



CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DE COMPENSADO PRODUZIDO COM LÂMINA TERMORRETIFICADA E RESINA POLIURETANA

PHYSICAL CHARACTERIZATION OF PLYWOOD PRODUCED WITH THERMORRETIFICATED VENEERS AND POLYURETHANE RESIN

Danilo Soares Galdino^{1*}, João Vítor Felipe Silva¹, Maria Fernanda Felipe Silva², Bruno Santos Ferreira², Ricardo Marques Barreiros², Cristiane Inácio de Campos^{1,2}

⁽¹⁾ Facultad de Ingeniería de Guaratinguetá. Universidad Estatal de São Paulo (UNESP), Guaratinguetá/SP, Brasil

⁽²⁾ Facultad de Ingeniería Industrial en Madera. Universidad Estatal de São Paulo (UNESP), Itapeva/SP, Brasil

* Contacto: danilo.galdino@unesp.br

CÓDIGO: 4618917

Resumen

Los tableros contrachapado son productos de amplia aplicación, principalmente en la industria del mueble y en el sector de la construcción. Los adhesivos comerciales utilizados comúnmente para su producción contienen resinas a base de formaldehído que son perjudiciales para la salud y el medio ambiente, para que la resina de poliuretano a base de aceite de ricino se convierta en una alternativa para reemplazar este adhesivo. Además, en los últimos años, el tratamiento térmico ha ganado importancia en la industria maderera como la técnica más sostenible para mejorar algunas propiedades inherentes de la resistencia a la biodegradación de la madera. En base a esto, el presente trabajo tuvo como objetivo analizar la influencia del tratamiento térmico en láminas de *Pinus taeda*, en la producción de tablero contraplacado con resina poliuretana a base de ricino. En la producción de los tableros se utilizaron cinco láminas de 2,3 mm de espesor (nominal). Las láminas fueron sometidas a tratamiento térmico en prensa termomecánica por 30 minutos, en tres diferentes temperaturas (160, 180 y 200 °C). Los ensayos físicos realizados fueron densidad, contenido de humedad, absorción y hinchazón del espesor después de la inmersión en agua durante 24 horas, evaluadas de acuerdo con los documentos normativos de la Asociación Brasileña de Normas Técnicas (ABNT). La termorrección en el tablero contrachapado demostró ser una alternativa para obtener un producto con menor higroscopicidad y mejor estabilidad dimensional.

Palabras-clave: contrachapado, tableros, adhesivo poliuretano, termorrección.

Abstract

Plywood is a product of wide application, mainly in the furniture industry and in the construction sector. Commercial adhesives commonly used for their production contain formaldehyde-based resins that are harmful to health and the environment. Castor oil based polyurethane resin is an alternative to replace this adhesive. In addition, in recent years, heat treatment has gained importance in the wood industry as the most sustainable technique to improve some inherent properties of wood biodegradation resistance. Based on this, the objective of this work was to analyze the influence of heat treatment on *Pinus taeda* veneer for plywood production with polyurethane resin. In the production of panels, five veneer with 2.3 mm thickness were used, analyzing the thermoregulation process of veneer in press for 30 minutes and three different temperatures (160, 180 and 200 °C). The physical tests performed were density, moisture content, absorption and swelling of the thickness after immersion in water for 24 hours, evaluated in accordance with the normative documents of the Brazilian Association of Technical Standards (ABNT). The heat treatment in the plywood panel proved to be an alternative to obtain a product with lower hygroscopicity and better dimensional stability.

Keywords: plywood, panels, polyurethane resin, heat treatment.



1. INTRODUCCIÓN

Los tableros contrachapados, así como la madera, pueden mejorar su resistencia a la humedad y las propiedades de ataque del xilófago a través de la técnica de tratamiento conservante, siendo lo tratamiento térmico una solución sostenible.

Además de contribuir al medio ambiente, esta práctica es una excelente herramienta para la innovación, como lo es el uso de adhesivos libres del compuesto de formaldehído que es químicamente ofensivo para el hombre y el medio ambiente.

En Brasil, la resina de poliuretano derivada del aceite de ricino parece ser una sustitución viable, que tiene la ventaja de proceder de materias primas naturales y renovables a precios razonables.

Algunas investigaciones ya han demostrado su viabilidad para su uso en la industria maderera, cuya calidad de unión es cercana o incluso superior a los tableros producidos con resinas tradicionales (CAMPOS et. al., 2009). Sin embargo, se sabe poco sobre la influencia del tratamiento térmico y su uso para este tipo de adhesivo.

Es común encontrar en la literatura que la termorrección disminuye la higroscopicidad de la madera, mejora la estabilidad dimensional y reduce la humedad de equilibrio (TJEERDSMA y MILITZ, 2005; YILDIZ, GEZER e YILDIZ, 2006; POUBEL et al. 2013). Además, la termorrección altera las propiedades de humectabilidad de los tableros e interfiere con la calidad de la unión (FERREIRA, CAMPOS y RANGEL, 2018).

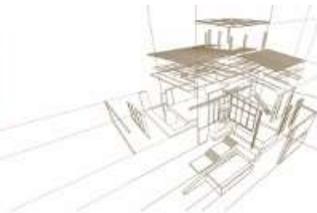
La explicación de este fenómeno es que durante el tratamiento se produce la degradación de los componentes químicos esenciales de la madera, especialmente las hemicelulosas sensibles al calor y más hidrófilas de la madera, lo que reduce la afinidad de la madera por el agua (WEILAND; GUYONNET, 2003; PONCKSAC, 2006).

Tjeerdsma y col. (1998) explican que la reducción de la higroscopicidad también puede explicarse debido a una red de lignina más firme e inelástica, que ha sufrido reacciones de reticulación y condensación alrededor de las microfibrillas de celulosa. Esto hace que disminuya la capacidad de expansión de las microfibrillas de celulosa y, por lo tanto, su capacidad de absorber agua, evitando que la pared celular se hinche como resultado, y también disminuyendo el punto de saturación de las fibras.

Los estudios realizados por Yildiz, Gezer e Yildiz (2006) y Poubel et al. (2013) llevaron a la conclusión de que la estabilidad dimensional de la madera causada por la termorrección da como resultado una reducción de la humedad de equilibrio y menos contracciones e hinchazón del panel terminado.

La aplicación del tratamiento térmico, como puede verse, da como resultado un producto con características diferenciadas en comparación con la madera utilizada originalmente, desarrollando así aplicaciones diferenciadas del producto bajo el efecto de termorrección (BRITO et al, 2006).

Por lo tanto, este trabajo tuvo como objetivo investigar los efectos de la rectificación térmica de la lámina sobre las propiedades físicas del tablero contrachapado producido con resina de poliuretano.



2. METODOLOGÍA

2.1. Tratamiento de las láminas

Para la producción del tablero de madera contrachapado, se utilizaron especies de *Pinus taeda* de 2,3 mm de espesor (nominal). Las láminas para la investigación fueron donadas por la empresa Miraluz - Industria e Comercio de Madeiras Ltda., productora de tablero contrachapado en la ciudad de Sengés / PR. Los tableros secos se cuadraron a dimensiones de 450 x 450 mm, y estas dimensiones se determinaron especialmente debido al tamaño de la prensa involucrada en la investigación.

El tratamiento térmico se realizó en prensa durante 30 minutos cuando entonces los tableros fueron sometidos individualmente a la aplicación de 50 bares de presión y temperatura inherentes a cada tratamiento térmico (160, 180 y 200 °C).

2.2. Producción de los tableros

La resina utilizada fue el poliuretano derivado del aceite de ricino de dos componentes, que se aplicó manualmente con una espátula, usando un peso adhesivo de 395 g / m² con una línea de doble pegamento. Solo un lado de las láminas se llena con el adhesivo. Así, para cada línea de pegamento se usaron 63,2 g y, en consecuencia, se produjeron 390 g de adhesivo por tablero.

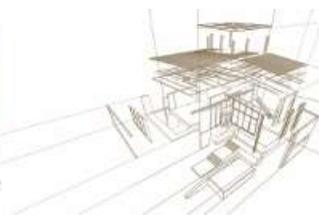
Los cinco tableros se superpusieron sobre láminas ortogonales y se pre prensaron en frío, en una prensa neumática manual con una presión de 2 kgf / cm² durante 15 minutos. Posteriormente, la prensa caliente se hizo en una prensa hidráulica calentada con una presión máxima de 6 kgf / cm², a una temperatura de 90°C durante un tiempo de 10 minutos. Este tiempo de prensado se dividió en 3 ciclos, cada uno de 3 minutos de duración y 30 segundos añadidos para aliviar la presión entre ciclos. Después de presionar, el tablero se acondicionó en un clima de 25 ° C y 60% de humedad relativa, durante 72 horas antes de ser seccionado para hacer las muestras.

2.3. Caracterización

Los tableros producidos se caracterizaron físicamente de acuerdo con las regulaciones brasileñas: Determinación de la densidad (ABNT NBR 9485: 2011), Determinación del contenido de humedad (ABNT NBR 9484: 2011), Determinación de la absorción de agua (ABNT NBR 9486: 2011) y Determinação do inchamento (ABNT NBR 9535: 1986). Para cada ensayo, el número de muestras fue de seis. Los ensayos se realizaron en el Campus Experimental de Itapeva – UNESP, de acuerdo con la metodología que se describe a continuación.

2.3.1. Ensayo de densidad [d] - ABNT NBR 9485: 2011

Para la determinación de la densidad, las probetas tomadas de lo tablero contrachapado de cada tipo de tratamiento tenían unas dimensiones de 100 x 50 x 12,0 mm. La densidad se encontró a través de la expresión (1):



$$\rho = \frac{m}{c \times l \times e} \quad (1)$$

Donde:

ρ - densidad, en g / cm³;
 m - masa de la probeta, en g;
 c - longitud promedio de la probeta, en cm;
 l - ancho promedio de la probeta, en cm;
 e - espesor promedio de la probeta, en cm.

2.3.2. Ensayo de contenido de humedad [u] - ABNT NBR 9484: 2011

Las dimensiones de las probetas para este procedimiento fueron iguales a las dimensiones de las probetas utilizadas para el procedimiento de masa aparente, ya que se requería que fueran al menos 10 g. El contenido de humedad se calculó mediante la siguiente expresión (2):

$$TU = \frac{mu - ms}{ms} \times 100 \quad (2)$$

Donde:

TU - contenido de humedad, en%;
 mu - masa húmeda, en g;
 ms - masa seca, en g.

2.3.3. Ensayo de absorción [A_m] - ABNT NBR 9486: 2011

Las dimensiones de las probetas producidas fueron 75 x 25 x 12,0 mm. Especificado por el estándar, las probetas tenían la longitud ortogonal a la dirección de las fibras de la chapa exterior.

Primero, se pesaron las probetas para determinar su masa inicial y luego se sumergieron en agua durante un período de 24 horas y se volvieron a pesar para determinar la masa final. Para calcular la absorción de agua de las muestras, se utilizó la siguiente expresión (3):

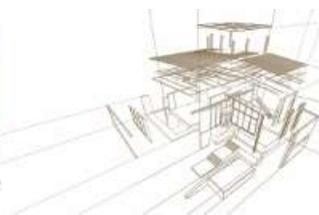
$$Ab = \frac{M_f - M_i}{M_i} \times 100 \quad (3)$$

Donde:

Ab - cantidad de agua absorbida, en%;
 M_f - masa final de la probeta, en g;
 M_i - masa inicial de la probeta, en g.

2.3.4. Ensayo de hinchamiento en espesor [G₁] - ABNT NBR 9535:1986

Para las probetas de hinchamiento de espesor se produjeron probetas con dimensiones de 60 x 10 x 12.0 mm. La longitud, según lo prescrito por la norma, se mecanizó



ortogonalmente a las fibras de madera y las piezas se lijaron para eliminar imperfecciones del corte.

Inicialmente, el espesor de las probetas se midió y dividió en dos series de tres, una serie, como lo indica la norma, es de control. Para la serie de control, las muestras se secaron al horno a una temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$, que al final de 24 horas en esta condición se midió nuevamente su espesor. Se colocaron otras tres muestras en agua y se sumergieron durante 24 horas, que al final de este período se midió su espesor (Figura 1). Las mismas muestras de este procedimiento fueron sometidas a estufa de $103 \pm 2^\circ\text{C}$, también por el mismo período de 24 horas. Al final de este período, se midieron nuevamente los espesores.

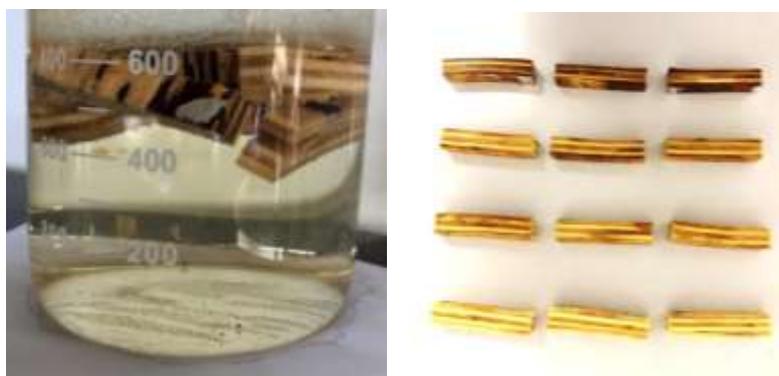


Figura 1 - Probetas en lo ensayo de hinchamiento en espesor.

Después fueron calculadas la recuperación del espesor por expresión (4) y la hinchazón más la recuperación del espesor por expresión (5):

$$R = \left(\frac{e_1 \times e_5}{e_2 \times e_3} \right) \times 100 \quad (4)$$

Donde:

R - recuperación de espesor, en%;

e1 - suma de lo espesor inicial de las probetas utilizadas en el control, en mm;

e2: suma de lo espesor de las probetas utilizadas en el control y secadas al horno, en mm;

e3 - suma de lo espesor inicial de las probetas antes de la inmersión en agua, en mm;

e5 - suma de lo espesor después de la inmersión en agua, en mm.

$$IR = \left(\frac{e_1 \times e_4}{e_2 \times e_3} - 1 \right) \times 100 \quad (5)$$

Donde:

IR - hinchazón más recuperación de espesor en%;

e4 - suma del espesor de las probetas después de la inmersión en agua y secar en estudio, en mm.



Finalmente, el porcentaje de hinchazón se calculó por la diferencia entre los valores obtenidos para la hinchazón más la recuperación del espesor (RI) y la recuperación del espesor (R).

2.4. Análisis estadística

A partir de los resultados obtenidos, el análisis de varianza (ANOVA) se realizó mediante la prueba de Tukey con un 5% de significación para todos los resultados de las pruebas realizadas. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el software R versión 3.4.2 (2016).

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La Tabla 1 muestra los valores de los ensayos físicos de densidad, contenido de humedad, absorción e hinchamiento del espesor después de la inmersión en agua durante 24 horas para tableros contrachapado con resina de poliuretano y láminas termo rectificado para cada temperatura de tratamiento.

Tabla 1 - Densidad, contenido de humedad, absorción e hinchazón en agua en función de los tratamientos térmicos aplicados.

Temperatura (°C)	d (g/cm ³)	U (%)	A _m (%)	G ₁ (%)
Control (0)	0,589 ^(0,019) a	6,67 ^(0,13) a	46,49 ^(1,16) a	4,73 ^(0,16) a
160	0,553 ^(0,007) a	6,22 ^(0,20) a	28,28 ^(2,05) b	4,66 ^(0,18) a
180	0,525 ^(0,012) a	5,76 ^(0,60) a	31,47 ^(1,59) b	4,43 ^(0,06) ab
200	0,563 ^(0,019) a	5,66 ^(0,24) a	32,03 ^(1,74) b	3,37 ^(0,14) b

* Las medias seguidas de la misma letra en la columna no difieren estadísticamente entre sí en la prueba de Tukey con una significancia del 5%. Desviación estándar entre paréntesis.

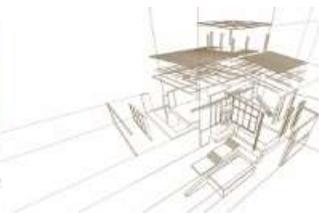
A continuación se presentan algunos comentarios sobre los resultados presentados.

3.1. Densidad

Los resultados mostraron que los tableros tratados térmicamente tenían baja pérdida de masa, lo que resultaba en un tablero de masa específico equivalente al control. Los valores obtenidos en este experimento para cada tratamiento se muestran gráficamente en la Figura 2.

La diferencia en los resultados para cada tipo de tratamiento se asoció principalmente con la heterogeneidad de las láminas, específicamente en relación con la variación en su espesor y constitución anatómica, que superpuso la termodegradación. La densidad de los tableros producidos en el trabajo varió de 0.469 a 0.705 g / cm³ utilizando maderas del mismo lote, una variación de más del 50%.

Benjamin (2002) explica que es común verificar esta variabilidad en la densidad de las piezas de madera tomadas del mismo lote e incluso del mismo árbol debido a sus



características anatómicas como proporción relativa entre madera juvenil y adulta, temprana y tardía, duramen y albura y el lugar de origen.

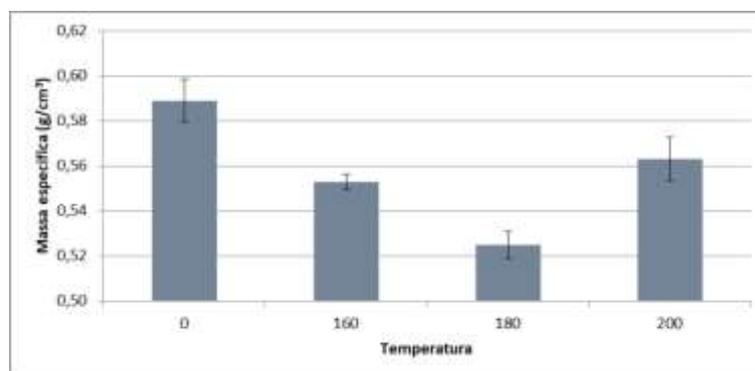


Figura 2. Valores medios de densidad para cada tratamiento.

Resultados similares fueron encontrados por Brito et al. (2006) donde se estudió la termorrectificación en madera de *Eucalipto grandis* a temperaturas de 120 ° C, 140 ° C, 160 ° C, 180 ° C y 200 ° C. En el estudio no se detectó ninguna influencia significativa del tratamiento sobre la densidad básica de la madera. Lo mismo ocurre en estudios realizados por Ferreira (2017) con el mismo tipo de material (contrachapado) y a las mismas temperaturas utilizadas, donde no se observó, así como este trabajo, influencia significativa del tratamiento térmico en la densidad de los tableros.

Por lo tanto, no se puede afirmar que el tratamiento térmico sea el único responsable del cambio en la densidad, ya que otros factores influyen más significativamente.

3.2. Contenido de humedad

Con respecto a la humedad de equilibrio higroscópico, aunque estadísticamente equivalente a los resultados, se observa una ligera reducción en los valores a medida que aumenta la temperatura, como se observa en la Figura 3.

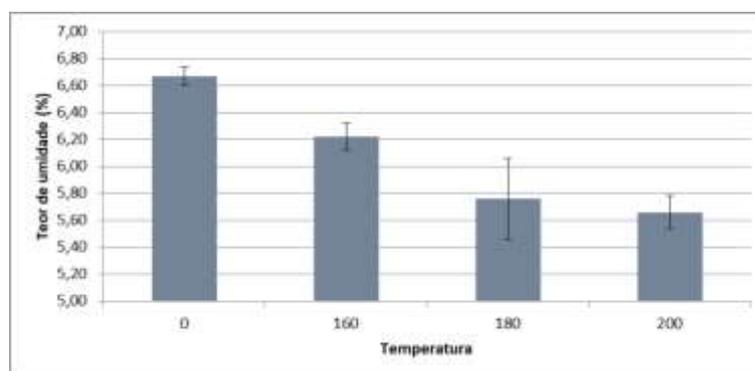
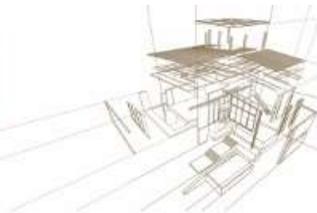


Figura 3. Valores medios de contenido de humedad para cada tratamiento.



La tendencia a la reducción de la humedad es consistente con los estudios realizados por Tjeerdsma y Militz (2005) e Yildiz, Gezer e Yildiz (2006) en el sentido de que la termorrectificación disminuye la humedad de equilibrio de la madera.

3.3. Absorción de agua

Los resultados mostraron cambios significativos en la absorción de agua para los tableros tratados térmicamente, como se muestra en la Figura 4, siendo que ninguno de los tableros tratados fue estadísticamente equivalente al control en la prueba de Tukey con una significancia del 5%.

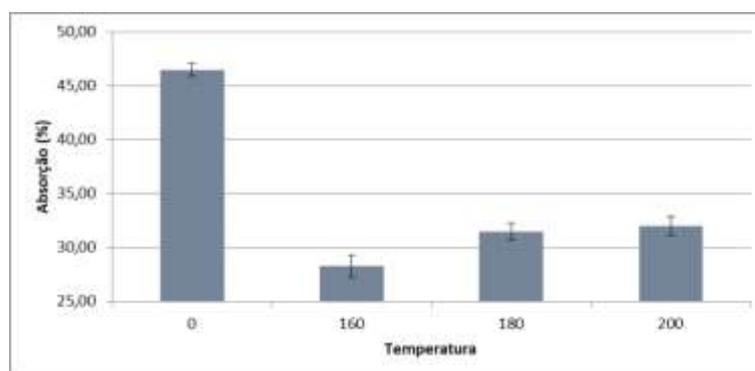


Figura 4. Valores medios de absorción de agua para cada tratamiento.

La reducción en la absorción de agua se explica por la característica hidrofóbica adquirida por la chapa del tratamiento térmico, que según Weiland y Guyonnet (2003) señalaron en sus estudios, la hemicelulosa, además de ser el componente más hidrofílico de la madera, también es el más térmicamente sensible, siendo el primer componente que se destruye en el rango de temperatura trabajado, lo que lleva a la desaparición de los sitios de adsorción de agua (principalmente grupos hidroxilo).

3.4. Hinchamiento en espesor

Los problemas de contracción e hinchazón pueden reducirse minimizando la capacidad de la madera para intercambiar agua con el medio. La Figura 5 representa gráficamente los valores de hinchamiento para los paneles tratados en comparación con el panel no tratado.

En general, se observó que la propiedad de hinchamiento del espesor de los paneles se redujo de acuerdo con el tratamiento térmico, porque como se muestra en la sección anterior, las muestras tratadas térmicamente alcanzaron una humedad de equilibrio con un contenido de humedad menor en comparación con el control, lo que evidencia pérdida higroscopicidad.

En comparación con el panel de control, las reducciones promedio en la hinchazón fueron aproximadamente: 10.15% para la temperatura de 160°C, 20.29% para la temperatura de 180°C y 46.89% para la temperatura de 200°C.

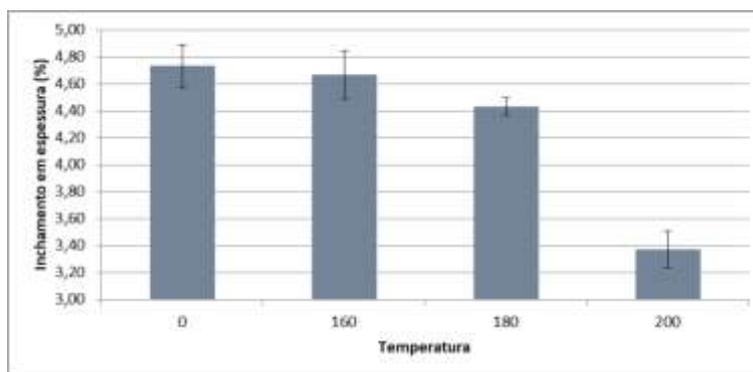


Figura 5. Valores medios de hinchazón de espesor para cada tratamiento.

La mejor estabilidad dimensional se obtuvo para los tratamientos en las temperaturas más altas, con el tablero producido con láminas termo rectificadas a 200 °C que difieren significativamente del panel de control.

Varios estudios relacionaron la higroscopicidad con el tratamiento térmico, entre los cuales podemos mencionar Brito et. al (2006), Esteves; Graça y Pereira (2008) y Kartal y Hwang e Imamura (2007), de modo que cuanto mayor es la temperatura del tratamiento térmico, menor es su capacidad de absorción de agua y, en consecuencia, menor es su variación dimensional.

La menor variación en la estabilidad dimensional de la pieza permite obtener un producto con mayor calidad y valor agregado, permitiendo su uso en situaciones previamente descartadas.

4. CONCLUSIONES

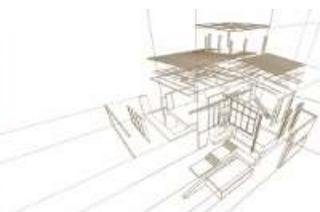
El estudio de contrachapados hechos de láminas tratadas térmicamente y resina de poliuretano a base de ricino fue interesante en vista de la comprensión de su rendimiento físico para su uso general.

Los resultados muestran que la termorrectificación de las láminas no produce un cambio significativo en la masa específica y el contenido de humedad, aunque en relación con este último sus valores parecen reducir a medida que aumenta la temperatura de termorrectificación.

La pérdida de higroscopicidad del tablero producido con láminas tratadas térmicamente permite un producto con mejor estabilidad dimensional, que absorbe menos agua, lo que lleva a la conclusión de que la termorrectificación es una alternativa viable para mejorar estas propiedades.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el CNPq (Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico), por el financiamiento al desarrollo del trabajo – Processo: 425102/2016-5. Los autores también están agradecidos por la donación de láminas por parte de la empresa Miraluz - Industria e Comercio de Madeiras Ltda., productora de tablero contrachapado en el municipio de Sengés/PR, Brasil.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araújo, S. O.; Vital, B. R.; Mendoza, Z. M. S. H.; Vieira, T. S.; Carneiro, A. C. O. (2012) Propriedades de madeiras termorretificadas de *Eucalyptus grandis* e SP. *Sci. For.*, Piracicaba, v. 40, n. 95, p. 327-336.
- Benjamim, C.A. (2002) Comparação entre três critérios de amostragem para a avaliação da densidade básica da madeira de florestas implantadas de eucaliptos. 2002. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Botucatu.
- Brito, J.O. et al (2006). Densidade básica e retrabilidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, submetida a diferentes temperaturas de termorretificação. *Cerne*, Lavras, v. 12, n. 2, p 182-188.
- Campos, C. I.; Morais, R. D. V.; Nascimento, M. (2009). Caracterização físico-mecânica de painéis de madeira compensada produzidos com *Pinus* sp. e resina poliuretana bi-componente. *Revista Madeira, Arquitetura & Engenharia*, São Carlos, ano 10, n.24, p. 37-50.
- Esteves, B.; Graça, J.; Pereira, H. (2008). Extractive composition and summative chemical analysis of thermally treated eucalypt wood. *Holzforschung*, v.62, p. 344–351.
- Ferreira, B. S.; Campos, C. I.; Rangel, E. C. (2018). Efeito da termorretificação na qualidade de colagem de lâminas de madeira para a produção de compensado. *Ciência Florestal*, [s.l.], v. 28, n. 1, p.274-282.
- Kartal, S.P.; Hwang, W.; Imamura, Y. (2007). Water absorption of boron-treated and heat-modified wood. *Journal Wood Science*, v.53, p.454–457.
- Poncsák, S. et al (2006). Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*). *Wood Science Technology*, v.40, p.647-663.
- Poubel, D. S.; Garcia, R. A.; Santos, W. A.; Oliveira, G. L.. Abreu, H. S. (2013). Efeito da termorretificação nas propriedades físicas e químicas da madeira de *Pinus carieba*. *Cerne*, v. 19, n. 3, p. 391–398.
- Sernek, M., Boonstra, M., Pizzi, A. Despres, A., and Gerardin, P. (2008). “Bonding performance of heat-treated wood with structural adhesives,” *Holz Roh-Werkst.* 66(3), 173-180.
- Tjeerdsma, B. F.; Boonstra, M.; Pizzi, A.; Tekely, P. Militz, H. (1998). Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement. *Holz als Roh- und Werkstoff*, v. 56, p. 149–153.
- Tjeerdsma, B. F.; P. Militz, H. (2005). Chemical changes in hydrothermal treated wood: ftir analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood. *Holzforschung*, v. 63, p. 102–111, 2005.
- Weiland, J. J.; Guyonnet, R (2003). Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy. *Holz als Roh- und Werkstoff*, v. 61, p. 216–220.
- Yildiz, S.; Gezer, E. D.; Yildiz, U. C. (2006). Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat. *Building and Environment*, v. 41, n. 12, p. 1762–1766.