inoue *et al.* 1996;. Kamke 2006; Navi y Heger 2005). Este alto aumento de la dureza puede ser debido al cierre de los lúmenes de los vasos y de fibra luego del tratamiento de densificación.

Es conocido que el tratamiento térmico de la madera mejora su estabilidad dimensional, su resistencia al deterioro biológico, y contribuye al cambio de color uniforme a tonos de color marrón oscuro (Kollmann *et al.* 1975;. Hill, 2006). A mayor temperatura en el tratamiento

térmico mayores efectos de estabilización dimensional Según Živković et al. (2008). El tratamiento térmico de la madera se ha conocido por mucho tiempo como un método eficaz para modificar las propiedades de la madera (Kollman y Fengel 1965). A veces se utiliza para cambiar las propiedades estéticas de la madera. Un termo-tratamiento siempre resulta en oscurecimiento de la madera, que a menudo se atribuye a la formación de productos de degradación de color de hemicelulosas y compuestos extractivos (Sundqvist y Morén 2002).

Los pisos de madera suelen estar protegidos por revestimientos transparentes, que idealmente podrían ayudar para conservar la apariencia natural de la madera. Estos recubrimientos son sensibles a la radiación UV; la luz ultravioleta (UV) puede penetrar a través de los pisos para iniciar reacciones fotoquímicas en el sustrato de madera subyacente, dando lugar a la decoloración. Pandey (2005) informó que los cambios en el color de la madera durante la irradiación de luz se correlacionaron con la descomposición de lignina. Entre los recubrimientos ensayados, la más alta resistencia a la luz durante la exposición de envejecimiento acelerado fue registrada para barniz de poliuretano.

Miklečić *et al.* (2011), señalan que para seleccionar una madera para un piso, no solamente se deben considerar buenas propiedades físicas y mecánicas para tener un piso de calidad, además es importante el acabado final del piso, al brindar una alta diversidad de productos que realzan su belleza y le aumentan su durabilidad.

Fang et al. (2012) desarrollaron un piso de ingeniería con madera densificada con muy buenos resultados en sus propiedades físicas y mecánicas. Esto aporta a la viabilidad técnica de desarrollo de nuevos productos de ingeniería para la construcción y soporta la idea de proyecto de investigar en el desarrollo de nuevos pisos de ingeniería utilizando las especies de rápido crecimiento del país. Además, el uso de nuevas tecnologías, diseño avanzado y modelamiento aportarán conocimiento enriquecedor para estos desarrollos.

PROBLEMA-OPORTUNIDAD

Las maderas de baja densidad no pueden competir con el uso de maderas nativas y de alta densidad en la industria de fabricación de pisos. Esto representa una desventaja en el uso de estas especies en esta aplicación. Es por ello que el problema detectado se relaciona con las bajas propiedades físicas y mecánicas que presentan las especies de rápido crecimiento como el *Pinus radiata* y el *Eucalyptus nitens*, principalmente por su baja densidad y dureza. En este escenario, el uso de la tecnología de densificación de madera por proceso THM representa una oportunidad de desarrollo en aplicaciones de maderas de baja densidad para la confección de pisos de ingeniería. El proceso THM es bueno porque permitirá aumentar considerablemente la densidad y la dureza de estas especies, además de ser una técnica libre de productos químicos y amigable con el medio ambiente.

HIPÓTESIS

Es posible desarrollar pisos de ingeniería de calidad con madera densificada, a partir de especies de rápido crecimiento que existen en Chile, con una dureza superficial del piso laminado superior en un 30% respecto a un piso de madera convencional, mejorando la estabilidad dimensional y aumentando la durabilidad del producto de ingeniería a desarrollar.

OBJETIVOS

1.1 Objetivos General

Desarrollar un piso con madera densificada en base a las especies de rápido crecimiento, *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens*.

1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades física y mecánica de la materia prima para la fabricación de los pisos de ingeniería.
- Fabricar los pisos de ingeniería con una superficie densificada.
- Caracterizar las propiedades física, mecánica y nanomecánica los pisos fabricados.
- Modelar las propiedades mecánicas de los pisos de ingeniería usando la teoría clásica de laminación.

CAPITULO 1: CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE LA MATERIA PRIMA PARA LA FABRICACIÓN DE PISOS DE INGENIERÍA.

Débora Pino, Mg.¹, Cecilia Bustos, Ph.D.¹, William Gacitúa, Ph.D.¹

¹ Departamento de Ingeniería en Maderas, Facultad de Ingeniería, Universidad del Bío-Bío.

E-mail: depino@alumnos.ubiobio.cl, cbustos@ubiobio.cl, wgacitua@ubiobio.cl

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue caracterizar física y mecánicamente la materia prima que compone el piso de ingeniería con madera densificada. Propiedades de láminas densificadas de *Pinus radiata* y de *Eucalyptus nitens*, que corresponden a las superficies de los pisos de ingeniería, de cada una de las especies, fueron caracterizadas. Además, las propiedades de los tableros contrachapados y OSB (Oriented Strand Board), que fueron el sustrato base de los pisos, fueron evaluaron. Ensayos de tracción fueron realizados para determinar el módulo de elasticidad (E) y Razón de Poisson de las láminas, así como también ensayos físicos para la obtención de la densidad y contenido de humedad (CH) del material. Urea formaldehído fue utilizado como adhesivo, al que se le analizó la viscosidad y el pH. Los valores de densidad obtenidos en chapas de madera densificada ratifican resultados de otros estudios, con un aumento de la densidad en hasta un 90% en el caso del *Pinus radiata* después del tratamiento de densificación. El contenido de humedad de las chapas densificadas y sustratos fluctúan entre 8% y 9%, encontrándose dentro de los parámetros establecidos para la fabricación de pisos. Los ensayos de tracción, muestran un aumento significativo para probetas con tratamiento de densificación en *Pinus radiata* y en *Eucalyptus nitens*, con valores de E paralelo que superan en un 220% y en 170% respectivamente, en relación a la madera sin tratamiento de densificación. Por otro lado, la razón de Poisson en probetas densificadas fue menor en hasta un 75% que las mismas probetas sin tratamiento de densificar. Y finalmente los resultados de pH y viscosidad del adhesivo urea formaldehído, se consideran apropiados para el tipo de uso que se dio al adhesivo.

Palabras claves: *Pinus radiata*, *Eucalyptus nitens*, densificación, piso de ingeniería.

CHAPTER 1: PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERIZATION OF THE RAW MATERIAL FOR THE MANUFACTURE OF LAMINATE FLOORING.

Débora Pino, Mg.¹, Cecilia Bustos, Ph.D.¹, William Gacitúa, Ph.D.¹

¹ Department of Engineering in Maderas, Faculty of Engineering, Universidad del Bío-Bío.

E-mail: depino@alumnos.ubiobio.cl, cbustos@ubiobio.cl, wgacitua@ubiobio.cl

ABSTRACT

The objective of this study was to characterize physically and mechanically the raw material that makes up the engineered wood floor with densified wood. The properties of densified veneers of *Pinus radiata* and *Eucalyptus nitens*, corresponding to the surfaces of the engineering floors of each of the species, were evaluated. The properties of the plywood and OSB (Oriented Strand Board) that were the base substrate of the engineered wood floors were also evaluated. Traction tests were performed to determine the modulus of elasticity (E) and Poisson ratio of the veneers, as well as physical tests to obtain the density and moisture content (CH) of the material. Urea formaldehyde was used as an adhesive, which was analyzed for viscosity and pH. The density values obtained in densified wood veneers confirm results from other studies, with a density increase of up to 90% in the case of *Pinus radiata* after densification treatment. The moisture content of the densified plates and substrates range from 8% to 9%, being within the parameters established for the manufacture of floors. The tensile tests show a significant increase for specimens with densification treatment in *Pinus radiata* and *Eucalyptus nitens*, with parallel E values that exceed by 220% and 170%, respectively, the value of E in relation to wood without densification treatment. On the other hand, the Poisson ratio in densified specimens was lower by up to 75% than the same specimens without densification treatment. Finally the pH and viscosity results of the urea formaldehyde adhesive are considered appropriate for the type of use given to the adhesive.

Key words: *Pinus radiata*, *Eucalyptus nitens*, densification, engineering floor.

INTRODUCCIÓN

Los pisos de ingeniería están formados por un conjunto de capas encoladas y dispuestas entre sí, generalmente la capa superior tiene espesores que van de 2 a 4 mm, y les otorga el valor estético y de dureza más alto al piso de ingeniería. La capa inferior, generalmente es de 8 mm de espesor y de menor calidad. La función de esta capa es la de proporcionar soporte físico y mecánico para la capa superior, previniendo las deformaciones que se puedan presentar en la superficie (Blanchet, P. 2004).

Fang *et al.* (2012), utilizaron como capa superior para la fabricación de un piso de ingeniería, una chapa de madera densificada con el método de densificación termo-higromecánico (THM), logrando un material compuesto con altas propiedades físicas y mecánicas.

La técnica de densificación, permite aumentar la densidad y la dureza a través de la compresión mecánica. Se han creado muchos procesos de densificación, los cuales han sido bien descritos (Navi y Heger 2005; Kamke *et al.* 2006). Chávez, (2015) utilizó el método de densificación THM para maderas de rápido crecimiento en Chile, es su estudio comprobó un aumento de la densidad por sobre 89% en el caso del *Pinus radiata* y un 39% en *Eucalyptus nitens*.

La dureza Brinell también tuvo un aumento favorable luego del tratamiento de densificación, aumentando mas allá del 130% para ambas especies. Dichos resultados favorecen el uso de este material para la construcción de piso de ingeniería.

En los pisos de madera las propiedades de mayor importancia corresponden a la densidad, dureza y otros aspectos como la estética. Según, la Norma Chilena NCh 356 Of.62, para la fabricación de Parquet, la madera debe estar sana y libre de defectos tales como gusaneras, albura, fibras sueltas, nudos sueltos, quemaduras, grietas y putrefacción, considerando estos aspectos para cualquier tipo de piso. Además, establece que la humedad media del piso,

deberá estar comprendida entre el 8% y el 12%. La determinación de la humedad se debe hacer de acuerdo a la NCh 176/1. Of 2003.

Un componente importante de un piso de ingeniería es el sustrato o capa inferior, también llamado centro o corazón, que proporciona el grosor deseado. Puede consistir en laminas de madera maciza, madera compuesta (contrachapado, tableros de partículas) o algún otro material. Además, esta capa puede contrarrestar las deformaciones de la capa superficial, por lo tanto debe ser lo suficientemente rígida. (Blanchet, 2004).

Como sustrato, es común encontrar contrachapado en un piso de ingeniería, debido a sus propiedades mecánicas que lo hacen ser un material rígido y de buena estabilidad dimensional.

Este tablero es obtenido por el encolado de chapas de madera que forman ángulo recto, las chapas o capas suelen disponerse en número impar para conseguir una sección simétrica, el contrachapado es un material ideal para usos estructurales debido a su ligereza y elevada resistencia, la densidad varía entre 400 y 700 kg/m³ aunque hay excepciones en ambos extremos dependiendo de la especie, el contenido de humedad se encuentra entre $10 \pm 2\%$, con respecto a la estabilidad dimensional es un producto muy estable porque se contrarrestan los movimientos de cada capa por el cambio de sentido de la fibra.

Para el OSB en cambio, existen muy pocos antecedentes de uso como sustrato de piso, siendo principalmente utilizado como recubrimiento. El tablero OSB es un producto elaborado a partir de virutas de madera, las cuales son unidas mediante un adhesivo.

Las virutas que conforman el tablero van dispuestas en capas perfectamente diferenciadas y orientadas: las capas exteriores son orientadas generalmente en dirección longitudinal mientras que las virutas de las capas internas son orientadas en dirección perpendicular a la longitud del tablero para posteriormente ser prensadas. La densidad típica del tablero se sitúa entre 600 y 680 kg/m³ (EN 13986).

Para predecir el comportamiento mecánico en servicio de los pisos de ingeniería, es necesario conocer las constantes elásticas de los materiales que lo componen, tales como el modulo de elasticidad (E) y la razón de Poisson. Variables de entrada fundamentales para predecir el comportamiento mecánico que tendrá el compuesto o laminado a través de la teoría clásica de laminación.

La elección del adhesivo, es relevante en la calidad del piso. Cuando se fabrican pisos con una capa superficial (> 3 mm), los pisos están destinados para uso a largo plazo, es decir, 75 años por lo tanto es importante saber si el adhesivo seleccionado es capaz de someterse a la fatiga causada por la expansión de la capa superficial y de las tensiones que causan estas expansiones en el tiempo, Blanchet *et al.* (2003).

El objetivo de este estudio fue caracterizar física y mecánicamente las materias primas para la fabricación de pisos de ingeniería.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia Prima

Láminas densificadas Proceso termo-higromecánico (THM)

Las láminas densificadas fueron fabricadas gracias a un estudio previo de los autores Chávez, 2015; el cual está vinculado al proyecto FONDEF IDEA CA13i10310 denominado “Densificación y nanocaracterización de maderas de rápido crecimiento para productos de ingeniería de alto valor”, para lo cual se utilizaron las especies de rápido crecimiento, *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens*.

El proceso de densificación se llevó a cabo en una prensa especialmente acondicionada, ubicada en laboratorios del Centre de recherche sur les matériaux renouvelables (CRMR) de la Université Laval en Canadá.

Las láminas de *Pinus radiata* para la fabricación del piso, fueron densificadas a 180°C de temperatura de prensado, 9000 kPa presión mecánica, 550 kPa de presión de vapor y 7 minutos de compresión. En *Eucalyptus nitens*, las láminas fueron densificadas a 160°C temperatura de prensado, 7000 kPa presión mecánica, 350 kPa de presión de vapor y 31 minutos de compresión.

Sustratos

Para la fabricación del piso, se utilizaron dos tipos de sustratos; contrachapado y OSB comerciales. El contrachapado fue un tablero estructural de 3 chapas y de 9,5 mm de espesor y el OSB es tablero estructural de 9,5 mm de espesor.

Adhesivo

El adhesivo utilizado para la fabricación del piso fue Urea Formaldehído, Ademix 2150, con un 1% catalizador E-36, proporcionado por la empresa Oxiquim S.A.

Métodos

1. Densidad y Contenido de Humedad

La densidad de referencia y el contenido de humedad de las chapas densificadas y de los sustratos se determinaron en base a las normas chilenas NCh 176/2 of 2003 y NCh 176/1 of 2003, con probetas de 3.5mm x 50mm x 50mm. Se evaluaron 15 probetas para cada una de las láminas y 15 probetas para cada uno de los sustratos.

Para la determinación de la densidad de referencia se utilizó la siguiente expresión:

$$\rho_a = \frac{m_a}{V_a} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1)$$

Donde, m_a = masa, en kilogramos de la probeta al contenido de humedad CH ;
 V_a = volumen, en metros cúbicos de la probeta al contenido de humedad CH .

Para la determinación de Humedad (CH) se utilizó la siguiente expresión:

$$CH = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 (\%) \quad (2)$$

Donde, m_1 = masa en gramos, de la probeta antes del secado; m_2 = es la masa, en gramos, de la probeta después del secado.

2. Ensayos de Tracción

1.2 Fabricación de probetas

Probetas tipo “hueso de perro” tipo I y V (**figura 1**), fueron preparadas para ensayos a sustratos (contrachapado y OSB) adoptando la norma de fabricación y ensayo “ASTM 638: “Método de prueba estándar para las propiedades en tracción de plásticos”, por la conveniencia que presenta la geometría de la probeta. En el caso de chapas de madera densificada se utilizó la probeta descrita en la norma tipo V (**figura 2**), debido a las dimensiones del material densificado.



Figura 1: Dimensiones probeta tipo I “hueso de perro” para sustratos.

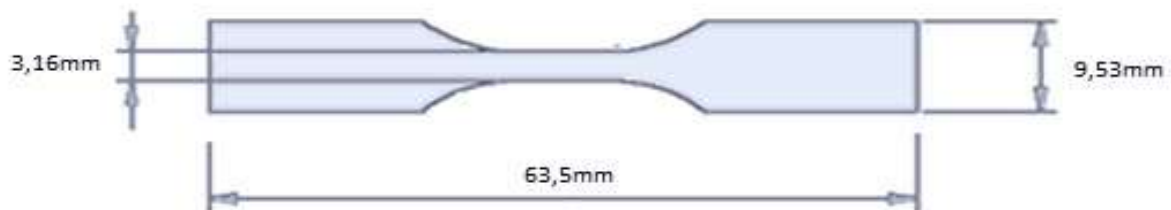


Figura 2: Dimensiones probeta tipo V “hueso de perro” madera densificada.

Los ensayos mecánicos de tracción de chapas, se realizaron en una máquina de ensayo universal marca Zwick Roell de 20 kN, ubicada en dependencias del Centro de Biomateriales y Nanotecnología de la Universidad del Bío-Bío.

Un total de 15 probetas fueron preparadas para cada sustrato, para chapas densificadas y chapas sin densificar. En las probetas de sustratos y chapas sin densificar se utilizó una velocidad de ensayo de 5 mm/min, según el tipo de probeta Tipo I. Para los ensayos de tracción en probetas de chapas densificadas, la velocidad de ensayo fue de 1 mm/min.

El sistema de mordazas utilizado aplicó una correcta sujeción de las probetas, disminuyendo considerablemente el movimiento de éstas en el ensayo (**figura 3**).

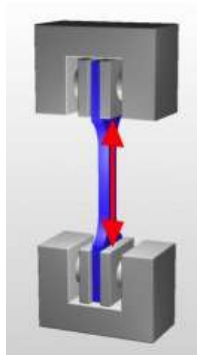


Figura 3: Ensayo de tracción de probetas (Software TestXpert II V3.1).

2.2. Determinación de la razón de Poisson

El coeficiente o razón de Poisson se obtiene a partir del ensayo de tracción usando extensometría por visión, gracias al software Video x Tens versión 5.28 y a una cámara que se encuentra incorporada en la máquina de ensayo (**Figura 4**).

Antes de realizar el ensayo, se adhieren unas marcas adhesivas en las probetas a ensayar con una inclinación de 5° (**figura 5**) estas marcas son visualizadas por la cámara y posteriormente, al realizar el ensayo de tracción, son leídas por el software que finalmente registra la relación negativa de deformación transversal respecto a la deformación longitudinal, que corresponde al coeficiente de Poisson.

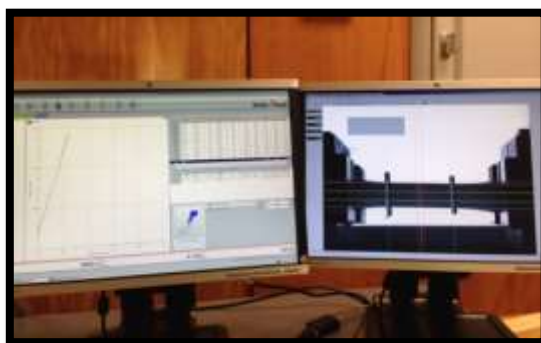


Figura 4: Imágenes obtenidas a través del software Video x Tens versión 5.28

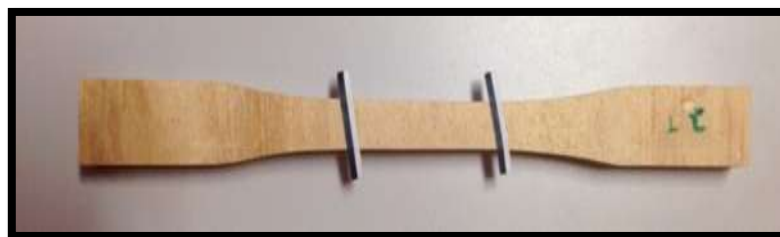


Figura 5: Probeta hueso de perro con marcadores en tiras adhesivas dispuestas con ángulo de 5°

3. Ensayos de Viscosidad y pH en adhesivo Urea Formaldehído

En este estudio se utilizó adhesivo Urea- Formaldehido (UF); el cual fue proporcionada por Oxiquim S.A. como base lista para usar. Antes de ser aplicado en los pisos de ingeniería se midió la Viscosidad y pH en la mezcla adhesiva para conocer su estado.

3.1 Ensayo de Viscosidad

Los ensayos de viscosidad se realizaron en el laboratorio de adhesivos y materiales compuestos de la Universidad del Bío-Bío, según la norma ASTM 907-96 (método B), utilizando un viscosímetro Brookfield, modelo LVF, un vaso precipitado de 500 ml formato alto, Termómetro de 0 a 100 °C, precisión 1 °C. Se realizaron un total de 15 mediciones para la determinación de viscosidad.

3.2 Ensayo de pH

Los ensayos de pH al igual que el de viscosidad, se realizaron en el laboratorio de adhesivos y materiales compuestos. Para determinar pH, se utilizó pH-metro digital provisto de electrodo combinado, marca Hanna. Se realizaron 15 mediciones para determinar pH.

Análisis estadístico

El análisis estadístico para todos los ensayos fue realizado con ayuda del software Statgraphics Centurion XVI. Se ignoraron puntos atípicos con el grafico caja y bigote y a través de la tabla ANOVA y de la prueba de multiples rangos se determinó si hay diferencias significativas entre las medias .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Densidad y contenido de Humedad

En la tabla 1 se presentan los resultados de densidad de referencia y de contenido de humedad obtenido en chapas densificadas y en sustratos utilizados en la fabricación de los pisos de ingeniería, además de los valores de densidad para el *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens* sin tratamiento de densificación.

La densidad promedio de referenica para *Eucalyptus nitens* con tratamiento de densificación fue de 913 kg/m³, mientras que en el *Pinus radiata* con tratamiento de densificación fue de 951 kg/m³. En los sustratos la media enOSB fue 679 kg/m³ y para el contrachapado 515 kg/m³.

La densidades de referencia en chapas densificadas de *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens* aumentaron en un 90% y 50% respectivamente su valor, en relacion a los valores de densidad de referencia de las maderas sin tratamiento de densificacion. Con este resultado se ratifica lo expuesto por Chávez (2015), demostrando un aumento de la densidad de 97% en *Pinus radiata* con respecto a la misma madera sin tratamiento de densificación.

Tabla 1: Densidades de referencia y contenido de humedad para chapas densificadas y sustratos del piso.

Parámetros estadísticos	Densidades (kg/m ³)						CH (%)			
	<i>Eucalyptus nitens</i> sin tratamiento	<i>Eucalyptus nitens</i> densificado	<i>Pinus radiata</i> sin tratamiento	<i>Pinus radiata</i> densificado	OSB	Contrachapado	<i>Eucalyptus nitens</i> densificado	<i>Pinus radiata</i> densificado	OSB	Contrachapado
Media (%)	606	913	502	951	679	515	8	8	8	9
n	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
SD (%)	23,9	21,4	16,6	19,3	20,8	17,8	0,3	0,5	0,3	0,5

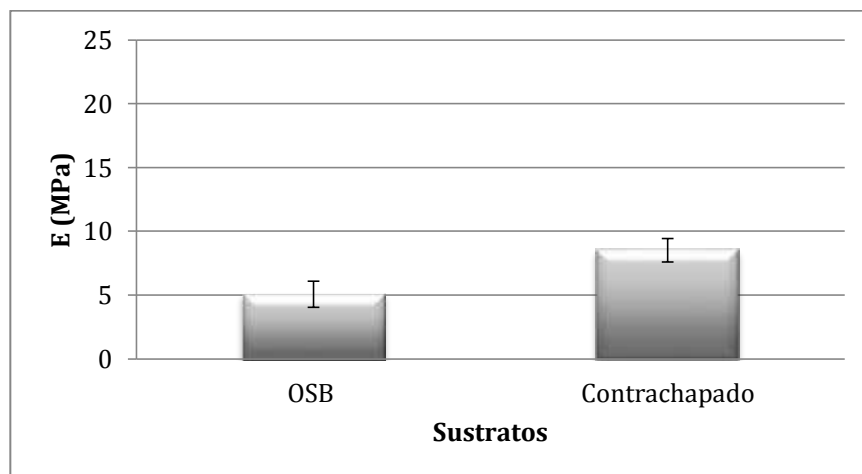
n: Número de muestras; SD: Desviación estándar.

El valor de CH en ambas especies densificadas correspondió a un 8%. Del mismo modo para los sustratos, se obtuvo un 8% en *OSB* y 9% en contrachapado. Los resultados obtenidos en la determinación del contenido de humedad demuestran que los valores CH se encuentran dentro de los rangos utilizados para la fabricación de un parquet, que fluctúa entre 8 y 12%, según lo establece la norma NCh 356.

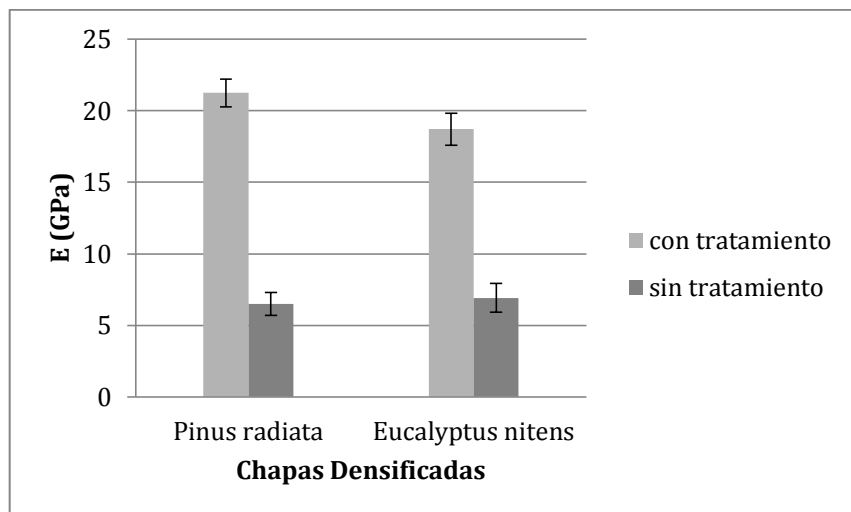
2. Ensayos de tracción

Tracción paralela en sustratos, en chapas de madera densificadas y sin tratamiento de densificación.

Los resultados expuestos en la figura 6.a y 6.b corresponden al valor de E en tracción paralela en sustratos y en chapas de *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens* con y sin tratamiento de densificación, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 6: Tracción Paralela E (GPa): (a) Sustratos ; (b) Chapas densificadas y chapas sin densificar. Las barras de error representan la desviación estándar con respecto la media.

Los resultados de E en tracción paralela en OSB y contrachapado fueron 5,0 GPa y 8,5 GPa respectivamente (figura 6.a). El ANOVA mostró una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de E de ambos sustratos con un nivel de 95% de confianza. Esto se podría explicar por la composición que tienen estos tableros. Existe una mayor resistencia a la tracción en el caso del contrachapado, debido a que están compuestos de láminas de madera pegadas entre ellas, ordenadas una sobre otra, con las fibras cruzadas perpendicularmente. Esto confiere a al tablero buenos valores de rigidez, resistencia mecánica y estabilidad dimensional, Maloney (1996). Sin embargo, en los tableros de OSB ocurre el efecto contrario debido a su estructura, dado que estos están diseñados con fibra corta y orientadas de forma irregular, por lo cual se podría explicar el menor valor de resistencia a la tracción.

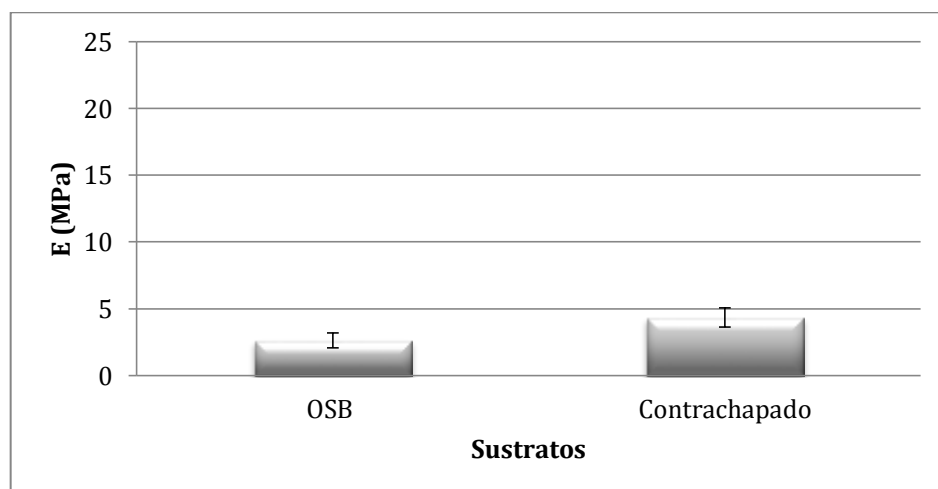
En tracción paralela (figura 6.b) de madera densificada de *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens*, los E arrojaron resultados de 21,2 y 18,7 GPa respectivamente. El ANOVA evidenció que existe una diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las

dos especies densificadas, con un nivel del 95% de confianza, siendo mayor en el caso de *Pinus radiata*.

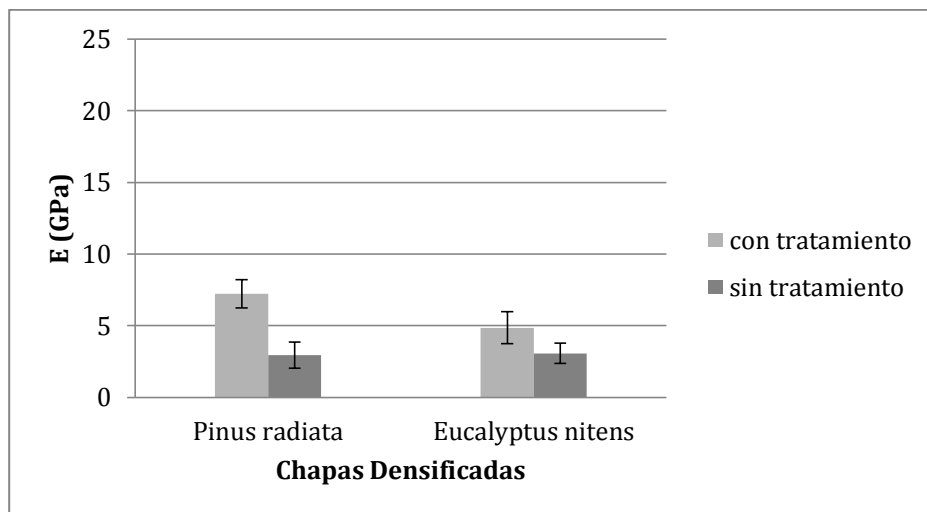
Los valores de E en tracción sin tratamiento de densificación tanto en *Pinus radiata* como *Eucalyptus nitens*, alcanzaron valores entre 6,5 y 6,9 GPa. En consecuencia, hubo un aumento de E de 220% en *Pinus radiata* luego del tratamiento de densificación y de un 170% en el *Eucalyptus nitens* con tratamiento de densificación. Este comportamiento ya había sido observado por Fang *et al.* (2011) en un estudio realizado con madera densificada, donde también el aumento del E fue superior al 100%. El valor del E en las especies densificadas con THM, favorece el aumento de rigidez en el material, debido a la degradación de la hemicelulosa, produciendo una alteración en la matriz de lignina-hemicelulosa, y un aumento en la cantidad relativa de celulosa cristalina. Boonstra *et al.* (2007).

2.2 Tracción perpendicular en sustratos, en chapas de madera densificada y chapas sin densificar.

Los resultados de tracción perpendicular en sustratos y chapas de madera con y sin tratamiento de densificación se muestran en la figura 8a y 8b.



(a)



(b)

Figura 7: Tracción perpendicular E (GPa): (a) Sustratos; (b) Chapas densificadas y chapas sin densificar. Las barras de error representan la desviación estándar con respecto a la media.

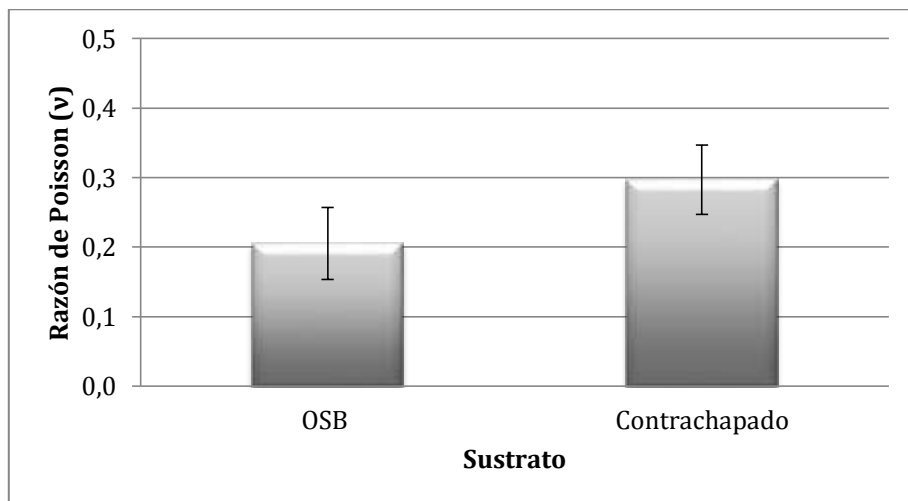
Los resultados de tracción perpendicular en sustratos y en chapas densificadas y sin densificar, fueron en general menores a los resultados obtenidos en tracción paralela. En el caso de tracción en sustratos, este valor fue aproximadamente un 40% menor que el medido en la dirección paralela. Esto se podría explicar por la orientación de la fibra que tiene la madera que la hace ser más resistente en la dirección paralela. Diaz -Vaz (2003).

El comportamiento de tracción perpendicular de los sustratos (**figura 7.a**), sigue la misma tendencia que en el caso de tracción paralela. En el OSB, el valor E fue de 2,6 GPa, y en el contrachapado de 4,3 GPa. Según el ANOVA, existe una diferencia significativa entre las medias de las dos variables con un nivel del 95% de confianza.

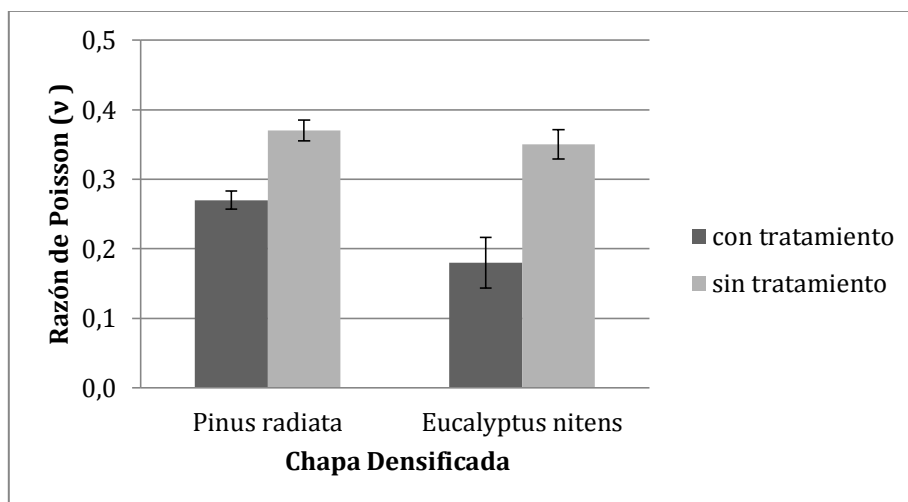
Para las especies densificadas, el E perpendicular (**figura 7.b**) según el ANOVA, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las dos especies con un nivel del 95% de confianza, siendo mayor en la madera de *Pinus radiata*.

2.3 Razón de Poisson (ν) paralela en sustratos, en chapas de madera densificada y chapas sin densificar.

Los resultados de la razón de Poisson paralela en sustratos y chapas de madera con y sin tratamiento de densificación se muestran en la **figura 8a y 8b**.



(a)



(b)

Figura 8: Razón de Poisson paralela (ν): (a) Sustratos ; (b) Chapas densificadas y Chapas sin densificar. Las barras de error representan la desviación estándar con respecto la media.

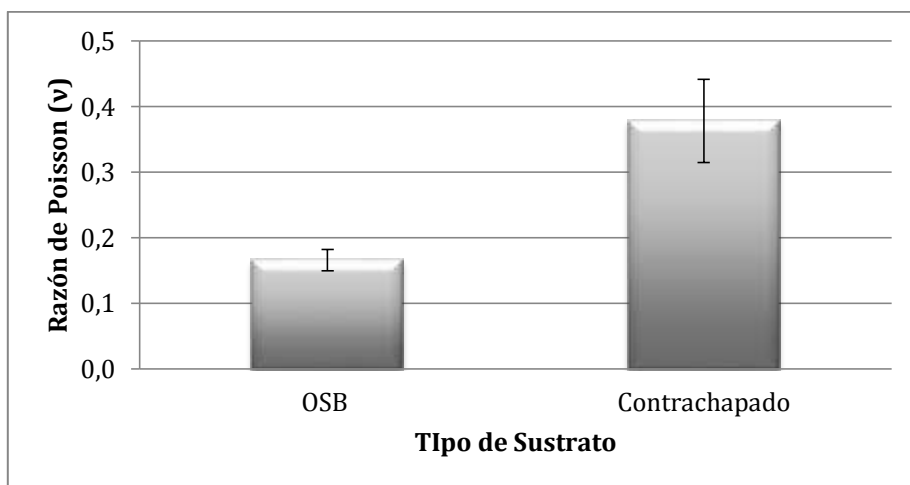
De acuerdo a la (figura 8.a), se observa que la razón de Poisson fue mayor en promedio para contrachapado 0.3 que para el OSB 0.21. Estadísticamente existe una diferencia significativa entre ambos sustratos y se puede explicar de la misma forma que en el comportamiento del valor E ; la composición de los tableros contrachapados, lo hacen ser un material de propiedades mecánicas más elevadas. Según Thomas (2003), la razón de Poisson de OSB varía entre 0.16 a 0.26, por lo que los valores aquí obtenidos están dentro de ese rango.

Los resultados de la razón de Poisson de madera densificada muestran diferencias significativas con un nivel de 95% de confianza, entre las medias de las dos variables; con y sin tratamiento de densificación. En la (figura 8.b) se aprecia diferencia que existe entre el *Pinus radiata* 0.27 y el *Eucalyptus nitens* 0.18. Esto se podría explicar debido a la diferencia de densidades y rigidez axial que existe en estos materiales.

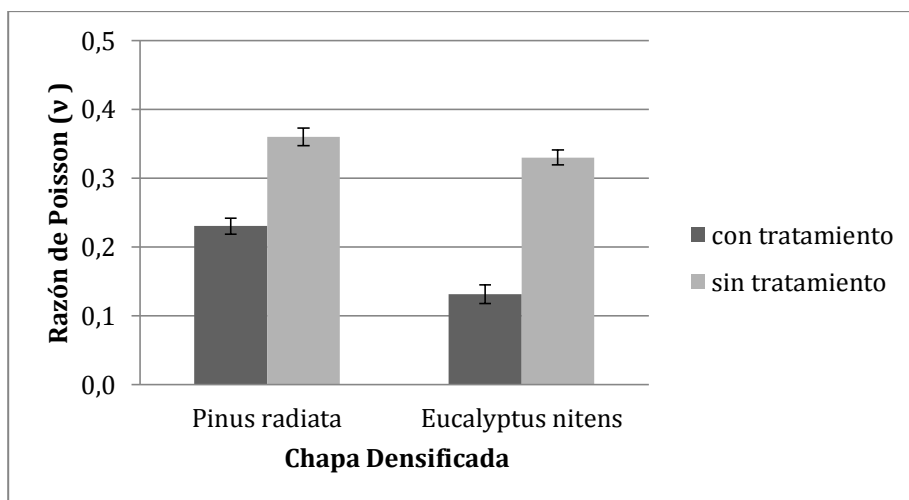
Fuentealba (2001), a través de su estudio determinó un coeficiente de Poisson para *Pinus radiata* sin densificar de 0.37; por otra parte Gibson y Ashby (1997) determinaron un coeficiente de Poisson para *Eucalyptus nitens* sin densificar de 0.35; sin embargo con el tratamiento de densificación los valores de Poisson de *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens* disminuyen; Li *et al.* (2013) determinó el coeficiente de Poisson para una especie densificada con THM, los cuales fueron hasta 75% inferior al valor de Poisson de la misma especie sin densificar. La mayor compresión en la madera, durante la densificación, fue relacionada con una menor expansión transversal.

2.4 Razón de Poisson perpendicular en sustratos, en chapas de madera densificada y chapas de madera sin densificar

Los resultados de la razón de Poisson perpendicular en sustratos y chapas de madera con y sin tratamiento de densificación se muestran en la **figura 9a y 9b**.



(a)



(b)

Figura 9: Razón de Poisson perpendicular: (a) Sustratos ; (b) Chapas densificadas y Chapas sin densificar. Las barras de error representan la desviación estándar con respecto la media.

La razón de Poisson medida perpendicularmente en los sustratos fue de 0.17 para el OSB y 0.38 para el contrachapado. El ANOVA indica que existe una diferencia significativa con un nivel del 95% de confianza entre las medias de los sustratos. En las especies de madera densificada, también existe una diferencia significativa con un 95% de confianza, el valor del *Pinus radiata* fue de 0.23 y del *Eucalyptus nitens* 0.13. Luego de los resultados se logra apreciar que la razón Poisson perpendicular para ambos sustratos, fue de forma general, menores a los resultados de la razón de Poisson paralela. Esto se puede deber a la disminución que existe de las propiedades mecánicas en sentido perpendicular a la fibra (menor rigidez).

3. Viscosidad y pH de adhesivo

Los resultados de viscosidad y pH medidos en el adhesivo urea formaldehído, se muestran en la tabla 2.

Tabla 2: Resultados de Viscosidad y pH de adhesivo urea formaldehído.

Parámetros estadísticos	Viscosidad (cP)	pH
Media	7,281	8.1
SD	301	0.01
CV	0.04	0.002

SD: Desviación estándar; CV: Coeficiente de Variación

En la **tabla 2** se observa la viscosidad que presentó el adhesivo en el momento de la unión de las piezas. Según Gupta y Sehgal (1979), viscosidades muy altas harán difícil esparcir el adhesivo y viscosidades bajas harán que éste escurra fuera del plano o línea de cola. Pizzi (1983), menciona que la viscosidad de la mezcla adhesiva es un factor que se debe controlar cuidadosamente dentro del proceso de encolado para mantenerla dentro de un rango satisfactorio.

El adhesivo utilizado tuvo un pH básico (8,1), según la escala de pH. Akpabio (2012), a través de un estudio del comportamiento del pH en el adhesivo, demostró que la urea formaldehído se puede usar con un pH entre 5 y 8. Los resultados experimentales muestran que tales preparaciones tienen una alta resistencia adhesiva y moderada viscosidad, lo

suficiente para que se extienda sobre la superficie de los adherentes y en un corto período de tiempo para unir el adhesivo fuertemente.

CONCLUSIONES

La densidad de referencia en madera de *Pinus radiata* densificada aumenta un 90% en relación a la misma madera sin tratamiento de densificación.

El contenido de humedad de la materia prima para la fabricación de pisos, se encuentra dentro de los parámetros establecidos por la norma de parquet.

Los resultados de tracción en general, alcanzan mayores propiedades en el sentido paralelo a la fibra que en el sentido perpendicular, con valores de tracción paralela en especies de madera densificada de 21,2 GPa para *Pinus radiata* y 18,7 GPa para *Eucalyptus nitens*. En sustratos se obtuvo 5,0 GPa para el OSB y 8,5 GPa para el contrachapado.

Se observa además que la rigidez de las chapas densificadas superan en hasta 220 % a las mismas chapas sin tratamiento de densificación. Sin embargo, lo contrario ocurre con la razón de Poisson donde existe una disminución de hasta un 75% luego del tratamiento de densificación.

El adhesivo urea formaldehído presento condiciones favorables de pH y de viscosidad para su uso como un adhesivo de calidad en un proceso de laminación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este documento agradecen al Proyecto Fondef IDEA CA 13i10310 por proveer el equipamiento y material prima para desarrollar la investigación, a la empresa Oxiquim S.A. por suministrar el adhesivo, al Centro de Biomateriales y Nanotecnología, Laboratorio de Adhesivos y Materiales Compuestos, y al Pabellón de Tecnología de la Madera de la Universidad del Bío-Bío por proveer equipamiento e instalaciones para desarrollar la investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- AKPABIO. 2012.** Effect of pH on the Properties of Urea Formaldehyde Adhesives Article history. International Journal of Modern Chemistry, 2012, 2(1): 15-19.
- BLANCHET, P. 2004.** Caractérisation du comportement des lames de plancher d'ingénierie, thèse de Doctorat, Département de Foresterie et de Géomatique, Université Laval, Québec, Canada, 129 p
- BLANCHET, P.; M. LEFEBVRE. 2003.** Comparative study of four adhesives used as binder in engineered wood parquet flooring. Forest Prod. J. 53(1):89-93.
- BOONSTRA, M.; VAN ACKER, J.; TJEERDSMA,B.; KEGEL, E. 2007.** Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural Wood constituents, Ann. For. Sci. 64(7), 679-690.
- CHÁVEZ, R. 2015.** Caracterización de maderas de rápido crecimiento: *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens* densificadas con un proceso termo-higro-mecánico. Tesis Magister, Universidad del Bío-Bío, Chile,
- EN 13986 : 2004.** Wood-based panels for use in construction – Characteristics, evaluation of conformity and marking. European Standard. CEN 2004.
- FANG C.; CLOUTIER A.; BLANCHET P.; KOUBAA A.; MARIOTTI N. 2011.** Densification of wood veneers combined with oil-heat treatment. Part1: Dimensional stability. *Bioresources* 6(1), 373-385.

FANG, C.-H.; CLOUTIER, A.; BLANCHET, P. 2012. Engineered wood flooring with a densified surface layer for heavy-duty use. *BioResources*, vol. 7, No. 4, pp 5843 a 5854.

FUENTEALBA, V. 2001. Determinación de las constantes elásticas en *Pinus radiata* d. don por ultrasonido: módulos de elasticidad, módulos de rigidez y razón de Poisson, scientific electronic library online - chile. Recuperada en noviembre 20, 2012 tesis doctoral.

GIBSON, L.; ASHBY, M. 1997. Cellular solids, structure and properties. In Cambridge University Press 2nd edn. Cambridge, UK:Cambridge University Press.

GUPTA, R. C.; V. SEHGAL. 1979. Effect of viscosity and molecular weigth of ligninphenol-formaldehyde resin on the glue adhesion of plywood. *Holzforshung und Holzverwertung* 31 (1): 7 – 9.

INFOR 2016. Disponible en < http://wef.infor.cl/sector_forestal/sectorforestal.php> [consultado el marzo del 2017]

KAMKE, F. A. 2006. "Densificación de *Pinus radiata* para compuestos estructurales" *Maderas Ciencia y tecnología* 8(2), 83-92.

LI, L., GONG, M., YUAN, N., & LI, D. (2013). An optimal thermo-hydro-mechanical densification (THM) process for densifying balsam fir wood. *BioResources*, 8(3), 3967-3981.

MALONEY, T. M. 1996. The family of wood composite materials. *Forest Products Journal*. 10(2):19-26.

NAVI, P.; Y HEGER, F. 2005. Comportement thermo-hygromécanique du bois. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Suisse-Lausanne., ISBN 2-88074-620-5.

NCH176/1.2003. Maderas. Determinación de la humedad. Instituto de Normalización Nacional, Santiago

NCH176/2.2003. Maderas. Determinación de la densidad. Instituto de Normalización Nacional, Santiago.

NCH 356 OF.62. Maderas. Parquet. Instituto de Normalización Nacional, Santiago.

PIZZI, A. 1983. Wood Adhesives and technology. New York, Marcel Dekker Inc. 364 p.

THOMAS, W. H. (2003). Poisson's ratios of an oriented strand board. *Wood science and technology*, 37(3-4), 259-268.

- **CAPITULO 2: FABRICACIÓN Y DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS, MECÁNICAS Y NANOMECAÑICAS DE LOS PISOS DE INGENIERÍA.**

Débora Pino, Mg.¹, Cecilia Bustos, Ph.D.¹, William Gacitúa, Ph.D.¹

¹ Departamento de Ingeniería en Maderas, Facultad de Ingeniería, Universidad del Bío-Bío.
E-mail: depino@alumnos.ubiobio.cl, cbustos@ubiobio.cl, wgacitua@ubiobio.cl

RESUMEN

El proceso de fabricación de un piso de madera, junto con sus propiedades, son de suma importancia para obtener un piso de calidad. El objetivo de este estudio consistió en la fabricación y determinación de las propiedades físicas, mecánicas y nanomecánicas de los pisos de ingeniería con y sin aplicación de barniz, realizados con una superficie de la madera densificada de *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens*, con sustratos de hojuelas orientadas (OSB) y contrachapado. En este capítulo se definió el proceso de fabricación de los pisos de ingeniería y se realizaron ensayos de: nanoindentaciones, microscopía electrónica de barrido (SEM) en las interfaces, tracción de un compuesto, dureza Brinell, estabilidad dimensional, envejecimiento acelerado y color. En general los resultados mostraron que las propiedades aumentaron en los pisos con madera densificada con respecto a muestras control, sin densificar. Como es el caso del módulo de elasticidad E paralelo medido a través de tracción que presentó un aumento de hasta 122% en pisos de *Pinus radiata* densificado con sustrato contrachapado. La dureza Brinell también tuvo un importante aumento de un 208% en pisos de *Pinus radiata* densificados con aplicación de barniz y un 175%, en *Eucalyptus nitens* densificada con aplicación de barniz. De igual forma en el ensayo de envejecimiento acelerado el presentó mejor comportamiento en probetas de *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens* con tratamiento de densificación y con aplicación de barniz. Finalmente, la estabilidad dimensional evidenció una disminución de la adsorción de humedad en pisos de madera densificada, sin embargo esta diferencia no fue significativa.

Palabras claves: Densificación, Adsorción de humedad, envejecimiento acelerado.

• **CHAPTER 2: MANUFACTURE AND DETERMINATION OF THE PHYSICAL, MECHANICAL AND NANOMECHANICAL PROPERTIES OF LAMINATED FLOORS.**

Débora Pino, Mg.¹, Cecilia Bustos, Ph.D.¹, William Gacitúa, Ph.D.¹

¹ Department of Engineering in Maderas, Faculty of Engineering, Universidad del Bío-Bío.
E-mail: depino@alumnos.ubiobio.cl, cbustos@ubiobio.cl, wgacitua@ubiobio.cl

ABSTRACT

The process of manufacturing a wooden floor along with its properties are of paramount importance to obtain a quality floor. The objective of this study was the manufacture and determination of physical, mechanical and nanomechanical properties of engineering floors with and without varnish applied to a densified wood surface of *Pinus radiata* and *Eucalyptus nitens*, with oriented strand board substrates (OSB) and plywood. In this chapter the manufacturing process of the engineering floors was defined and tests were performed: nanoindentation, scanning electron microscopy (SEM) in the interfaces, traction of a compound, Brinell hardness, dimensional stability, accelerated aging and color. In general the results showed that the properties increased in the densified wood floors with respect to control samples, without densifying. As is the case of the parallel E modulus of elasticity measured through traction which showed an increase of up to 122% in floors of densified *Pinus radiata* with plywood substrate. The Brinell hardness also had a significant increase of 208% in densified *Pinus radiata* floors with application of varnish and 175% in *Eucalyptus nitens* densified with application of varnish. Likewise, in the accelerated aging test, it showed better performance in specimens of *Pinus radiata* and *Eucalyptus nitens* with densification treatment and with application of varnish. Finally, the dimensional stability evidenced a decrease in moisture adsorption on densified wood floors. However, this difference was not significant.

Keywords: Densification, Adsorption of moisture, accelerated aging.

INTRODUCCIÓN

Los pisos de ingeniería con madera densificada corresponde a un producto compuesto por laminas de madera encoladas entre sí, donde la capa superficial corresponde a una madera densificada. La densificación consiste en la compresión de la madera y se lleva a cabo a través de diversos métodos tales como; Compresión Térmica Viscoelástico (VTC), Tratamiento de aceite térmico (OHT), Tratamiento de densificación con productos químicos, Proceso de Termo- Higromecánico (THM). Sin embargo el método (THM) ha logrado mejores propiedades (Navi y Heger, 2000). Algunos investigadores han llevado a cabo estudios en pisos de ingeniería con madera densificada a través de un proceso de tipo Termo-higromecánico, Fang et al. (2012).

Considerando la importancia que tienen especies como *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens* en nuestro país, y gracias a la utilización de técnicas para el desarrollo de nuevos productos con características superiores, los pisos de madera con una superficie densificada se convierten en una oportunidad de desarrollo. Entre las propiedades de mayor importancia para la fabricación de piso están: la densidad y dureza, sin subestimar otros aspectos como la estética (Norma Chilena NCh 356 Of. 62). Hoy en día, además, y gracias a las tecnologías existentes, es posible evaluar las propiedades a nanoescala de estos nuevos productos de ingeniería con mayor exactitud.

La unión de las laminas que componen los pisos de ingeniería deben tener adhesión perfecta. Algunas investigaciones han mostrado que la distribución en la interfase, cambia con el grado de densificación, Kutnar *et al.* (2007). Estos autores observaron que en la madera control, el adhesivo penetra en los lúmenes de las células, en cambio en la madera densificada, además de penetrar en los lúmenes de las fibras, también lo hace en los radios medulares. La porosidad de la madera cambia producto de la densificación y el flujo del adhesivo sigue la dirección menos resistente (Kutnar et al. 2007).

Para comprender y predecir el comportamiento de la adhesión y la región de la interfase adhesivo – madera, se requiere el conocimiento de las interacciones que ocurren a nivel de nanoescala. La nanoindentación es una herramienta que permite evaluar el comportamiento mecánico de las células de la madera a escala micrométrica (Wang *et al.*, 2013); estos autores definen esta técnica como una técnica de análisis no destructivo que proporciona valores de propiedades mecánicas de la madera con mucha exactitud.

A escala macrométrica, la dureza es una de las propiedades más importantes en la madera destinada a la fabricación de parquet o pisos de madera (Lutz 1977, Niemz y Stübi 2000). La dureza tiene directa relación con la resistencia al rayado, el uso diario y la abrasión. En Europa, el método de determinación de dureza más utilizado para pisos es la prueba Brinell, mientras que, en su mayor parte en el norte y América del Sur el método más utilizado es el prueba de Janka. El método Janka no ha sido aceptada en Europa ya que existe una posibilidad considerable de fracaso debido a la compresión de la pared celular (Niemz y Stübi 2000). Además, la profundidad de indentación que realiza el método Brinell se cree que tiene menos efectos secundarios que el método de Janka (Bektas y Alabama. 2001). Schwab (1990) llegó a la conclusión de que el método Brinell es el método más adecuado para madera sólida.

La densificación de la madera produce un cambio significativo en la propiedad de la dureza, es así como Fang *et al.* (2012) encontraron resultados de dureza dos o tres veces mayor que las muestras control. Un cambio significativo en la dureza debido a la densificación también se ha informado de diferentes procesos de densificación (Inoue *et al.* 1996;. Kamke 2006; Navi y Heger 2005). Este alto aumento de la dureza se debe al cierre de los lúmenes de los vasos y de fibra luego del tratamiento, debido a la compresión.

Otra propiedad de importancia en los pisos de madera es la estabilidad dimensional. Este coeficiente muestra la resistencia de la madera a los cambios ambientales tales como la humedad o la temperatura. En otras palabras, todo cambio en las dimensiones de madera (contracción o hinchamiento), bajo ciertas condiciones, y los cambios mínimos (el número más bajo en la escala) tienen directa relación con una mayor estabilidad dimensional.

Es conocido que el tratamiento térmico de la madera mejora su estabilidad dimensional, su resistencia al deterioro biológico, y contribuye al cambio de color uniforme a tonos de color marrón oscuro (Kollmann et al 1975;. Hill, 2006). Según Živković et al. (2008), el nivel más alto de temperaturas de tratamiento térmico proporciona mayores efectos de estabilización dimensional. En estos casos, la absorción de agua se pueden reducir en hasta un 70%. El tratamiento térmico de la madera se ha conocido por mucho tiempo como un método eficaz para modificar las propiedades de la madera (Kollman y Fengel 1965). A veces se utiliza para cambiar las propiedades estéticas de la madera. Un termo-tratamiento siempre resulta en oscurecimiento de la madera, que a menudo se atribuye a la formación de productos de degradación de color de hemicelulosas y compuestos extractivos (Sundqvist y Morén 2002).

Por otro lado, los materiales compuestos en base a madera tienen un comportamiento muy distinto en propiedades físicas y mecánicas. En este sentido, los sustratos también juegan un rol muy importante en relación al comportamiento de la estabilidad dimensional que tiene el piso de ingeniería como compuesto; según Garay (2007), la adsorción de humedad para OSB fue superior a la del contrachapado con y sin protección superficial.

Los pisos de madera suelen estar protegidos por revestimientos transparentes, que idealmente podrían ayudar en la conservación de la apariencia natural de la madera. Estos recubrimientos son sensibles a la radiación UV; la luz ultravioleta (UV) puede penetrar a través de los pisos para iniciar reacciones fotoquímicas en el sustrato de madera subyacente, dando lugar a la decoloración. Pandey (2005) informó que los cambios en el color de la madera durante la irradiación de luz se correlacionaron con la descomposición de lignina. Entre los recubrimientos ensayados, la más alta resistencia a la luz durante la exposición de envejecimiento acelerado fue registrada para barniz de poliuretano.

Miklečić *et al.* (2011), señalan que para seleccionar una madera para un piso, no solamente se deben considerar estas características y propiedades, para tener un piso de calidad, pues la selección del acabado final juega otro factor importante, al brindar una alta diversidad de productos que realzan su belleza y le aumentan su durabilidad.

MATERIALES Y METODO

Materia Prima

La materia prima utilizada en este capítulo consistió en laminas densificadas para la superficie del piso de ingeniería, OSB y contrachapado que corresponde a los sustratos del piso y adhesivo urea Formaldehído.

Las láminas densificadas fueron fabricadas gracias a un estudio previo de los autores Chávez *et al.* 2015. El proceso de densificación se llevó a cabo en una prensa especialmente acondicionada, ubicada en laboratorios del Centre de recherche sur les matériaux renouvelables (CRMR) de la Université Laval en Canadá.

Las láminas de *Pinus radiata* para la fabricación del piso, fueron densificadas a 180°C de temperatura de prensado, 9000 kPa presión mecánica, 550 kPa presión de vapor y 7 minutos de compresión. En *Eucalyptus nitens*, la densificación fue a 160°C temperatura de prensado, 7000 kPa presión mecánica, 350 kPa de presión de vapor y 31 minutos de compresión.

Como sustratos se utilizaron dos tipos; Contrachapado y OSB comerciales. El Contrachapado es un tablero estructural de 3 chapas y de 9.5 mm de espesor y el OSB es tablero estructural de 9.5 mm de espesor.

El adhesivo utilizado para la fabricación del piso de ingeniería fue Urea Formaldehído, Ademix 2150, con un 1% catalizador E-36, proporcionado por la empresa Oxiquim S.A.

2.- Fabricación de pisos de ingeniería

La fabricación del piso de ingeniería representada en la (figura 1), se realizó en dependencias de la Universidad del Bío-Bío.

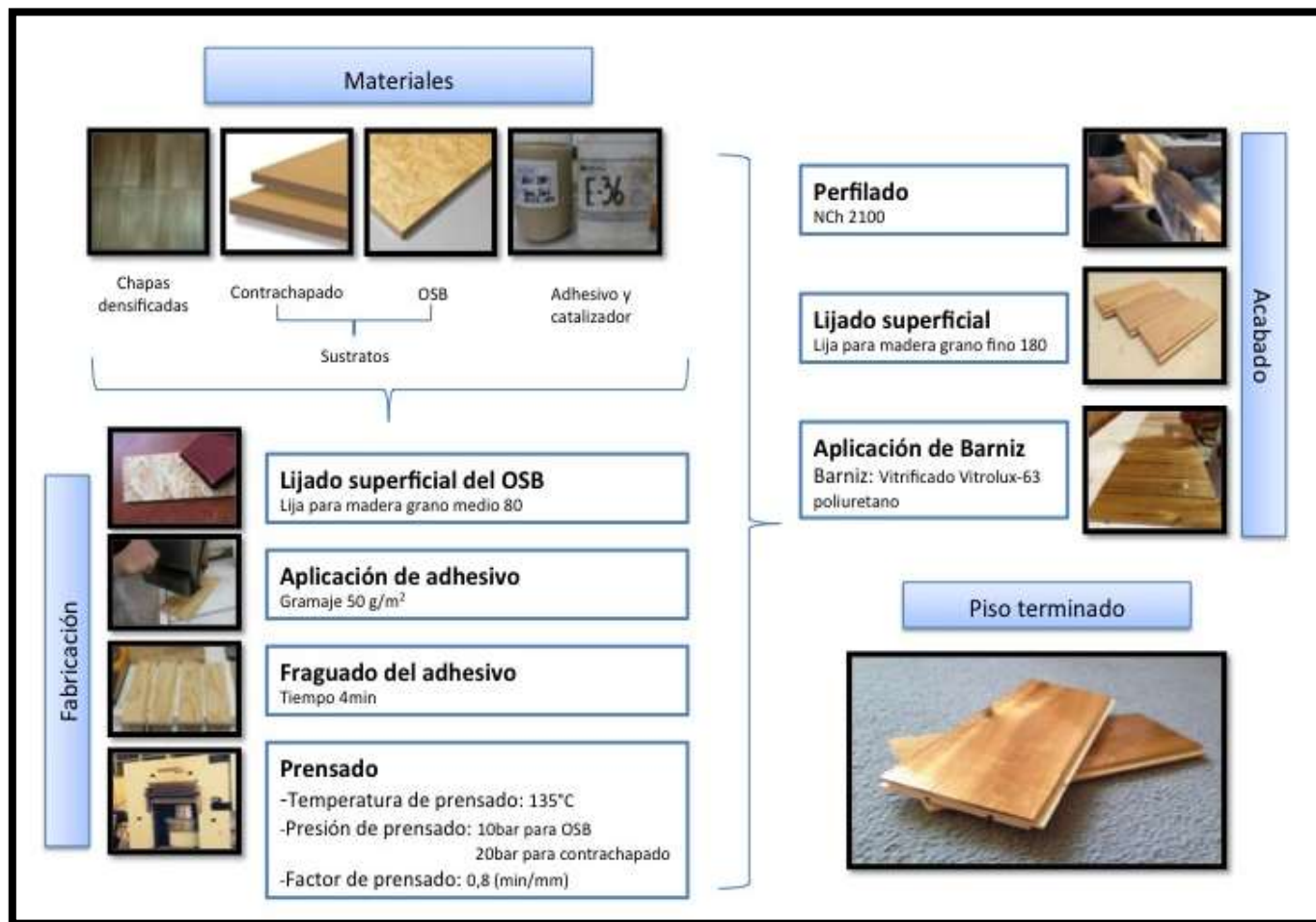


Figura 1: Fabricación de piso laminado.

Para la fabricación de los pisos de ingeniería se consideraron las siguientes variables para la adhesión de la lamina de madera densificada con el sustrato. Estas variables de prensado fueron determinadas mediante estudios preliminares realizados en dependencias de la empresa OXIQUIM S.A, (tabla 1) .

Tabla 1: Variables de prensado para la adhesión de madera densificada en los sustratos de OSB y contrachapado.

Variables de prensado	<i>Pinus radiata</i> densificado con OSB	<i>Pinus radiata</i> densificado con contrachapado	<i>Eucalyptus nitens</i> densificado con OSB	<i>Eucalyptus nitens</i> densificado con contrachapado
Presión de prensado (bar)	10	20	10	20
Factor de Prensado (min/mm)	0,8	0,8	0,8	8,8
Gramaje (g/m ²)	50	50	50	50

Los sustratos de OSB fueron previamente lijados superficialmente con lija para madera grano 80, para generar una mejor penetración del adhesivo. Luego de aplicar el adhesivo con rodillo manual, se esperó 4 min para que el adhesivo desarrollará su máxima pegajosidad antes de prensar. Para prensar se utilizó una prensa marca DUMONT CHILE de 2 platos de 50x50 centímetros, a una temperatura de prensado de 135 °C. Para los pisos con sustrato OSB se utilizó una presión de prensado de 10 bar y para contrachapado 20 bar. La diferencia de presión en los sustratos fue producto de las condiciones observadas luego del ensayo de tracción en cizalle al que fueron sometidos los pisos, con presión de 10 bar, solo los pisos con OSB obtuvieron buena adhesión, a presión de 20 bar los pisos con contrachapado presentaron buenas condiciones de adhesión, sin embargo el OSB sufrió deformación de su espesor debido a la alta presión. El factor de prensado para todos los pisos fue de 0.8 min/mm. Luego de prensar, se realizó el perfilado lateral (machihembriado), **figura 2**, en una Tupí y las ranuras hubicadas en la parte inferior del piso liberadoras de tensiones, se realizaron en una máquina sierra circular, tomado como referencias las dimensiones señaladas en NCh 2100 Madera – Molduras – Designación y dimensiones, además del libro “La construcción de viviendas en Madera” unidad 20 de CORMA.



Figura 2: Perfilado del piso de ingeniería con sustrato contrachapado.

Se aplicaron 3 capas de barniz vitrificado Vitroux-63. En la primera aplicación el barniz se diluyó en aguarrás mineral en proporciones designadas por el fabricante para sellar la madera. Luego de un lijado previo con lija de grado 180°, se aplicó la segunda capa de barniz sin dilución y se esperó 24 horas para el secado. Un total aproximado de 20 pisos de ingeniería por especie (*Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens*), por cada sustrato (OSB y contrachapado) y por tratamiento (Control, densificado, densificado con barniz), fueron fabricados para su posterior caracterización.

2.-Ensayos a pisos de ingeniería.

2.1 Morfología de la interfase en pisos de ingeniería.

La zona interfásial (madera-adhesivo-madera) fue analizada a través de la penetración del adhesivo en los sustratos (OSB y contrachapado); con especies densificadas de *Pinus radiata* y de *Eucalyptus nitens*. Se utilizó un microscopio electrónico de barrido (SEM), marca Jeol, JSM-6610LV y un estereo-microscopio marca LEICA, con el cual se realizaron mediciones del espesor de la zona interfásial. Se obtuvieron 3 probetas por piso de ingeniería por condición de ensayo, de las cuales se obtuvieron 30 datos del espesor de la línea de cola por cada una de las muestras.

2.1.1 Probetas para el análisis del espesor y penetración del adhesivo

Se prepararon 3 muestras por tipo de piso de ingeniería, para ambas especies (*Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens*), ambos sustrato (OSB y contrachapado) y para ambas condiciones (control y densificadas), las muestras fueron obtenidas de la zona interfásial en estado seco. Las probetas fueron cortadas de forma rectangular de dimensiones 5 x 10 mm obtenidas desde la zona interfásial. Luego la superficie transversal de las muestras fueron cortadas con un cuchillo de ultra filo formando una pirámide truncada. Finalmente, para lograr una superficie homogénea en el área de observación, las muestras fueron cortadas con un cuchillo de diamante. Luego de dimensionar las probetas fueron recubiertas con oro utilizando un equipo de impregnación para vacío Denton VACUUM DESK V, durante un tiempo de 30 segundos por un tiempo de 30 segundos para obtener una mayor conducción al material y una mejor resolución en las imágenes SEM.

2.2. Nanoindentación de la interfase

Para estimar las propiedades mecánicas de la región interfásial **figura 3**, mediante la ecuación de la regla de mezclas, se evaluaron las propiedades nanomecánicas en las líneas de cola de los pisos de *Pinus radiata* y de *Eucalyptus nitens* con y sin tratamiento de densificación y con ambos sustratos OSB y contrachapado. Se utilizó un nanoindentador Hysitron TI900 equipado con una punta de diamante de tipo pirámide triangular Cube Corner para la determinación de las propiedades nanomecánicas. El ciclo de carga fue un multiciclo de carga creciente máxima de 100 μN , en un tiempo de 104 s. En cada una de las probetas, en la zona interfásial (fibra madera densificada, línea de cola, fibra sustrato), se determinaron los módulos de elasticidad reducido de cada uno de los materiales que componen los pisos de ingeniería que en esta zona interactúan (E_r). Se utilizaron 3 probetas por cada línea de cola para la caracterización.

El módulo reducido fue determinado por la siguiente expresión:

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{S}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

E_r : módulo de elasticidad reducido Gpa.

S: pendiente de la curva de descarga.

A: área de indentación.

2.2.1 Probetas para el análisis de las propiedades nanomecánicas.

Se prepararon 3 probetas por tipo de piso para obtener aproximadamente 30 datos por condición. La metodología de preparación de las probetas fue la misma que la utilizada en la morfología de la interfase, exceptuando el recubrimiento con oro.

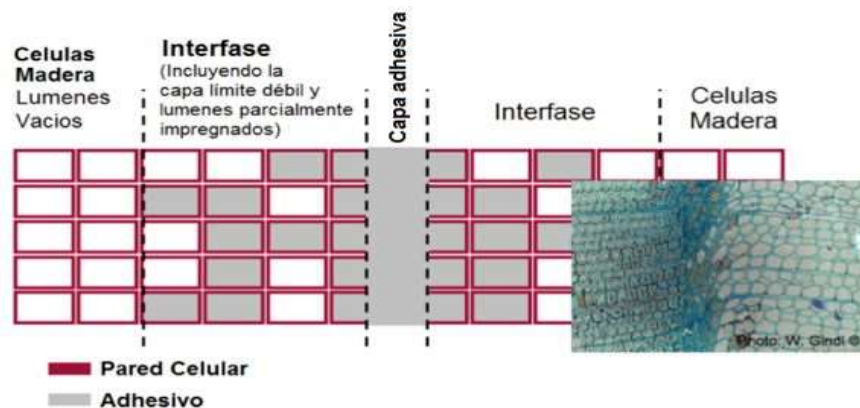


Figura 3: Esquema interfase adhesivo-madera (Muller *et al.* 2009).

Luego de la indentación y mediante la ecuación de la regla de las mezclas, se puede estimar las propiedades mecánicas de la interfase. La predicción usa como información las propiedades nanomecánicas (Módulo de elasticidad axial) medidas mediante nanoindentaciones en la pared celular y adhesivo, además de la fracción de volumen en la región de interfase las cuales se pueden asumir por estudios realizados anteriormente

(Acevedo, 2012); 30% de fracción de volumen adhesivo y 70% fracción de volumen de la pared celular fueron usadas. La ecuación “regla de las mezclas” (Ec. 2) permite predecir el módulo elástico de un compuesto (formado por una fibras y una matriz adhesiva) cuyas fases contribuyen en forma independiente y en función de la fracción de volumen de cada una de ella (V). La regla de las mezclas establece que (Paris *et al.* 2006):

$$E_c = V_f * E_f + V_m * E_m \quad (2)$$

Dónde:

E_c : módulo de elasticidad de la interfase (GPa)

V_f : fracción de volumen de la pared celular (%)

E_f : módulo de elasticidad de la pared celular (GPa)

V_m : fracción de volumen del adhesivo (%)

E_m : módulo de elasticidad del adhesivo (GPa)

2.3 Tracción a los pisos de ingeniería.

Los ensayos mecánicos de tracción en el piso de ingeniería, se realizaron en una máquina de ensayo universal marca ZwickRoell de 20 kN ubicada en dependencias del Centro de Biomateriales y nanotecnología de la Universidad del Bío-Bío. Un total de 15 probetas fueron preparadas para los pisos con y sin tratamiento de densificación de las especies de *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens* con sustratos OSB y contrachapado. Se utilizó una velocidad de ensayo de 5 mm/min; se usó la probeta tipo I según la norma ASTM 638. Se obtuvo el módulo de elasticidad (E) para las curvas de fuerza (N) vs. desplazamiento (mm), mediante la pendiente de la curva en la zona elástica.

Ecuación módulo de elasticidad:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{P}{d} * \frac{L}{A} \quad (3)$$

Donde:

E = módulo de elasticidad (GPa)

σ = carga (N/mm²)

ε = deformación unitaria

P = fuerza (N)

d = desplazamiento (mm)

L = largo (mm)

A = área de Falla (mm²)

2.4 Dureza Brinell

La dureza Brinell se determinó de acuerdo a la norma Europea EN 1534 en una máquina de ensayo universal marca ZwickRoell ubicada en el CBN (Centro de Biomateriales y Nanotecnología) de la Universidad del Bío-Bío, con una capacidad máxima 2.0 ton. El ensayo consistió en la indentación de una bola de acero de 10 mm de diámetro en las superficies de las muestras, las muestras ensayadas corresponden a los pisos de ingeniería (Control, superficie densificada, superficie densificada con barniz). Se aplicó una fuerza creciente hasta alcanzar los 1000 N durante 15 s, se mantuvo esta carga por 25 s y luego se retiró el indentador desde la muestra. El diámetro que dejó la indentación en la cara superficial del material fue medido con un pie de metro, en cada una de las indentaciones de la muestra. Dos mediciones fueron realizadas por cada indentación, una paralelo a la dirección de la fibra, y la otra perpendicular a ésta. Luego de acuerdo a la expresión (4) se determina el valor de dureza Brinell (HB).

$$HB = \frac{P}{\frac{\pi D}{2}(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (\text{Mpa}) \quad (4)$$

Dónde:

p : es la fuerza aplicada (N); D : diámetro de la bola (mm); d : promedio del diámetro de la circunferencia marcada por la bola en el material (mm).

2.4.1 Probetas de dureza Brinell

Se realizaron un total 50 indentaciones por condición (control, superficie densificada, superficie densificada con barniz) para ambas especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens*, las probetas fueron de dimensiones 3.5 mm x 50 mm x 50 mm y en cada una de las probetas se realizaron 4 indentaciones.

2.5 Estabilidad dimensional

La estabilidad dimensional en los pisos de ingeniería para ambas especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens* con y sin aplicación de barniz, además de piso control (sin tratamiento de densificación), fue determinada a través de una cámara de clima marca Binder, esta cámara está ubicada en el laboratorio de tecnología del secado de la madera de la universidad del Bío-Bío, las condiciones fueron del ensayo fueron de 25°C y 90% de humedad relativa (HR) por un período de 7 días. La masa de cada probeta fue periódicamente controlada de manera de determinar la absorción de humedad en las muestras. La absorción de humedad se calculó diariamente durante los 7 días de acondicionamiento en la cámara, de acuerdo a la expresión 5. Para la obtención de la masa seca, las muestras, después de aclimatadas por 7 días, fueron dejadas en estufa a 103°C por un período de 24 horas.

$$\text{Absorcion de Humedad} = \frac{m_f - m_0}{m_0} \times 100(\%) \quad (5)$$

Dónde:

m_f = masa final (kg), después del acondicionamiento en cámara a las 24 horas o 7 días, según corresponda.

m_0 = masa anhidra (kg).

2.5.1 Probetas de estabilidad dimensional

para la estabilidad dimensional, 15 probetas por cada condición de los pisos de ingeniería fueron analizados. Las dimensiones de las probetas fueron de 3.5mm x 5mm x 5mm.

2.6 Envejecimiento Acelerado

El ensayo de envejecimiento acelerado se realizó con una cámara de envejecimiento acelerado marca QUV LU-0819.2 modelo QUV/spray con Solar Eye (control de radiación) y lámparas UVA-340, ubicada en dependencias del laboratorio de adhesivo y materiales compuestos de la universidad del Bío-Bío.

El proceso de envejecimiento acelerado mediante rayos UV, fue realizado usando como pauta la norma ASTM G154: Standard practice for Operating fluorescent light Apparatus for UV exposure of nonmetallic materials. La luz del equipo a $0.95 \text{ W/m}^2/\text{nm}$ durante el ciclo de envejecimiento siendo un 40% mayor al espectro natural según la norma ASTM G154-06. Las probetas fueron envejecidas en conformidad con las normas durante 96 horas con ciclos de 12 horas, cada ciclo fue repetido 8 veces (**tabla 2**).

Tabla 2: Etapas del ciclo (12 horas) de envejecimiento UV.

Etapas	Temperatura	Tiempo
1.) Luz	60 (+3) °C	8 horas
2.) Condensación	50 (+3) °C	4 horas

2.6.1 Probetas de envejecimiento acelerado.

Probetas de *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens* en condiciones de control (sin tratamiento de densificación), densificado y densificado con barniz para ambos sustratos, de dimensiones 7.2 x 15 cm, se cortaron desde los pisos fabricados, dejando un área expuesta de 6.5 x 10 cm en el porta muestra (**Figura 4**).



Figura 4: Porta muestra con probetas ordenadas respectivamente en condiciones control, densificadas y densificada con barniz: **(a)** Probetas *Pinus radiata*; **(b)** Probetas de *Eucalyptus nitens*.

2.6.2 Test de Color

Para evaluar el efecto que tuvo el envejecimiento acelerado en la calidad de la superficie, se analizó los cambios de tonalidades resultantes para cada uno de los pisos fabricados (control, densificado, densificado con barniz) en ambas especies (*Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens*), con y sin envejecimiento acelerado usando radiación UV y condensación. Estas mediciones fueron realizadas con un Espectrómetro portátil BYK Gardner.

Para la evaluación de color, se utilizaron los valores de L^* , a^* y b^* (coordenadas cromáticas numéricas), que representan una gama en la escala de color **Figura 5** para calcular el ΔE , este valor se calcula en base de una muestra patrón (punto 0 en el gráfico), esto significa que ΔE representa, la diferencia de color entre alguna de las condiciones (densificada, densificada con barniz y control) en relación a la muestra patrón. Se midieron 4 valores por probeta con 6 repeticiones por cada tratamiento. Los valores L^* , a^* y b^* son utilizados para el cálculo de ΔE , como se muestra en la siguiente expresión:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (6)$$

ΔE = diferencia de color

L = luminosidad y oscuridad

a = cordenadas rojo +/- verde -

b = cordenadas amarillo +/-azul

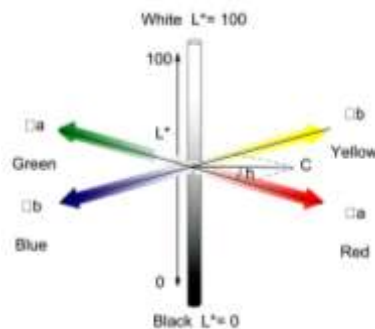


Figura 5: Escala de color, coordenadas cromáticas numéricas.

El análisis estadístico

El análisis estadístico para todos los ensayos fue realizado con ayuda del software Statgraphics Centurion XVI. Se ignoraron puntos atípicos con el grafico caja y bigote y a través de la tabla ANOVA y de la prueba de multiples rangos se determinó si hay diferencias significativas entre las medias

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Morfología de la interfase en pisos de ingeniería

La **tabla 3** muestra los resultados de espesor en micrones (μm), obtenidos mediante la medición de la zona interfásial (madera-adhesivo-madera).

Tabla 3: Espesor promedio (μm) de la interfase de pisos de ingeniería.

Pisos de ingeniería	Control (μm)	Densificado (μm)
<i>Pinus radiata</i> -OSB	43.0	34.6
<i>Pinus radiata</i> -Contrachapado	41.7	35.5
<i>Eucalyptus nitens</i> -OSB	47.9	36.3
<i>Eucalyptus nitens</i> -Contrachapado	36.3	32.3

Diferencias significativas fueron encontradas entre los promedios del espesor de la interfase de los pisos control y los pisos de ingeniería de madera con una superficie densificada, en general, los pisos con madera densificada mostraron una disminución del espesor de la interfase. A 95% de nivel de confianza. Este efecto podría explicarse debido a la dificultad que existe en las células de la madera densificada para la penetración de adhesivo, por el aplastamiento que estas presentan luego del tratamiento de densificación.

En investigaciones anteriores, Kutnar *et al.* (2007) demostraron que la ubicación del adhesivo en la interfase cambia con el grado de densificación; entre mayor grado de densificación, mayor es la dificultad para el ingreso del adhesivo. Además, estos autores señalan que la disminución de la penetración del adhesivo en la madera densificada es menor debido a que la porosidad de la madera disminuye producto de la densificación y el flujo del adhesivo sigue la dirección menos resistente.

2. Nanoindentación de la interfase.

La **tabla 4**, muestra los resultados del módulo de elasticidad reducido (E_r) para la pared celular y para el adhesivo de los pisos de ingeniería. Para la estimación del módulo de la interfase (E_i).

Tabla 4: Modulo de Elasticidad (E_r) en pared celular y en adhesivo de pisos de *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens*.

Tipo de Piso	<i>Pinus radiata</i>		<i>Eucalyptus nitens</i>	
	Pared Celular (GPa)	Adhesivo (GPa)	Pared Celular (GPa)	Adhesivo (GPa)
Control -OSB	9.75	6.72	9.77	6.81
Densificado -OSB	11.79	6.49	11.53	7.41
Control- Contrachapado	10.92	6.71	10.25	7.02
Densificado- Contrachapado	11.76	6.85	10.64	6.95

Se observa que el valor E_r de la pared celular es muy superior al del adhesivo en ambas especies. Dichos resultados son similares a los encontrados por otros autores (Konnerth *et al.* 2006. y Acevedo *et al* 2012).

En la pared celular, los pisos de madera con tratamiento de densificación en ambas especies aumentaron su rigidez, observándose diferencias significativa con 95% de confianza, en comparación a los pisos sin tratamiento de densificación. exceptuando al *Eucalyptus nitens* con sustrato contrachapado, el cual no presenta diferencias significativas en relación a los pisos control.

Los sustratos OSB y contrachapado se presentan diferencias significativas en los pisos sin tratamiento de densificación siendo mayor E_r de los pisos con OSB, Sin embargo en pisos con madera densificada esta diferencia no existe.

Mediante la ecuación de la regla de las mezclas se calculó el módulo de elasticidad de la interface promedio (tabla 5), utilizando como fuente de información el módulo de elasticidad reducido (E_r) y la fracción de volumen de cada una de las fases (V).

Tabla 5: Módulo de elasticidad promedio de la interfase (E_i) para pisos de *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens* con distintas condiciones.

Tipo de Piso	<i>Pinus radiata</i>	<i>Eucalyptus nitens</i>
	Pared Celular (GPa)	Pared Celular (GPa)
Control -OSB	7.62	7.69
Densificado -OSB	8.08	8.64
Control- Contrachapado	7.97	7.98
Densificado- Contrachapado	8.32	8.37

Se logra observar los resultados del módulo de elasticidad estimado de la interfase, que hubo en la especie *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens* con sustrato contrachapado y OSB. Sin embargo según el análisis estadístico se observa que no existe una diferencia significativa entre ambas especies como tampoco en los sustratos OSB y contrachapado, presentando un comportamiento homogéneo en el módulo de elasticidad de la interfase estimado (E_i) para los distintos tipos de pisos.

Lo contrario ocurre al comparar los pisos control con los pisos con tratamiento de densificación donde si existe una diferencia significativa con un 95% de confianza, evidenciando un aumento del módulo E_i luego del tratamiento de densificación. Según (Buckley *et al.* 2002) una buena interfase es capaz de transmitir esfuerzos entre chapas mejorando así las propiedades mecánicas del producto final. Acevedo (2012) relaciona directamente el aumento del E_i con las propiedades mecánicas del laminado.

3. Tracción paralela en pisos de ingeniería

La **tabla 6** muestra los resultados obtenidos para el módulo de elasticidad en tracción paralela E , del compuesto piso de ingeniería de ambas especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens* y ambos sustratos OSB y contrachapado en condiciones de control y con tratamiento de densificación.

Tabla 6: Módulo de elasticidad E promedio del piso de ingeniería en ensayo de tracción paralela.

Piso de ingeniería	Tracción Paralela E	
	Control (GPa)	Densificado (GPa)
<i>Pinus radiata</i> -OSB	10,3	21,3
<i>Pinus radiata</i> -Contrachapado	11,6	25,8
<i>Eucalyptus nitens</i> -OSB	11,9	20,8
<i>Eucalyptus nitens</i> -Contrachapado	16,1	25,1

En general, se observa que hubo un aumento significativo del E paralelo de los pisos de madera densificada, al 95% de confianza en relación al valor E de los pisos de control. El aumento del módulo de elasticidad en tracción para los pisos densificados de *Pinus radiata* con sustrato contrachapado y OSB fue superior un 122% y 107% respectivamente con respecto a pisos sin madera densificada. Según Fang *et al.* (2012) y Kultikova, E. (1999), al igual que en este estudio, el módulo de tracción de maderas densificadas aumentó considerablemente en relación a las probetas control.

4. Dureza Brinell

La dureza Brinell aumentó significativamente en pisos con la superficie densificada en ambas especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens* (**figuras 6 y 7**). Según Rautkari *et al.* (2009) y Ünsal *et al.* (2011), este aumento se puede relacionar con la densidad de la madera, la cual está estrechamente relacionada con la densificación.

En los pisos de *Eucalyptus nitens* densificado con barniz, el aumento de la dureza fue del orden de 170% en ambos sustratos, al ser comparada con piso sin densificar.

En el *Pinus radiata* densificado con barniz, la tendencia es similar al *Eucalyptus nitens*, la dureza de Brinell aumenta significativamente superando incluso en un 208% a los pisos control. Se observa además que no existe diferencia significativa, con un 95% de confianza, entre el sustrato OSB y contrachapado en ambas especies.

La dureza Brinell en pisos de ingeniería densificado con y sin barniz, no presentan diferencias significativas entre ellos. Sin embargo, existe una tendencia al aumento en los pisos con aplicación de barniz. Según Pelit and Sonmez (2015), después de la aplicación del barniz, la dureza de la superficie de las muestras aumenta, debido a que la dureza de la capa de barniz en la superficie es mayor que la dureza del material madera.

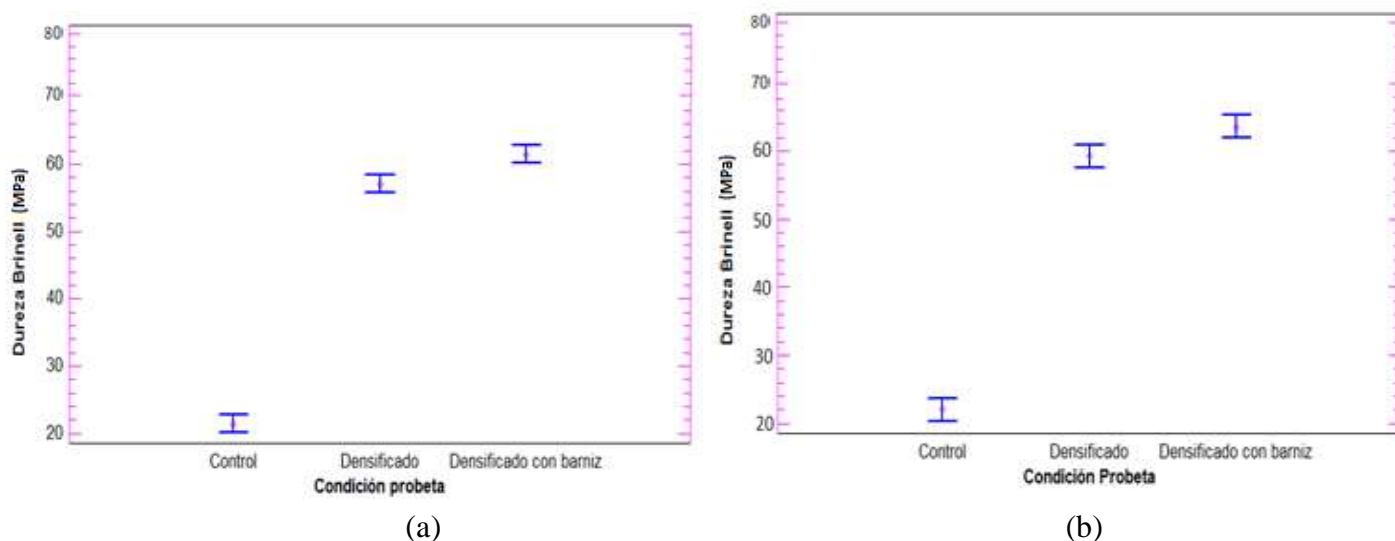


Figura 6: Dureza Brinell para pisos de *Eucalyptus nitens* con condiciones: control, densificado, densificado con barniz (a) Piso con sustrato OSB; (b) Piso Sustrato contrachapado. Gráfico de barras de error representando valores medios.

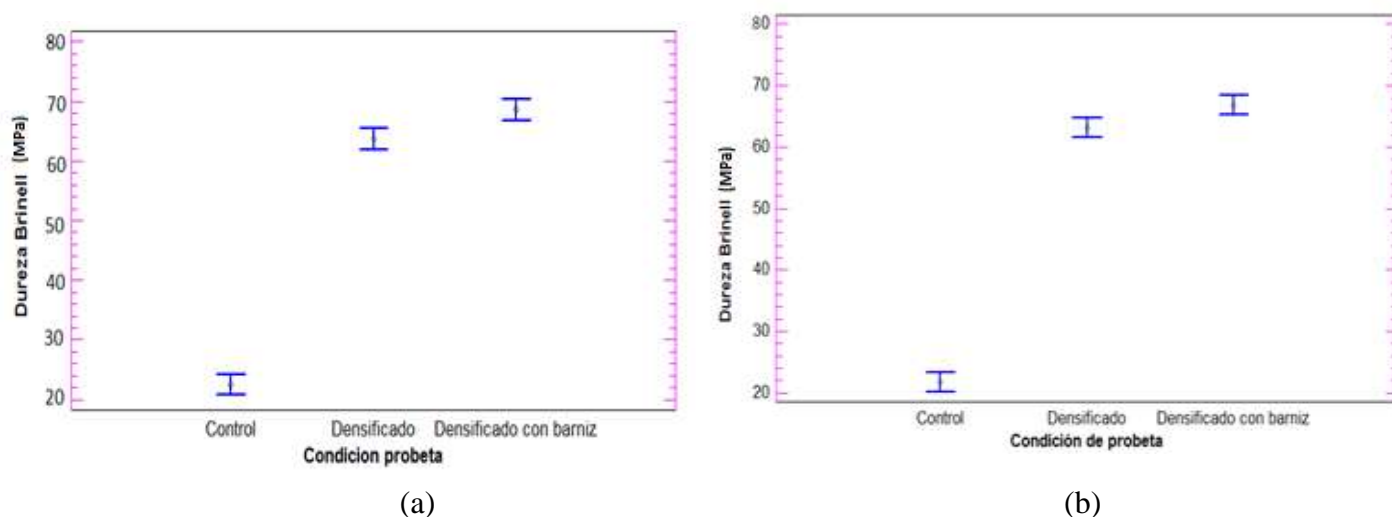


Figura 7: Dureza Brinell HB para pisos de *Pinus radiata* con condiciones: control, densificado, densificado con barniz: (a) Piso con sustrato OSB; (b) piso con sustrato contrachapado. Gráfico de barras de error representando valores medios.

La **figura 8a y 8b** muestra las marcas de indentación dejadas como huellas después del ensayo de dureza Brinell. Se aprecia claramente una disminución de la penetración de la bola de acero de acuerdo a la condición del piso (control, densificado, densificado con barniz) por el aumento de la dureza en estas.



(a)



(b)

Figura 8: Probetas con marcas de indentaciones después del test de dureza Brinell para cada especie y condición del piso **(a)** Probetas de piso *Pinus radiata*; **(b)** Probetas de piso *Eucalyptus nitens*

5. Estabilidad dimensional

Los resultados de adsorción de humedad obtenidos en muestras de pisos de ingeniería con madera densificadas de *Eucalyptus nitens* y *Pinus radiata* con ambos sustratos (contrachapado y OSB) y por cada condición (control, densificado, densificado con barniz) son presentados en la **figura 9 y 10**.

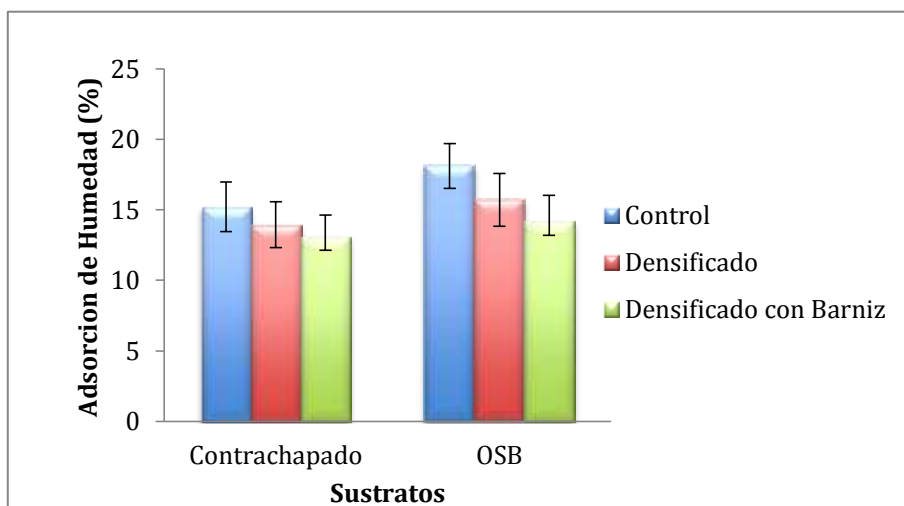


Figura 9: Adsorción de Humedad en pisos de *Eucalyptus nitens*, según su condición y sustrato que lo componen.

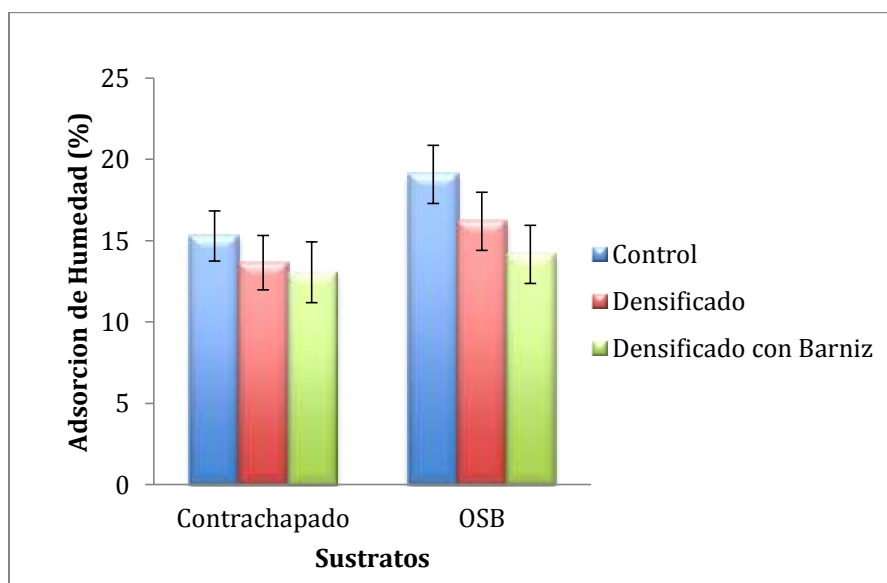


Figura 10: Adsorción de Humedad en pisos de *Pinus radiata*, según su condición y sustrato que lo componen.

La menor adsorción de humedad se produjo en los pisos de ingeniería con barniz, la mayor adsorción en los pisos control, la madera densificada evidenció una disminución de la adsorción de humedad, sin embargo, esta disminución no es significativa con respecto a los pisos control en ambas especies. Este comportamiento fue repetitivo durante los 7 días de condensación y para ambos sustratos OSB y contrachapado. Según Pelit *et al.* (2016) La adsorción de agua disminuye en la madera densificada con un proceso térmico, debido a la disminución de volumen de los poros de las muestras densificadas. Del mismo modo Mariotti (2010) y Chávez (2015) observaron que a través del proceso de densificación y debido al aumento de la temperatura, se produce aplastamiento de los lúmenes que constituyen un espacio de almacenamiento del agua capilar disminuyendo así la absorción de humedad. Según Blanchet (2004) la capa de barniz desempeña un papel significativo en los pisos de ingeniería mediante la penetración de este, limitando la adsorción de humedad a través de la superficie de la capa.

En ambas especies, *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens*, no se observan diferencias significativas, sin embargo en el sustrato contrachapado en pisos control presenta menor absorción de humedad que el sustrato OSB, con una diferencia estadísticamente significativa de un 95% de confianza.

5.1. Envejecimiento acelerado

Las **figuras 11 y 12** muestran el valor de Delta E obtenido en pisos de ingeniería con ambas especies.

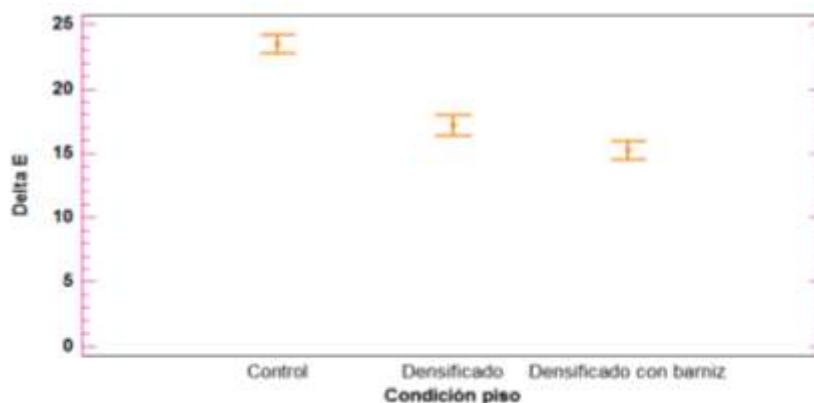


Figura 11: Diferencia de color pisos de *Pinus radiata*

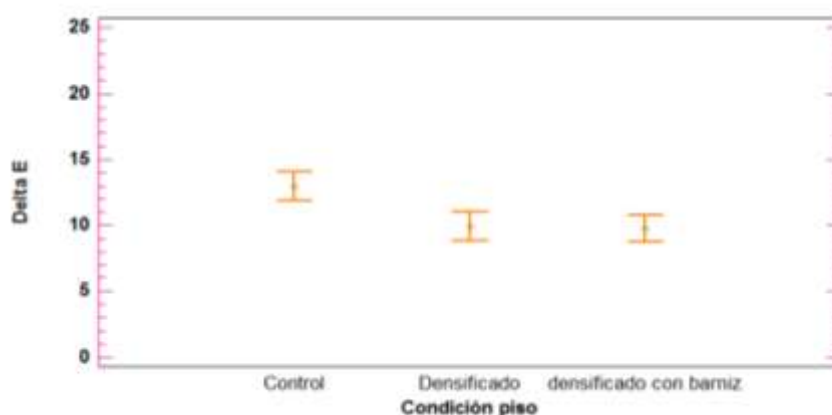


Figura 12: Diferencia de color pisos de *Eucalyptus nitens*.

Las probetas control fueron las más afectadas por el envejecimiento, con respecto a las muestras patrón. lo anterior se debe a la luz ultravioleta y a la condensación a las que fueron sometidas. Su apariencia es de un color mas oscuro y con la superficie dañada (agrietamiento). Los pisos de ingeniería con madera densificada también manifestaron un cambio de color con respecto a la muestra patrón , sin embargo esto ocurrió de manera mas leve. No se aprecio daño superficial después de 8 de 12 horas de envejecimiento acelerado.

Las muestras mostraron una diferencia de intensidad de decoración, sin embargo, la densificada con barniz presentaron menor variación de (ΔE). Esto indica que el piso de madera densificada con barniz proporciona mayor estabilidad del color a la madera de *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens* debido a su capa protectora que impide la adsorción de humedad y la penetración de los rayos UV en las células de la madera.

Para ambas especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens*, el tratamiento de densificación favorece el comportamiento de la variación de color luego del envejecimiento acelerado. similares resultados los encontrados por otros autores. Donde, Ahajji *et al.* (2009), menciona que el mejor rendimiento de color de la madera tratada térmicamente se puede atribuir a la lignina, cuya molécula se modifica parcialmente durante el tratamiento térmico, formándose monómeros fenólicos, fenómeno conocido como condensación de lignina, este fenómeno inhibe parcialmente la luz UV. Del mismo modo Pandey (2005), observó que

entre los recubrimientos ensayados, la más alta resistencia a la luz durante la exposición de envejecimiento acelerado fue registrada para barniz de poliuretano. Además informó que los cambios en el color de la madera durante la irradiación de luz se correlacionaron con la descomposición de lignina.

CONCLUSIONES

La morfología de la interfase en pisos de ingeniería demuestra que el tratamiento de densificación afecta la penetración del adhesivo, disminuyendo la zona interfaseal de forma significativa en relación a pisos de ingeniería sin tratamiento.

En la caracterización nanomecánica de las especies con tratamiento de densificación se observa un incremento del E_r en la pared celular en comparación a los pisos control.

Del mismo modo E paralelo presentan un importante aumento en los pisos con la superficie densificada en ambas especies llegando incluso a 122% de aumento en el caso *Pinus radiata* con sustrato contrachapado en comparación al piso control.

En los ensayos de dureza Brinell, los pisos de madera densificada presentaron un aumento significativo para ambas especies. Aumentando en hasta un 208% en pisos de *Pinus radiata* densificados con aplicación de barniz y un 175%, en *Eucalyptus nitens* densificada con aplicación de barniz.

La absorción de humedad para pisos de ingeniería fue menor en pisos densificados con barniz en ambas especies, *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens* en relación a los pisos control, sin embargo, esta diferencia no fue significativa. El sustrato contrachapado presenta menor absorción de humedad que el sustrato OSB, con una diferencia estadísticamente significativa a un 95% de confianza.

Finalmente luego de someter los pisos a un envejecimiento acelerado para observar el cambio de tonalidades, el mejor comportamiento se presentó en probetas de *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens* con tratamiento de densificación con aplicación de barniz.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este documento agradecen al Proyecto Fondef IDEA CA 13i10310 por proveer el equipamiento y material prima para desarrollar la investigación, a la empresa Oxiquim S.A. por suministrar el adhesivo y facilitar sus instalación donde se realizaron pruebas, al Centro de Biomateriales y Nanotecnología, Laboratorio de Adhesivos y Materiales Compuestos, y al Pabellón de Tecnología de la Madera de la Universidad del Bio-Bio por proveer equipamiento e instalaciones para desarrollar la investigación y al Ingeniero Daniel Torres por el desarrollo de parte de este trabajo en conjunto.

BIBLIOGRAFÍA

AHAJJI, A.; DIOUF, P. N.; ALOUI, F.; ELBAKALI, I.; PERRIN, D.; MERLIN, A.; GEORGE, B. 2009. Influence of heat treatment on antioxidant properties and colour stability of beech and spruce wood and their extractives. *Wood Science and Technology* 43: 69-83.

ACEVEDO, A. 2012. Efecto de las grietas de debobinado en chapas de *Eucalyptus nitens* para la fabricación de tableros contrachapados. Tesis magíster, Universidad del Bío-Bío, Chile.

ASTM G154. 2006. Standard practice for Operating fluorescent light Apparatus for UV exposure of nonmetallic materials.

ASTM D638 2014. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.

BEAUREGARD, R., 1998b, Survey of standard and markets for composite flooring for Europe and North America. International Value-added wood processing conference. Toronto, Canada. 3-4 décembre 1998, pp : 79-84.

BEKTAS, I., ALMA, M. H. AND AS, N. 2001. Determination of the relationships between Brinell and Janka hardness of eastern beech (*FagusorientalisLipsky*). *Forest Products Journal* 51(11/12): 84–88.

BLANCHET, P. 2004. Caractérisation du comportement des lames de plancher d ingénierie, Tesis doctoral, Faculté de foresterie et de géomatique. Université Laval, Québec-Canadá.

BUCKLEY, D.L.; VAN MOLLE, I.; GAREISS, P.C., TAE H.S.; MICHEL, J.; NOBLIN, D.J.; JORGENSEN, W.L.; CIULLI, A. 2002. Crews Targeting the von Hippel-Lindau E3 ubiquitin ligase using small molecules to disrupt the VHL/HIF-1 α interaction J. Am. Chem. Soc., 134 (2012), pp. 4465–4468

CHÁVEZ, R. 2015. Caracterización de maderas de rápido crecimiento: *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens* densificadas con un proceso termo-higro-mecánico. Tesis magíster, Universidad del Bío-Bío, Chile.

CORPORACIÓN CHILENA DE LA MADERA (CORMA). 2009. Plantaciones Forestales, Pinoradiata. (Consultado el 23/07/2016).

EN 1534 (2004). Bestimmung des Eindruckwiederstandes (Binell) Prüfmethode Deutsche Fassung EN 1534:2000-04, 4 seiten EN, April 2004.

FANG, C.-H.; CLOUTIER, A.; BLANCHET, P. 2012. Engineered wood flooring with a densified surface layer for heavy-duty use. BioResources, vol. 7, No. 4, pp 5843 a 5854.

GARAY MOENA, R. M. 2007. Impregnating type lasur for the superficial protection of wood and boards. Agro-Ciencia, 23(1), 25-36.

HILL, C. 2006. Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes. John Wiley and Sons, Ltd, 99-127.

INOUE, M.; SEKINO, N.; MOROOKA, T.; NORIMOTO, M., 1996. Estabilización dimensional de compuestos de madera al vapor I. Fijación de maderacomprimidapor la pre-cocción al vapor. En: Actas del Simposio de CompuestosTercerPacificRimBio-Based, Kyoto, Japón. pp 240-24.

KAMKE, F. A. 2006. "Densificación de *Pinus radiata*paracompuestosestructurales" MaderasCiencia y tecnología 8(2), 83-92.

KOLLMANN, F., AND FENGEL, D. 1965. "Changes in the chemical composition of wood bythermal treatment," HolzRohWerkst. 23(12), 461-468."

KOLLMANN, F.P.; KUENZI, E.W.; STAMM, A.J. 1975. Principles of Wood Science and Technology – Wood Based Materials. Springer – Verlag, New York, Heidelberg, Berlin, 118-120.

KONNERTH, J.; GINDL, W. 2006. Mechanical characterisation of wood-adhesive interphase cell walls by nanoindentation. *Holzforschung* (60): 429-433.

KULTIKOVA, E. V. (1999). *Structure and properties relationships of densified wood* (Doctoral dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University).

KUTNAR A, SERNEK M (2007). Densification of wood. *Zbornik gozd les* 82:53–62

LUTZ, J. F. 1977. Wood veneer: Log selection, cutting, and drying. USDA, Tech. Bull. No. 1577. 137 pp.

MARIOTTI, N. 2010. Caractérisation des propriétés physico-mécaniques de bois densifié thermo-hygro-mécaniquement. M.Sc. Thesis, Université Laval, Quebec, Canada.

MASSEY, R., 1998. Engineered Wood Flooring. Séminaires sur les planchers composites. Ste- Foy, Canada.

MIKLECIC J, JIROUS-RAJKOVIC V, ANTONOVIC A, SPANIC N. 2011. Discoloration of thermally modified wood during simulated indoor sunlight exposure. *Bioresources* 6:434–446

NAVI, P.; Y HEGER, F. 2005. Comportamiento termo-hidgo-mecánico de la madera. Politécnico y Universidad prensas Romande, Lausanne, ISBN 2-88074-620-5.

NCH 2100 OF. 2003 Madera – Molduras – Designación y dimensiones.

NCH 356 OF.1962. Maderas. Parquet.

NIEMZ, P. AND STÜBI, T. 2000. Investigations of hardness measurements on wood based materials using a new universal measurement system. Proceedings of the First International Symposium on wood machining, Vienna, 27.- 29.9.2000: 51–61.

PANDEY, K. K. 2005. “Study of the effect of photo-irradiation on the surface chemistry of wood,” *Polym. Degrad. Stab.* 90, 9-20.”

PARIS, F.; CAÑAS, J.; MARIN, J. 2006. Introducción al análisis y al diseño de Materiales Compuestos. Universidad de Sevilla. Sevilla, España.

PELIT H. AND SÖNMEZ A. (2015): The Effect of Thermo-Mechanical Densification and Heat Treatment on Some Physical Properties of Eastern Beech (*Fagus orientalis* L.) wood. *Düzce University Journal of Science & Technology* 3(1): 1-14.

PELIT, H.; BUDAKÇI, M.; AND SÖNMEZ, A. (2016). “Effects of heat post-treatment on dimensional stability and water absorption behaviours of mechanically densified Uludağ fir and black poplar woods,” *BioResources* 11(2), 3215-3229. DOI: 10.15376/biores.11.2.3215-3229

RAUTKARI, L.; PROPERZI, M.; PICHELIN, F.; HUGHES, M. 2009. Surface modification of wood using friction. *Wood SciTechnol* 43:291–299

SCHWAB, E. 1990. Die Härte von Laubhölzernfür die Parket- therstellung [The hardness of hardwoods for parquet pro- duction]. *HolzalsRoh- und Werkstoff* 48(2): 47– 51 (in German).

SUNDQVIST, S. AND MORÉN, T. 2002. “The influence of wood polymers and extractivesonwoodcolour induced by hydrothermal treatment,” *HolzRohWerkst.* 60, 375-376."

ÜNSAL, Ö.; CANDAN, Z.; BÜYÜKSARı, Ü.; KORKUT, S.; CHANG, Y. S.; AND YEO, H. 2011.“Effect of thermal compression treatment on the surface hardness, vertical density propile and thickness swelling of eucalyptus wood boards by hot-pressing,” *MokchaeKonghak* 39(2), 1-8. DOI: 10.5658/WOOD.2011.39.2.148.

WANG, X.; DENG, Y.; WANG, S.; LIAO, CH.; MENG, Y.; PHAM, T. 2013. Nanoscale Characterization of Reed Stalk Fiber Cell Walls. *BioResources*, 8(2):1986-1996.

ZIVKOVIC, V.; PRSA, I.; TURKULIN, H.; SINKOVIC, T.; JIROUS-RAJKOVIC, V. 2008. Dimensional stability of heat treated wood floorings. *DrvnaIndustrija* 59(2):69–73.

CAPITULO 3: MODELAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL PISO DE INGENIERÍA A TRAVÉS DE LA TEORÍA CLÁSICA DE LAMINACIÓN.

Débora Pino, Mg.¹, Cecilia Bustos, Ph.D.¹, William Gacitúa, Ph.D.¹

¹ Departamento de Ingeniería en Maderas, Facultad de Ingeniería, Universidad del Bío-Bío.
E-mail: depino@alumnos.ubiobio.cl, cbustos@ubiobio.cl, wgacitua@ubiobio.cl

RESUMEN

El objetivo de este capítulo consiste en modelar las propiedades mecánicas de los pisos de ingeniería a través de la teoría clásica de laminación, utilizando el software MatLab. Ecuaciones basadas en la Ley de Hooke para compuestos bidimensionales fueron usadas para determinar las tensiones, tensiones globales y locales en cada capa. Las entradas del programa son las propiedades mecánicas y elásticas de la materia prima, orientación de las laminas y espesores. Posteriormente los resultados del modelo fueron comparados con las propiedades mecánicas obtenidas de forma experimental del mismo laminado. Como resultado, fue posible modelar las propiedades del piso laminado de acuerdo a la teoría clásica de laminación, sin embargo, al ser comparadas con las propiedades de los laminados obtenidos de forma experimental, no fue posible validar el modelo matemático. Esto se podría atribuir al no cumplimiento de los supuestos de la teoría clásica de laminación, los que asumen que cada una de las capas de laminado cuentan con una homogeneidad en sus propiedades físicas y mecánicas, además de una interacción perfecta entre las láminas (adhesión perfecta). Lo cual en los pisos de ingeniería no se cumple.

Palabras claves: Modelamiento, pisos de ingeniería , Teoría clásica de laminación, MatLab.

CHAPTER 3: MODELING THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE LAMINATED FLOOR THROUGH THE CLASSICAL THEORY OF LAMINATION.

Débora Pino, Mg.¹, Cecilia Bustos, Ph.D.¹, William Gacitúa, Ph.D.¹

¹ Department of Engineering in Maderas, Faculty of Engineering, Universidad del Bío-Bío.
E-mail: depino@alumnos.ubiobio.cl, cbustos@ubiobio.cl, wgacitua@ubiobio.cl

ABSTRACT

The objective of this chapter is to model the mechanical properties of engineering floors through classical lamination theory using MatLab software. Equations based on Hooke's Law for two-dimensional compounds were used to determine the tensions, global and local tensions in each layer. Program inputs are material properties, material limits, and load conditions. Subsequently the results of the model were compared with the experimentally obtained mechanical properties of the same laminate. Thus, it was possible to model the properties of the laminate floor per the classical lamination theory. However, when compared with the properties of laminates obtained experimentally, it was not possible to validate the mathematical model. This can be attributed to the non-fulfillment of the assumptions of classical lamination theory, which assume that each of the layers of laminate have a homogeneity in their physical and mechanical properties, as well as a perfect interaction between the lamina (perfect adhesion). Which in the engineering floors is not fulfilled.

Key words: Modeling, engineering floors, classical laminating theory, MatLab.

INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos laminados se utilizan ampliamente en la industria aeroespacial, automóvil, entre otras industrias. Por lo general son más ligeros y más rígidos que otros materiales estructurales. Un material compuesto laminado se compone de varias capas donde cada capa está compuesta por una matriz y por fibras (figura 1). Cada capa puede tener propiedades de los materiales similares o diferentes con distintas orientaciones de las fibras, variando según la secuencia de apilamiento.

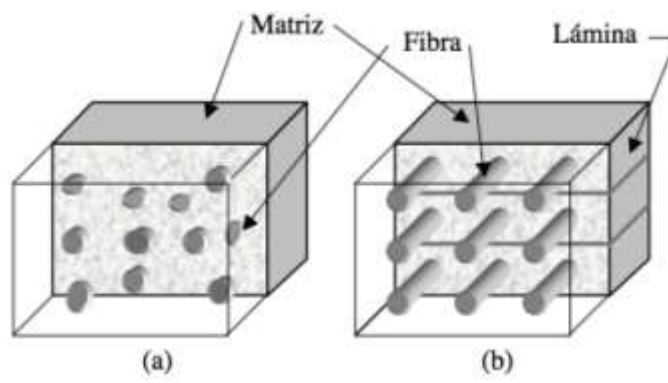


Figura 1. Materiales compuestos. (a) Compuesto reforzado con partículas. (b) Compuesto reforzado con fibras, el cual es un compuesto laminado (la matriz se forma apilando láminas) unidireccional (las fibras están orientadas en este caso en una sola dirección). (Derek Hull, 2003).

Los materiales compuestos desarrollados por el hombre se asemejan a los compuestos naturales. Éstos son materiales conformados por dos o más materiales (fases) que se unen insolublemente de ciertas maneras y en proporciones adecuadas para formar un nuevo material con propiedades diferentes a las de ellos. Los compuestos son diseñados para lograr mejores desempeños que los de los materiales convencionales (Gutiérrez J., 2007).

La teoría clásica de laminación o CLT –Classical Laminated Theory, proporciona un método para calcular las fuerzas y momentos resultantes por unidad de longitud que actúan sobre una lámina, integrando los esfuerzos que actúan en cada lámina a través del espesor del laminado. Se pueden deducir expresiones específicas de la rigidez del laminado en función de la construcción del mismo, esto es la orientación y el espesor de las distintas láminas, la secuencia del apilamiento y las constantes elásticas de cada lamina, módulo de elasticidad paralelo a la fibra $E_{//}$, módulo perpendicular a la fibra E_{\perp} , módulo en cizalle en el plano 12 G_{12} y razón de Poisson en el mismo plano ν_{12} . (Derek Hull, 2003).

Supuestos de la teoría clásica de laminación.

- ✓ Cuando un material compuesto laminado está formado por diferentes materiales, la respuesta mecánica del compuesto resultante debe incluir efectos de las propiedades individuales de cada lámina, según su geometría y orientación.
- ✓ Interacción perfecta entre las lámina (adhesión perfecta)
- ✓ Cada lámina se considera que es una capa homogénea de tal manera que sus propiedades efectivas son conocidas.
- ✓ La lámina individual puede ser isotrópica, ortotrópica o transversalmente isotrópica.

Un compuesto conformado de varias capas o laminas reforzadas por fibras, se denomina laminado. Cada capa es delgada y puede tener una orientación de las fibras diferentes. Dos laminados pueden tener el mismo número de capas y los mismos ángulos de fibra pero los dos laminados pueden ser diferentes debido a la disposición de las capas. La **(figura 2)** muestra un laminado general que consiste con N capas y el sistema de coordenadas cartesianas general, (Derek Hull, 2003).

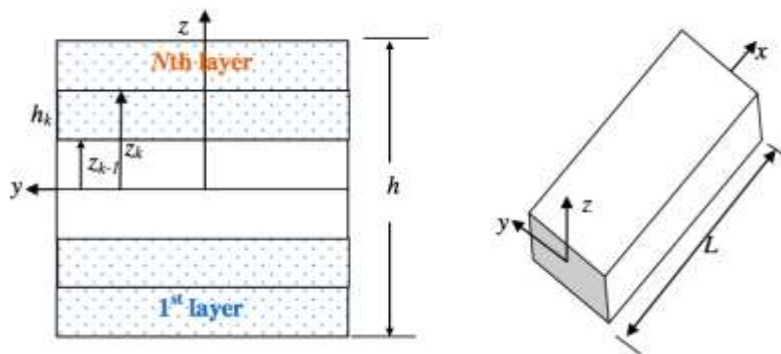


Figura 2: Geometría y coordenadas de laminado. Suna, B. (2014).

El espesor del laminado se denota por h y el espesor de una capa de orden k es h_k . El origen del espesor de coordenadas, designado z , se encuentra en el plano medio geométrico del laminado. El plano medio geométrico puede estar dentro de una capa en particular o en una interfaz entre capas. El laminado se extiende en la dirección z de $-h/2$ a $+h/2$. La capa más lejana en el lado negativo es la capa 1, la siguiente capa es la capa 2, la capa en una ubicación arbitraria es la capa k , y la capa en la posición z más positivo es capa de N . Las ubicaciones de las interfaces de capa son denotadas por un subíndice z ; la primera capa está delimitada por z_0 y z_1 , la segunda capa por z_1 y z_2 , la capa de orden k por z_{k-1} y z_k , y la capa N -ésimo por z_{N-1} y z_N . Suna, B. (2014).

El supuesto importante de la teoría clásica de laminación es que cada punto dentro del volumen de un laminado está en un estado de tensión plana. Por lo tanto, los esfuerzos se pueden calcular si conocemos las tensiones de la superficie de referencia. Teniendo en cuenta la fuerza y el momento resultante, y que se desea calcular las tensiones a través del espesor, así como las tensiones y las curvaturas de la superficie de referencia. También se puede hacer esto mediante el cálculo de la matriz de rigidez laminado.

Los métodos convencionales para el diseño estructural de un material compuesto implican el uso de la ley de Hooke (supuesto de comportamiento elástico) para la dimensión de dos

materiales compuestos unidireccionales, además de las ecuaciones que relacionan el esfuerzo y las tensiones en estos materiales. Un material compuesto no es un material isotrópico y por tanto sus tensiones y deformaciones no pueden estar relacionados solo con la Ley de Hooke ($\sigma=E\varepsilon$), donde esta ley solo se extiende a un análisis bidimensional del laminado. Las propiedades de los materiales, número de capas, orientación de las fibras, espesor de cada capa, y condiciones de carga son utilizadas para determinar las ecuaciones de Ley de Hooke para lo cual se requieren numerosos cálculos matriciales (Ramsaroop, Kanny, 2010).

Por lo tanto, en un intento por reducir esta fase que consume mucho tiempo, se desarrollan programas informáticos que ayudan al usuario en el diseño de las estructuras compuestas. A través del programa se pueden realizar cálculos necesarios en una fracción de tiempo reducida en comparación de las técnicas convencionales (Mazumdar, 2002). De esta manera, programas como el MatLab que es un paquete de cálculo numérico que permite manejar de manera óptima cálculos matriciales, son excelentes herramientas para resolver los sistemas de ecuaciones complejas que tiene la teoría clásica de laminación.

El objetivo de este capítulo consiste en modelar las propiedades mecánicas de los compuestos pisos de ingeniería, mediante la modelación a través de la teoría clásica de laminación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para alimentar el modelo matemático según la teoría clásica de laminación se necesitan conocer las propiedades de los materiales con los cuales se fabricó el piso de ingeniería. Dichos valores fueron obtenidos en capítulos anteriores (1 y 2), a través de ensayos de tracción y de nanoindentaciones en el caso del adhesivo (tabla 1). Exceptuando el esfuerzo de corte el cual se calculó con la expresión (1) y (2).

Tabla 1. Propiedades de los materiales para alimentar el modelo obtenidas en los capítulos 1 y 2 de esta tesis.

Tipo de material	Propiedades de los materiales			
	$E_1(\text{GPa})$	$E_2(\text{GPa})$	$G_{12}(\text{GPa})$	ν_{12}
Lámina densificada de <i>Pinus radiata</i>	21.2	7.2	3.4	0.27
Lámina densificada de <i>Eucalyptus nitens</i>	18.7	4.9	2.7	0.18
Sustrato OSB	5.1	2.6	0.38	0.21
Sustrato contrachapado	8.5	4.3	0.56	0.30
Adhesivo Urea formaldehido	6.8	3.4	2.3	0.43

E_1 = módulo de elasticidad en tracción paralela, E_2 = módulo de elasticidad en tracción perpendicular, G_{12} = Esfuerzo de corte, ν_{12} = Razón de Poisson

Expresión para determinar el esfuerzo de corte:

$$\text{Material isotrópico (Adhesivo) : } G_1 = \frac{E_1}{2(1 + \nu)} \quad (1)$$

Donde :

G_{12} = módulo de rigidez (Gpa)

E_1 = módulo de elasticidad (Gpa)

ν = razón de Poisson

Material Anisótropico (Madera) : $G_{LT} = X_2 \times E_L$ donde $\frac{E_t}{E_l} = X \approx X_2$ (2)

G_{LT} =módulo de rigidez en el plano LT

E_L = módulo de elasticidad longitudinal

E_T =módulo de elasticidad tangencial

X = relación elástica de la madera obtenida

X_2 = relación elástica de la madera, tabla 5-1. Wood Handbook (1987).

Además de conocer las propiedades mecánicas de los materiales, es necesario conocer la geometría del material compuesto (piso laminado) y definir el número de láminas según la teoría clásica de laminación.

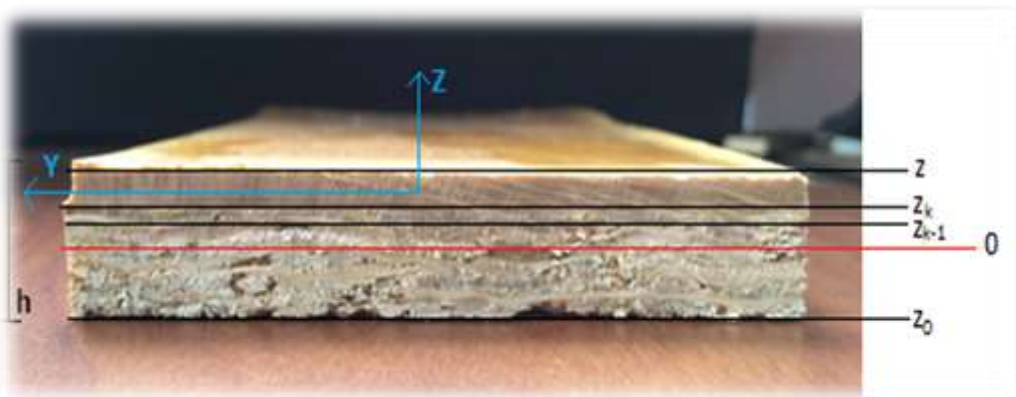


Figura 3: Geometría y coordenadas del piso de ingeniería según la teoría clásica de laminación.

En tabla (2) se exponen los tipos de laminados que se evaluaron según la teoría clásica de laminación, además del número de capas que lo conforman (z) y el espesor final del laminado (h). Cada laminado cuenta con 4 capas (figura 3), la primera corresponde a la chapa densificada, la siguiente es el adhesivo o capa adhesiva y por último las capas corresponden al sustrato, el cual, es dividido por la línea central del laminado convirtiéndolo en 2 capas. Se considera un espesor de 3 mm para la chapa densificada, 9.5 mm para el sustrato OSB y 9.0 mm para el sustrato contrachapado, la capa del adhesivo varía según el espesor de línea de cola el cual fue determinado en capítulo 2 de este estudio.

Tabla 2: Características del laminado.

Tipo de pisos de ingeniería	N de capas(z)	Espesor total (h) (mm)
Densificado de <i>Pinus radiata</i> con OSB	4	12.534
Densificado de <i>Pinus radiata</i> con contrachapado	4	12.035
Densificado de <i>Eucalyptus nitens</i> con OSB	4	12.526
Densificado de <i>Eucalyptus nitens</i> con contrachapado	4	12.032

Usando las ecuaciones del modelo matemático obtenidos a través de la ley de Hooke y la teoría clásica de laminación y utilizando el software MatLab (ver rutina Matlab en anexo), se obtiene, la constante elástica E_1 de cada uno de los tipos de pisos de laminados, que serán comparadas con los datos obtenidos de forma práctica en el capítulo 2 a través del ensayo de tracción de un compuesto.

Las propiedades del laminado diseñado se estimaron con las siguientes expresiones:

Determinación de los esfuerzos en cada una de las láminas

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Donde $[Q]$ es la matriz de rigidez reducida, los elementos de la matriz $[Q]$ en la ecuación (1) son dependientes de las constantes del material y pueden calcularse usando la ecuación (3).

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}}, Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}}, Q_{22} = \frac{E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}}, Q_{66} = G_{12} \quad (3)$$

Donde E_1, E_2 son el módulo de elasticidad en las direcciones 1 y 2 (longitudinal, tangencial); G_{12} es el módulo de cizalle; ν_{12}, ν_{21} son Poisson en los planos 1-2 y 2-1.

La matriz $[Q]$ en la Ecuación (2) puede ser determinada por la ecuación (4)

$$[\bar{Q}] = [T]^{-1}[Q][R][T][R]^{-1} \quad (4)$$

Donde $[T]$ es la matriz de transformación; $[R]$ es la matriz de Reuter (constante). Estas matrices son dadas por:

$$T = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2sc \\ s^2 & c^2 & -2sc \\ -sc & sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \quad \text{y} \quad R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Así, las tensiones locales en la ecuación (1) son transformadas a las tensiones globales de la ecuación (2) por la ecuación (6)

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad \text{y} \quad \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = [R][T][R]^{-1} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Las ecuaciones (1) a (6) se usan para determinar las tensiones para una sola capa compuesta. Dado que los laminados o compuestos son entidades de múltiples capas, también deben establecerse ecuaciones para este caso. El resultado es la ecuación (7).

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon^0 \\ \kappa \end{bmatrix} \quad (7)$$

Donde N es el vector de las ⁷fuerzas resultantes que se aplican al laminado; M es el vector de los momentos resultantes; ε^0 es el vector del plano medio; κ es el vector de las curvaturas del plano medio geométrico. Los vectores ε y κ están relacionados con las coordenadas globales por la ecuación (8).

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Donde z es una distancia arbitraria del plano medio. Las matrices $[A]$, $[B]$ y $[D]$ de la ecuación (6) se conocen como matrices de rigidez de extensión, de acoplamiento y de flexión, respectivamente. Los elementos de estas matrices pueden determinarse a partir de las ecuaciones (9) a (11):

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n \left[(\overline{Q}_{ij}) \right]_k (h_k - h_{k-1}) \quad i=1,2,3 \quad j=1,2,3 \quad (9)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \left[(\overline{Q}_{ij}) \right]_k (h_k^2 - h_{k-1}^2) \quad i=1,2,3 \quad j=1,2,3 \quad (10)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n \left[(\overline{Q}_{ij}) \right]_k (h_k^3 - h_{k-1}^3) \quad i=1,2,3 \quad j=1,2,3 \quad (11)$$

Donde finalmente las propiedades del laminado se pueden estimar como:

\bar{E}_x = Módulo de elasticidad axial

$$\bar{E}_x = \frac{1}{a_{11}H}$$

\bar{E}_y = Módulo de elasticidad transversal

$$\bar{E}_y = \frac{1}{a_{22}H}$$

\bar{G}_{xy} = Esfuerzo de corte

$$\bar{G}_{xy} = \frac{1}{a_{66}H}$$

$\bar{\nu}_{xy}$ = Razón de Poisson axial

$$\bar{\nu}_{xy} = -\frac{a_{12}}{a_{11}}$$

$\bar{\nu}_{xy}$ = Razón de Poisson transversal

$$\bar{\nu}_{xy} = -\frac{a_{12}}{a_{22}}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A través de la teoría clásica de laminación se logró modelar las propiedades del piso de ingeniería, obteniendo el módulo de elasticidad del compuesto laminado E_I . Sin embargo, al comparar dichos valores con los módulos de elasticidad determinados de forma experimental, mediante ensayos de tracción en el capítulo 2 de este estudio, se observa que existe una diferencia significativa con un 95% de confianza entre ambos, siendo inferior E_I del modelamiento.

Tabla 3: Módulo de elasticidad de los laminados E_I obtenidos a través del modelamiento con la teoría clásica de laminación y de forma experimental.

Piso laminado	E_I Modelamiento (GPa)	E_I Experimental (GPa)
<i>Pinus radiata</i> densificado con OSB	5,9	21,3
<i>Pinus radiata</i> densificado con contrachapado	3,8	25,8
<i>Eucalyptus nitens</i> densificado con OSB	3,7	20,8
<i>Eucalyptus nitens</i> densificado con contrachapado	5,8	25,1

La **tabla 3**, expone los valores de módulo de elasticidad obtenidos a través del modelamiento para los pisos de ingeniería, los cuales no se ajustan a los valores obtenidos experimentalmente. Debido a lo anterior, no es posible validar el modelo matemático. Esto se podría explicar de acuerdo a los supuestos de la teoría clásica de laminación (Gutiérrez J., 2007), el cual asume que cada una de las capas de laminado cuentan con una homogeneidad en sus propiedades físicas y mecánicas, además de una interacción perfecta entre las lámina (adhesión perfecta). Sin embargo en los resultados obtenidos experimentalmente se observa que al unir las capas del laminado con adhesivo urea formaldehído, se refuerzan las propiedades de las capas adyacentes, provocando un aumento de sus propiedades. Entre mayor es la zona de interfase mayor es la zona de reparación de los defectos de la chapa (nudos, rajaduras, grietas), efectos que no son reflejados a través del modelamiento. Otro aspecto que podría explicar la diferencia significativa en los valores del E_I , corresponde a la geometría de la probeta, considerándose

que la probeta utilizada para el ensayo es una probeta (hueso de perro), geometría que el modelo no puede reconocer por ser de forma irregular.

CONCLUSIONES

Luego de realizar el modelo matemático para el piso laminado a través de la teoría clásica de laminación se logra obtener el módulo de elasticidad del compuesto. Sin embargo al comparar los resultados del modelo con los ensayos experimentales, no es posible validar el modelo matemático.

Los resultados simulados y los experimentales difieren significativamente a favor de los datos experimentales. Sin embargo hay que tener en consideración que la cantidad de datos disponibles para comparar es escasa y que los resultados de laboratorio tienen una gran variabilidad, por lo tanto hay que tener cuidado a la hora de comparar.

Finalmente como recomendación para otros trabajos de investigación, se sugiere comparar los resultados obtenidos con nuevos modelos, los cuales puedan representar el aumento de las propiedades luego de la aplicación de adhesivo, además de considerar la geometría de la probeta en los ensayos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este documento agradecen al Proyecto Fondef IDEA CA 13i10310 por proveer el equipamiento y material prima para desarrollar la investigación, a la empresa Oxiquim S.A. por suministrar el adhesivo, al Centro de Biomateriales y Nanotecnología, Laboratorio de Adhesivos y Materiales Compuestos, y al Pabellón de Tecnología de la Madera de la Universidad del Bío-Bío por proveer equipamiento e instalaciones para desarrollar la investigación.

BIBLIOGRAFÍA

CASADO, M. (2014). Manual Básico de Matlab“. Servicios Informáticos UCM, Apoyo a Investigación y Docencia.

GUTIÉRREZ, J. (2017). “Análisis de laminados compuestos mediante el método de los elementos finitos departamento de estabilidad facultad de ingeniería universidad de buenos aires

HULL, D. (2003). Celtic and Anglo-Saxon art: geometric aspects. Liverpool University Press.

MAZUMDAR, S. K., (2002). “Composite Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering,” CRC Press LLC, Boca Raton”.

MATLAB version 8.3.0.532. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2014.

RAMSAROOP, A.; KANNY, K. Using MATLAB. (2010). Design and Analyse Composite Laminates. Scientific Research Publishing, Engineering, 2, 904-916, 2010.

ROWELL, R. M. (2012). Handbook of wood chemistry and wood composites.

SUNA, B. (2014). Design and Analysis of Laminated Composite Materials submitted; Degree of Bachelor of Technology in Mechanical Engineering at National Institute of Technology, NIT Rourkela.

WOOD HANDBOOK (2010). Wood as an engineering material ... Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL- GTR-190, 2010: 509 p.

CONCLUSIÓN GENERAL

Fue posible la fabricación de pisos de ingeniería con una superficie densificada con especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens* con sustratos OSB y contrachapado.

Mediante la caracterización de la materia prima para la fabricación del piso de ingeniería se ratifico el aumento de las propiedades de físicas y mecánicas de las chapas densificadas, aumentando hasta en 110% la densidad y 220% en el caso de la rigidez.

La caracterización de las propiedades físicas, mecánicas y nanomecánicas realizadas al compuesto laminado piso, determinó que los pisos con tratamiento de densificación en su superficie, tienen un importante aumento en sus propiedades en comparación con los pisos sin el tratamiento de densificación. A la vez se logro determinar mayores propiedades físicas y mecánicas en los pisos con sustrato contrachapado que en los sustratos OSB.

Mediante el uso del SEM fue posible caracterizar la interface del piso laminado. La morfología de la interfase en pisos de ingeniería demuestra que el tratamiento de densificación afecta la penetración del adhesivo urea formaldehído, disminuyendo la zona interfásial de forma significativa en relación a pisos de ingeniería sin tratamiento.

Empleando un envejecimiento acelerado mediante UV y condensación, fue posible comprobar el buen comportamiento de los pisos con la superficie densificada. Además se comprobó la eficacia del barniz poliuretano para la protección de la superficie del piso.

Utilizando las propiedades de las laminas del piso y del adhesivo, fue posible realizar el modelo matemático a través de la teoría clásica de laminación, sin embargo y luego de la comparación con las propiedades del compuesto obtenidas experimentalmente, no fue posible la validación de este.

BIBLIOGRAFÍA GENERAL

- ACEVEDO, A. 2012.** Efecto de las grietas de debobinado en chapas de *Eucalyptus nitens* para la fabricación de tableros contrachapados. Tesis magíster, Universidad del Bío-Bío, Chile.
- AHAJJI, A.; DIOUF, P. N.; ALOUI, F.; ELBAKALI, I.; PERRIN, D.; MERLIN, A.; GEORGE, B. 2009.** Influence of heat treatment on antioxidant properties and colour stability of beech and spruce wood and their extractives. *Wood Science and Technology* 43: 69-83.
- AKPABIO. 2012.** Effect of pH on the Properties of Urea Formaldehyde Adhesives Article history. *International Journal of Modern Chemistry*, 2012, 2(1): 15-19.
- ASTM D638 2014.** Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.
- ASTM G154. 2006.** Standard practice for Operating fluorescent light Apparatus for UV exposure of nonmetallic materials.
- BEAUREGARD, R., 1998b,** Survey of standard and markets for composite flooring for Europe and North America. International Value-added wood processing conference. Toronto, Canada. 3-4 décembre 1998, pp : 79-84.
- BEKTAS, I., ALMA, M. H. AND AS, N. 2001.** Determination of the relationships between Brinell and Janka hardness of eastern beech (*FagusorientalisLipsky*). *Forest Products Journal* 51(11/12): 84–88.
- BLANCHET, P.; M. LEFEBVRE. 2003.** Comparative study of four adhesives used as binder in engineered wood parquet flooring. *Forest Prod. J.* 53(1):89-93.
- BLANCHET, P. 2004.** Caractérisation du comportement des lames de plancher d'ingénierie, thèse de Doctorat, Département de Foresterie et de Géomatique, Université Laval, Québec, Canada, 129 p
- BOONSTRA, M.; VAN ACKER, J.; TJEERDSMA,B.; KEGEL, E. 2007.** Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural Wood constituents, *Ann. For. Sci.* 64(7), 679-690.
- BUCKLEY, D.L.; VAN MOLLE, I.; GAREISS, P.C., TAE H.S.; MICHEL, J.; NOBLIN, D.J.; JORGENSEN, W.L.; CIULLI, A. 2002.** Crews Targeting the von Hippel-Lindau E3 ubiquitin ligase using small molecules to disrupt the VHL/HIF-1 α interaction *J. Am. Chem. Soc.*, 134 (2012), pp. 4465–4468

BUSTOS, C., GACITUA, W., CLOUTIER, A., FANG, C. H., & CARRASCO, P. V. (2012). Densification of wood veneers combined with oil-heat treatment. Part III: Cell wall mechanical properties determined by nanoindentation. *BioResources*, 7(2), 1525-1532.

CASADO, M. (2014). *Manual Básico de Matlab*. Servicios Informáticos UCM, Apoyo a Investigación y Docencia.

CHÁVEZ, R. 2015. Caracterización de maderas de rápido crecimiento: *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens* densificadas con un proceso termo-higro-mecánico. Tesis Magister, Universidad del Bío-Bío, Chile.

CLOUTIER, A.; FANG, C.; MARIOTTI, N. 2008. Densification of wood veneers under the effect of heat, steam and pressure. Proceedings of the 51st International convention of Society of wood science and technology. Concepción Chile.

CORPORACIÓN CHILENA DE LA MADERA (CORMA). 2009. Plantaciones Forestales, *Pinoradiata*. (Consultado el 23/07/2016).

DIAZ-VAZ, J. 2003. Anatomía de maderas. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 151 pp.

EN 13986 (2004). Wood-based panels for use in construction – Characteristics, evaluation of conformity and marking. European Standard. CEN 2004.

EN 1534 (2004). Bestimmung des Eindruckwiederstandes (Binell) Prüfmethode Deutsche Fassung EN 1534:2000-04, 4 seiten EN, April 2004.

FANG, C.-H.; CLOUTIER, A.; MARIOTTI, N.; KOUBAA, A.; y BLANCHET, P., (2010). " La densificación de chapas de madera, "Actas de la Sociedad de la Madera de Ciencia y Tecnología (SWST) Internacional de Convenciones. Ginebra, Suiza.

FANG C.; CLOUTIER A.; BLANCHET P.; KOUBAA A.; MARIOTTI N. 2011. Densification of wood veneers combined with oil-heat treatment. Part1: Dimensional stability. *Bioresources* 6(1), 373-385.

FANG, C.-H.; CLOUTIER, A.; BLANCHET, P. 2012. Engineered wood flooring with a densified surface layer for heavy-duty use. *BioResources*, vol. 7, No. 4, pp 5843 a 5854.

FUENTEALBA, V. 2001. Determinación de las constantes elásticas en *Pinus radiata* d. don por ultrasonido: módulos de elasticidad, módulos de rigidez y razón de Poisson, scientific electronic library online - chile. Recuperada en noviembre 20, 2012 tesis doctoral.

GARAY MOENA, R. M. 2007. Impregnating type lasur for the superficial protection of wood and boards. *Agro-Ciencia*, 23(1), 25-36.

GIBSON, L.; ASHBY, M. 1997. Cellular solids, structure and properties. In Cambridge University Press 2nd edn. Cambridge, UK:Cambridge University Press.

GUPTA, R. C.; V. SEHGAL. 1979. Effect of viscosity and molecular weigth of ligninphenol-formaldehyde resin on the glue adhesion of plywood.*Holzforshung und Holz verwertung* 31 (1): 7 – 9.

GUTIÉRREZ, J. (2017). “Análisis de laminados compuestos mediante el método de los elementos finitos departamento de estabilidad facultad de ingeniería universidad de buenos aires

HULL, D. (2003). Celtic and Anglo-Saxon art: geometric aspects. Liverpool University Press.

HILL, C. 2006. Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes. John Wiley and Sons, Ltd, 99-127.

INFOR 2016. Instituto Forestal, Chile.

INOUE, M.; SEKINO, N.; MOROOKA, T.; NORIMOTO, M., 1996. Estabilización dimensional de compuestos de madera al vapor I. Fijación de maderacomprimidapor la pre-cocción al vapor. En: Actas del Simposio de CompuestosTercerPacificRimBio-Based, Kyoto, Japón. pp 240-24.

INOUE, M.; SEKINO, N.; MOROOKA, T.; NORIMOTO, M., 1996. Estabilización dimensional de compuestos de madera al vapor I. Fijación de maderacomprimidapor la pre-cocción al vapor. En: Actas del Simposio de CompuestosTercerPacificRimBio-Based, Kyoto, Japón. pp 240-24.

INOUE, M.; SEKINO, N.; MOROOKA, T.; ROWELL, R.; Y NORIMOTO, M., (2008). "Fijación de la deformación a la compresión en madera por pre-vapor, "J. Trop. Bosque. Sci.. 20 (4).

- KAMKE, F. A. 2006.** "Densificación de Pinus radiata para compuestos estructurales" *Maderas Ciencia y tecnología* 8(2), 83-92.
- KOLLMANN, F.P.; KUENZL, E.W.; STAMM, A.J. 1975.** Principles of Wood Science and Technology – Wood Based Materials. Springer – Verlag, New York, Heidelberg, Berlin, 118-120.
- KOLLMANN, F., AND FENGEL, D. 1965.** "Changes in the chemical composition of wood by thermal treatment," *HolzRohWerkst.* 23(12), 461-468."
- KONNERTH, J.; GINDL, W. 2006.** Caracterización mecánica de las paredes celulares de la interfase adhesivo de madera por nanoindentación. *Holzforschung* 60 (2006): 429-433.
- KULTIKOVA, E. V. (1999).** Structure and properties relationships of densified wood (Doctoral dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University).
- KUTNAR A, SERNEK M (2007).** Densification of wood. *Zbornik gozd les* 82:53–62
- LI, L., GONG, M., YUAN, N., & LI, D. (2013).** An optimal thermo-hydro-mechanical densification (THM) process for densifying balsam fir wood. *BioResources*, 8(3), 3967-3981.
- LUTZ, J. F. 1977.** Wood veneer: Log selection, cutting, and drying. USDA, Tech. Bull. No. 1577. 137 pp.
- MALONEY, T. M. 1996.** The family of wood composite materials. *Forest Products Journal*. 10(2):19-26.
- MARIOTTI, N. 2010.** Caractérisation des propriétés physico-mécaniques de bois densifié thermo-hygro-mécaniquement. M.Sc. Thesis, Université Laval, Quebec, Canada.
- MASSEY, R., 1998.** Engineered Wood Flooring. Séminaires sur les planchers composites. Ste-Foy, Canada.
- MATLAB 8.3.0.532.** Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2014.
- MAYER, I.; KOCH, G. 2007.** Element content and pH value in American black cherry (*Pinus serotina*) with regard to colour changes during heartwood formation and hot water treatment. *Wood Sci Technol* (41):537-547.
- MAZUMDAR, S. K., (2002).** "Composite Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering," CRC Press LLC, Boca Raton".

MIKLECIC J, JIROUS-RAJKOVIC V, ANTONOVIC A, SPANIC N. 2011. Discoloration of thermally modified wood during simulated indoor sunlight exposure. *Bioresources* 6:434–446

NAVI, P.; Y GIRARDET, F.,(2000) . Efecto del tratamiento THM en la estructura y propiedades de la madera. *Holzforschung* 54:287-293.

NAVI, P.; Y HEGER, F. 2005. Comportamiento termo-hídrico-mecánico de la madera.

Politécnico y Universidad presses Romande, Lausanne, ISBN 2-88074-620-5.

NCH 356 OF.1962. Maderas. Parquet.

NCH 2100 OF. 2003 Madera – Molduras – Designación y dimensiones.

NCH176/1.2003. Maderas. Determinación de la humedad. Instituto de Normalización Nacional, Santiago.

NCH176/2.2003. Maderas. Determinación de la densidad. Instituto de Normalización Nacional, Santiago.

NIEMZ, P. AND STÜBLI, T. 2000. Investigations of hardness measurements on wood based materials using a new uni- versal measurement system. *Proceedings of the First International Symposium on wood machining, Vienna, 27.- 29.9.2000:* 51–61.

PANDEY, K. K. 2005. “Study of the effect of photo-irradiation on the surface chemistry

PARIS, F.; CAÑAS, J.; MARIN, J. 2006. Introducción al análisis y al diseño de Materiales Compuestos. Universidad de Sevilla. Sevilla, España.

PELIT H. AND SÖNMEZ A. (2015): The Effect of Thermo-Mechanical Densification and Heat Treatment on Some Physical Properties of Eastern Beech (*Fagus orientalis* L.) wood. *Düzce University Journal of Science & Technology* 3(1): 1-14.

PELIT, H.; BUDAKÇI, M.; AND SÖNMEZ, A. (2016). “Effects of heat post-treatment on dimensional stability and water absorption behaviours of mechanically densified Uludağ fir and black poplar woods,” *BioResources* 11(2), 3215-3229. DOI: 10.15376/biores.11.2.3215-3229

PIZZI, A. 1983. *Wood Adhesives and technology.* New York, Marcel Dekker Inc. 364 p.

POBLETE, H., (2002). Studio técnico de la utilización de Eucalyptus nitens en la fabricación de contrachapado: ensayo con trozas basales y segundas. Informe de convenio. Universidad Austral de Chile- Forestal Minico S.A., 42p.

RAMSAROOP, A.; KANNY, K. Using MATLAB. (2010). Design and Analyse Composite Laminates. Scientific Research Publishing, Engineering, 2, 904-916, 2010.

RAUTKARI, L.; PROPERZI, M.; PICHELIN, F.; HUGHES, M. 2009. Surface modification of wood using friction. Wood SciTechnol 43:291–299

RAUTKARI, L.; KAMKE, F.; HUGHES M. 2011. Density profile relation to hardness of viscoelastic thermal compressed (VTC) wood composite. Wood Science and Technology, 45(5): 693-705.

ROWELL, R. M. (2012). Handbook of wood chemistry and wood composites.

SCHWAB, E. 1990. Die Härte von Laubhölzern für die Parket- herstellung [The hardness of hardwoods for parquet pro- duction]. HolzalsRoh- und Werkstoff 48(2): 47–51 (in German).

SEO, J. K., JEON, J. S., LEE, J. H., AND KIM, S. M. (2011). “Thermal performance analysis according to wood flooring structure for energy conservation in radiant floor heating systems,” Energy and Buildings 43(8), 2039-2042.

SOTO; GYSLING. 2009. productos con oportunidad de desarrollo en chile: pisos de madera. metropolitana, c. s., & mercado, á. d. e. y. productos con oportunidades de desarrollo en. INFOR.

SUNA, B. (2014). Design and Analysis of Laminated Composite Materials submitted; Degree of Bachelor of Technology in Mechanical Engineering at National Institute of Technology, NIT Rourkela.

SUNDQVIST, S. AND MORÉN, T. 2002. “The influence of wood polymers and extractives on wood colour induced by hydrothermal treatment,” HolzRohWerkst. 60, 375-376.”

THOMAS, W. H. (2003). Poisson’s ratios of an oriented strand board. Wood science and technology, 37(3-4), 259-268.

ÜNSAL, Ö.; CANDAN, Z.; BÜYÜKSARı, Ü.; KORKUT, S.; CHANG, Y. S.; AND YEO, H. 2011. “Effect of thermal compression treatment on the surface hardness, vertical density profile and

thickness swelling of eucalyptus wood boards by hot-pressing,” *MokchaeKonghak* 39(2), 1-8. DOI: 10.5658/WOOD.2011.39.2.148.

WANG, X.; DENG, Y.; WANG, S.; LIAO, CH.; MENG, Y.; PHAM, T. 2013. Nanoscale Characterization of Reed Stalk Fiber Cell Walls. *BioResources*, 8(2):1986-1996.

WOOD HANDBOOK (2010). Wood as an engineering material ... Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL- GTR-190, 2010: 509 p.

ZIVKOVIC, V.; PRSA, I.; TURKULIN, H.; SINKOVIC, T.; JIROUS-RAJKOVIC, V. 2008. Dimensional stability of heat treated wood floorings. *DrvnaIndustrija* 59(2):69–73.

ANEXO

ANEXO 1: Rutina computacional creada en MatLab, (código del modelamiento).

%Propiedades de los las laminas en GPa en pisos de Pinus radiata densificado con sustrato contrachapado.

E1=[21249;6790;8510;8510];

E2=[7226;3400;4337;4337];

G12=[3395;2300;560;560];

nu12=[0.27;0.43;0.3;0.3];

z=[-6.0175;0;3.0175;2.982;6.0175];

H=z(5,1)-z(1,1);

R=[1 0 0;0 1 0;0 0 2];

N=[100;100;0];M=[300;200;0];

theta=[0;0;90;90];

A=zeros(3);

B=zeros(3);

D=zeros(3);

for k=1:4

Q=ReducedStiffness(E1(k,1),E2(k,1),nu12(k,1),G12(k,1));

Qbar=Tinv(theta(k,1))*Q*R*T(theta(k,1))*inv(R);

A=A+Qbar*(z(k+1,1)-z(k,1));

B=B+0.5*Qbar*(z(k+1,1)^2-z(k,1)^2);D=D+1/3*Qbar*(z(k+1,1)^3-z(k,1)^3);

End

```

A;
B
D;
Astar=inv(A);
Bstar=-1*inv(A)*B;
Cstar=B*inv(A);
Dstar=D-B*inv(A)*B;
Aprime=Astar-Bstar*inv(Dstar)*Cstar;
%Strains and curvatures of the Laminate
Strains=(Astar-Bstar*inv(Dstar)*Cstar)*N+Bstar*inv(Dstar)*M
Curvatures=inv(Dstar)*M-inv(Dstar)*Cstar*N
%Engineering Properties
Exbar=1/(Aprime(1,1)*H)
Eybar=1/(Aprime(2,2)*H)
Gxybar=A(3,3)/H
nuxybar=-Aprime(1,2)/Aprime(1,1)
nuyxbar=-Aprime(1,2)/Aprime(2,2)

%RESULTADOS

```