

Recebido: 24-07-2017 Aceito: 14-12-2017 Publicado: 21-04-2018

Propiedades físicas y densitometría de rayos X en tableros de residuos de madera

Vinicius Peixoto Tinti¹, Fabricio Gomes Gonçalves^{2*}, Juarez Benigno Paes², Marina Donária Chaves Arantes³, Michel Cardoso Vieira⁴, Yonny Martinez López²

¹Departamento de Ciencias Forestales y de la Madera, Postgrado en Ciencias Forestales de la Universidad Federal del Espírito Santo, Jerônimo Monteiro - ES, Brasil.

²Departamento de Ciencias Forestales y de la Madera, Universidad Federal del Espírito Santo, Jerônimo Monteiro - ES, Brasil.

³Departamento de Ciencias Agrarias, Universidad Federal del São João Del-Rei, Sete Lagoas - MG, Brasil.

⁴Departamento de Productos Forestales, Universidad Federal Rural del Río de Janeiro, Seropédica - RJ, Brasil.

RESUMEN El objetivo fue evaluar las propiedades físicas y densitometría de rayos X en tableros aglomerados producidos a partir de residuos de aserraderos de eucalipto. En la producción de los tableros fue utilizado tanino comercial extraído de la corteza de *Acacia mearnsii* en modificación de 10% y 20% a los adhesivos químicos urea y fenol formaldehído. Los tableros evaluados presentaron las siguientes características: densidad nominal de 700 kg m⁻³, y relación de compresión de 1,25, en el proceso tecnológico fueron usados dos temperaturas (120 °C y 140 °C), la presión específica fue de 40 kgf cm⁻² por 8 minutos. La densidad aparente de los paneles osciló entre 437 a 602 kg m⁻³ clasificándolo de baja densidad (< 640 kg m⁻³). Los adhesivos utilizados como Fenol formaldehído y Tanino fenol formaldehído 90:10 a ambas temperaturas, mostraron resultados acordes con las normas internacionales para hinchamiento. Los valores máximos de absorción de agua durante 2 y 24 horas fueran obtenidos con Tanino fenol formaldehído a 80:20, seguido de Fenol formaldehído 90:10, Tanino urea formaldehído 80:20 y Tanino urea formaldehído 90:10. Se demostró que las partículas tienen alto contenido de extractivos y silicatos en la corteza, lo cual afectó la absorción de agua. Se encontró una fuerte correlación entre la densidad obtenida por densitometría de rayos X y por gravimetría ($R^2 = 79,45\%$, $p < 0,05$), lo que indica que la técnica de rayos X es adecuado para este tipo de estimación.

Palabras-clave: residuos de aserraderos; tableros de partículas; adhesivos; densitometría.

Physical properties and X-ray densitometry in particleboard of the eucalypt wood waste

ABSTRACT The objective was to evaluate the physical properties and densitometry of X-ray in particleboards produced from waste of sawmills eucalypt wood. In the production of panels was used commercial tannin extracted from the bark of *Acacia mearnsii* to 10% and 20% modification in the chemical adhesives urea and phenol formaldehyde. The evaluated panels had the following characteristics: nominal density of 700 kg m⁻³, and compression ratio of 1.25, in the technological process were used two temperatures (120 °C and 140 °C), the specific pressure was 40 kgf cm⁻² for a time of 8 minutes. The apparent density of the panels ranged from 437 to 602 kg m⁻³ classifying it as low density (<640 kg m⁻³). Adhesives used as Phenol formaldehyde and Tannin phenol formaldehyde 90:10 at both temperatures showed results consistent with international standards for swelling. The maximum values of water absorption for 2 and 24 hours were obtained with Tannin phenol formaldehyde at 80:20, followed by Phenol formaldehyde 90:10, Tannin urea formaldehyde 80:20 and Tannin urea formaldehyde 90:10. It was demonstrated that the particles have high content of extractives and silicates in the bark, which affected the absorption of water. A strong correlation was found between densities obtained by X-ray densitometry and gravimetry ($R^2 = 79.45\%$, $p < 0.05$), indicating that the X-ray technique is adequate for this type of estimation.

Keywords: sawmill residues; particleboard; adhesives; densitometry.

Introducción

Según Irle y Barbu (2010) el tablero aglomerado de partículas de madera se puede elaborar a partir de fragmentos de madera u otros materiales lignocelulósicos, como el bagazo de la caña de azúcar, paja de arroz y maíz, unidos con adhesivos sintéticos, naturales o mezclado, mediante prensado en caliente durante un tiempo suficiente para curar la resina.

Las maderas de alta densidad y coníferas son recursos renovables para la producción de pellets, donde la especie utilizada constituye una de las variables más importantes en el proceso de producción de tableros (Iwakiri et al. 2004). La obtención de madera aserrada en los aserraderos es inferior a 50%, lo que provoca que exista una cantidad considerable de residuos, por lo tanto, su uso como materia prima en el desarrollo de un producto diferenciado es de gran importancia, lo cual contribuye a nuevas oportunidades de mercado.

Los residuos surgen del proceso de producción o explotación, procesamiento o utilización de la madera. Los cuales, cuando no tienen un uso determinado terminan siendo abandonados en lugares donde entorpecen la continuidad de los procesos de transformación de la madera, y otros son expuestos al medio ambiente ocasionando su contaminación (Lima et al. 2008).

Según Vale y Gentil (2008) los residuos de los aserraderos se clasifican principalmente en tres tipos: el aserrín que se encuentra en la mayoría de las industrias de la madera (aserraderos), generados por el proceso de mecanizado con sierras; de la maquinaria empleada para el descortezado de la madera; y las maderas que son residuos más grandes, como los rodillos.

El adhesivo es un componente importante en la fabricación de productos a base de madera, con implicaciones técnicas y económicas significativas (PIZZI, 2003). Los adhesivos sintéticos son los más utilizados en la producción de tableros aglomerados, entre ellos la urea formaldehído y el fenol formaldehído. El primero es el preferido por las industrias en función del bajo costo y el menor tiempo de reacción en el

prensado en caliente, además de una línea de cola clara (MALONEY, 1977; ALBUQUERQUE et al., 2005).

La adición de taninos a los adhesivos sintéticos puede permitir una reducción de costos en la industria, pero debido a su elevado peso molecular (PIZZI, 2003) puede conferir una viscosidad elevada, inviabilizando la aplicación del adhesivo en algunas situaciones. En general, lo que se encuentra en la literatura es una adición de hasta proporciones que varían de 10 a 30% de taninos en adhesivos sintéticos, sin alterar significativamente las propiedades del pegamento (GONÇALVES et al., 2008; GONÇALVES; LELIS, 2009; SILVA et al., 2012).

Este trabajo tiene el objetivo principal de evaluar las propiedades físicas y densitometría de rayos X en tableros aglomerados homogéneos producidos a partir de residuos de la industria forestal y encolados con proporciones de adhesivos químicos modificados con tanino.

Materiales y Métodos

Materia prima

Para la producción de tableros aglomerados, se utilizó el tanino comercial (solución acuosa de tanino diluido a 50%) extraído de la corteza de *Acacia mearnsii* Willd, y urea formaldehído y fenol formaldehído como adhesivos químicos. El residuo lignocelulósico de aserradero se obtuvo en un aserradero ubicado en la región Caparaó, al sur del estado de Espírito Santo, siendo totalmente de *Eucalyptus* spp (madera y la corteza).

Preparación de los residuos

El residuo lignocelulósico fue colocado a secar al aire hasta alcanzar aproximadamente 15% de humedad. Después, se determinó el tamaño de partículas clasificado por un tamiz vibratorio mediante la malla cuyos orificios de apertura varían desde 4,0 mm hasta 2,0 mm. El residuo no sufrió ninguna fragmentación, y fue secado en un horno a 103 ± 2 °C hasta

5% de humedad, luego fue almacenado en bolsas de plástico selladas.

Caracterización química y física de los residuos de madera

Fueron analizados los residuos (cascarilla, corteza y partículas de madera) para el pH y la capacidad de taponamiento como se describe en Gonçalves; Lelis (2012), extractivos y cenizas. Para determinar el contenido de extractivos en los residuos, se utilizó el criterio de "Asociación Técnica de la Industria de la Pasta y el Papel" - TAPPI T 204 om-88.

El análisis de ceniza se realizó de acuerdo al método M-11 de la Técnica Brasileña de Pulpa y Papel (ABTCP, 1977). Se determinó la densidad básica de la madera a partir de muestras aleatorias obtenidas en el momento del corte en el aserradero, utilizando el método de inmersión en agua (VITAL, 1984).

Fabricación del tablero aglomerado

La mezcla de la materia prima se realizó mediante tambor giratorio con sistema de encoladera para la aplicación de adhesivo (10% en la partícula de masa seca), posteriormente fueron depositados en una caja para la formación (42,5 cm x 42,5 cm de ancho y largo) para dar forma al colchón de forma

cuadrado, luego colocado en la prensa en caliente, fue utilizado dos temperaturas (120 °C y 140 °C). La presión específica fue de 40 kgf cm⁻² durante un período de 8 minutos.

Los adhesivos utilizados fueron: 100% de Urea formaldehído (UF); 100% de Fenol formaldehído (FF); 100% de Tanino formaldehído (TF); 10% de tanino + 90% de urea formaldehído (TUF 90:10); 20% de tanino + 80% de Urea formaldehído (TUF 80:20); 10% de tanino + 90% de Fenol formaldehído (TFF 90:10); 20% de tanino +80% de Fenol-formaldehído (TFF 80:20). El tanino se diluyó en agua destilada al 50%. La Tabla 1 muestra las características de los adhesivos utilizados en el trabajo.

Fue ajustado las dimensiones finales del tablero, para cada adhesivo tres tableros fueron producidos con densidad nominal de 700 kg m⁻³, dimensiones de 42,5 cm x 42,5 cm x 1,25 cm (largo, ancho y espesor, respectivamente) y relación de compresión de 1,25. Luego del proceso de prensado y enfriado fueron almacenados bajo una humedad relativa de 65 ± 5% y una temperatura de 20 ± 2 °C hasta masa constante teniendo en cuenta la norma brasileña - NBR 14810-3 de la Asociación Brasileña de Normas técnicas - ABNT (2006).

El ensayo de densitometría de rayos X

Los cuerpos de prueba de los tableros aglomerados se dispusieron dentro de un porta muestras (capacidad para 12

Tabla 1. Valores de pH, viscosidad y contenido de sólidos de los adhesivos utilizados.

Table 1. Values of pH, viscosity and solids content of the adhesives used.

Adesivo	pH	Viscosidad (cP)	Contenido de sólidos (%)
Urea formaldeído (UF 100%)	8,26	1.200,00	70,50
Fenol formaldeído (FF 100%)	13,77	616,20	52,89
Tanino formaldeído (TF 100%)	3,52	580,00	46,51
Tanino Urea Formaldehido (TUF 90:10)	5,14	1.024,10	61,31
Tanino Urea Formaldehido (TUF 80:20)	4,20	1.490,88	60,37
Tanino Fenol Formaldehido (TFF 90:10)	12,84	1.375,27	49,39
Tanino Fenol Formaldehido (TFF 80:20)	12,28	6.739,00	50,93

muestras) y acoplados en compartimento interno blindado del equipamiento micro densitómetro de rayos X (Figura 1).



Figura 1. Aspecto general de los tableros aglomerados no puerta-muestra producidos para la obtención del perfil de densidad el equipo densitómetro de rayos X.

Figure 1. Particleboard at the sample holder for obtainment of density profile in the densitometer X-ray equipment.

El equipamiento de rayos X fue calibrado para el escaneamiento (lectura) continuo de espesura de los cuerpos de prueba por el haz de luz de rayos X. Este haz de luz incidio sobre la muestra del tablero aglomerado (largo de 50 mm), una parte de esta radiación fue atenuada, la cual atravesó el tablero y posibilitó ser analizada por el detector del cristal, esto permitió la detección y cuantificación de la densidad automáticamente por el software del equipamiento.

La velocidad de escaneamiento del software, para la lectura de densidad aparente, fue en intervalos de 40 μm en sentido longitudinal de los cuerpos de prueba, considerando la espesura del mismo. Los valores obtenidos de densidad aparente (densidad media, densidad máxima y densidad mínima) de los cuerpos de prueba fueron analizados por el software Quintek Measurement Systems – QMS (QMS, 2012).

Análisis estadístico

El análisis estadístico fue realizado mediante un diseño completamente al azar en un esquema factorial (7x2), la temperatura en dos niveles y el adhesivo en siete niveles. La

prueba de Tukey ($p < 0,05$) fue utilizada para la comparación de medias en las propiedades físicas de los tableros.

Para en el ensayo de densitometría de rayos X se utilizó el análisis de regresión lineal. Las densidades medias máxima y media mínima fueron estudiadas en relación a la densidad aparente media del tablero. Fue utilizado el modelo $Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i$ en que Y_i es la densidad aparente media del tablero (kg m^{-3}) y X_i β_0 es la densidad media mínima o la densidad media máxima.

Se aplicó la prueba de Pearson para evaluar la correlación lineal entre la densidad media de los tableros aglomerados obtenidas por densitometría de rayos X y la densidad aparente, con el fin de explicar la correlación entre los dos parámetros evaluados para esta propiedad física.

Resultados y Discusión

Propiedades químicas y físicas del residuo

La comparación entre el tiempo y el método de extracción infiere que hay poca diferencia numérica de pH entre el agua caliente y fría para las partículas con corteza (0,40); madera (0,49) y la corteza (0,69) (Tabla 2).

Según Albuquerque et al. (2005) las maderas con pH más ácido son adecuadas para la unión con adhesivo de urea formaldehído, una vez que tiene carácter ácido en comparación con el fenol-formaldehído. Teodoro; Lelis (2003) en un estudio de *Eucalipto pellita* de 14 y 15 años encontraron un valor promedio de 3,79 de pH, este valor fue menor en el presente estudio. Resultados significativos de pH (5,66 para agua a temperatura ambiente - 24 horas y 5,57 para agua caliente - 20 min) fueron encontrados por Gonçalves et al. (2017b) con la madera de *Acacia mangium*. Esto muestra que la materia prima (especies forestales) usada en esta investigación fue heterogénea, y pueden estar dada por el uso de espe-

cies diferentes, además de las condiciones edafoclimáticas diferentes en que los árboles se desarrollaron. Según Marra (1992) el pH presente en la madera puede interferir en la cura del adhesivo pudiendo promover el endurecimiento de la resina y por lo tanto la calidad del tablero producido.

Trugilho et al. (2012) tuvo un valor promedio de 6,71% para el contenido de extractivos de aserrín de *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus saligna*, bajo de la madera en este estudio (7,18%) (Tabla 3). Así como Teodoro; Lelis (2003) que encontraron un valor promedio de extractivos de 4,22% en la corteza de *Eucalypto pellita* de edades entre 14 a 15 años, una cifra muy inferior a la obtenida con el material estudiado. La diferencia en el contenido de extractivos se explica por la heterogeneidad del material utilizado, con maderas de diferentes especies, edades, y la influencia de los diferentes suelos, sitio, espaciado y condiciones climáticas.

Según Trugilho et al. (2003) el contenido en cenizas oscila de 0,2 a 1% de la masa seca de madera. En este estudio, las

partículas con corteza y madera (0,47 y 0,22%, respectivamente) están en correspondencia con lo citado por el autor. Sin embargo, la presencia de silicato en la corteza (2,11%) fue alta, lo que puede interrumpir negativamente en el proceso de adhesión entre el sustrato y el adhesivo, lo cual puede afectar a las características de pH y la trabajabilidad del tablero. Pero esto fue mitigado por la utilización de madera y corteza conjuntamente, aunque no sabiendo la proporción utilizada de corteza.

Densidad aparente de los tableros

La densidad de la madera utilizada fue de 560 kg m⁻³. Los valores promedios de pH se encontraron entre 4,20 (madera); 4,96 (corteza), lo que indica que este residuo tiene un carácter ácido (Tabla 2). La densidad aparente de los paneles osciló entre 436,99 kg m⁻³ a 602 kg m⁻³, los tableros se clasifican de baja densidad (< 640 kg m⁻³), de acuerdo con "American Na-

Tabla 2. Valores promedios de pH y capacidad tampón ácido para los materiales estudiados mediante el método de extracción empleado.

Table 2. Mean values of pH and acid buffer capacity for the materials studied using the extraction method used.

Método y tiempo de extracción	Material	pH	Capacidad Tampón Ácido (mmol NaOH 5g ⁻¹)
Agua fría – 24 horas	Corteza	4,96	0,0903
Agua caliente – 20 min		4,27	0,1819
Agua fría – 24 horas	Partículas con corteza	4,86	0,0340
Agua caliente – 20 min		4,46	0,0695
Agua fría – 24 horas	Madera	4,20	0,0422
Agua caliente – 20 min		4,69	0,0622

Tabla 3. Valores promedios de contenido de cenizas y extractivos de los materiales estudiados.

Table 3. Average values of ash and extractive content of the materials studied.

Residuo	Contenido de ceniza (%)	Contenido de Extractivos (%)
Corteza	2,11	10,09
Partículas con corteza	0,47	5,73
Madera	0,22	7,18

tional Standards Institute" - ANSI-208.1 (1999) (Tabla 4). La densidad es un parámetro importante para los aspectos de evaluación de las propiedades físicas de los tableros, ya que puede influir de manera significativa en sus propiedades.

Propiedades físicas de los tableros

Los valores promedios de hinchamiento después de la inmersión en agua durante 2 y 24 horas oscilaron desde 20,63% hasta 36,32% y 19,25% a 38,52%, respectivamente (Tabla 5). La norma "Standard Commercial" - CS 236-66 (1968) prevé el hinchamiento de 30% (2 y 24 horas) para los tableros de baja densidad.

Después de 2 horas de remojo sólo tres adhesivos a 120 °C (Tanino Formaldehído, Tanino Urea Formaldehído 80:20 y

Tanino Fenol Formaldehído 80:20) y 140 °C (Tanino Fenol Formaldehído 80:20) se comportaron fuera de los parámetros estipulados por la norma CS 236-66 (1968). Para la inmersión de 24 horas fueron cuatro adhesivos a 120 °C (Urea Formaldehído, Tanino Formaldehído, Tanino Urea Formaldehído 80:20, Tanino Urea Formaldehído 90:10 y Tanino Fenol Formaldehído 80:20) y el adhesivo a 140 °C (Tanino Fenol Formaldehído 80:20) que no se encuadraron.

Las resinas con Fenol Formaldehído y Tanino Fenol Formaldehído 90:10 a ambas temperaturas, obtuvieron resultados según lo determinado por el estándar CS 236-66 (1968). El resultado más expresivo se encontró en el Tanino Fenol Formaldehído 80:20, el cual no alcanzó el nivel requerido para las temperaturas evaluadas, así como el adhesivo con el

Tabla 4. Valores promedios de la densidad aparente de los tableros producidos.

Table 4. Mean values of bulk density of the particleboards produced.

Adhesivo	Densidad aparente (kg m ⁻³) para cada temperatura (°C)	
	120	140
UF 100%	602,00 aA*	466,08 bB
FF 100%	582,89 abA	537,75 aB
TF 100%	598,79 aA	538,80 aB
TUF 90:10	568,48 bA	535,17 aB
TUF 80:20	586,90 aA	473,70 bB
TFF 90:10	480,08 bB	561,98 aA
TFF 80:20	436,99 cB	468,61 bA

*Promedios seguidos por la misma letra, minúscula en la vertical, y mayúscula en la horizontal, no difieren estadísticamente ($p > 0,05$) para el teste de Tukey.

Tabla 5. Valores hinchazón espesor promedio (IE) en los tableros.

Table 5. Mean swelling values (IE) in the particleboards.

Adhesivo	IE 2 h (%) / Temperatura (°C)		IE 24 h (%) / Temperatura (°C)	
	120	140	120	140
UF 100%	24,60 bcA	24,49 bA	30,17 bA	26,36 abA
FF 100%	22,94 bcA'	23,10 bA	26,51 bcA	24,62 abA
TF 100%	36,32 aA	27,63 bB	33,29 abA	19,25 cB
TUF 90:10	26,08 abA	22,20 bA	30,41 bA	24,95 abB
TUF 80:20	30,76 aA	26,57 bA	36,03 aA	28,98 aB
TFF 90:10	20,63 cA	23,71 bA	22,11 dA	26,08 abA
TFF 80:20	35,56 aA	31,38 aA	38,52 aA	32,66 aA

*Promedios seguidos por la misma letra, minúscula en la vertical, y mayúscula en la horizontal (para las respectivas propiedades), no difieren estadísticamente ($p > 0,05$) para el teste de Tukey.

100% de Tanino Formaldehído, solo a temperatura de 140 °C y después de 2 y 24 horas de inmersión correspondió a dicha norma. Posiblemente enlaces químicos necesarios para formar la cohesión entre el fenol y el tanino fueron perjudicados, habiendo así una incompatibilidad de pH. La hinchazón en espesor 2 y 24hs - TF 100%, presentó mejor eficiencia a la temperatura de 140°C, con reducciones de 23,92% y 42,17% respectivamente. Indicando ser la temperatura favorable en la solidificación de las moléculas de tanino, tornadas más estables. En otros adhesivos puros no hubo diferencias, además de valores inferiores en la mayor temperatura.

Se destaca que la utilización de parafina podría reducir los valores de hinchazón espesor (Gonçalves et al. 2008), pero no se aplicó a las partículas.

Se observa en el Tabla 5 que el adhesivo Tanino Formaldehído 100% tiene IE más bajas para 24 horas que para 2 horas, esto puede estar dado a que los especímenes fueron desfragmentados al final de la prueba, tornándose menor en comparación a 2 horas. El mismo se pasó para absorción de agua en esta muestra (Tabla 6).

Los valores promedio de absorción de agua después de la inmersión de 2 y 24 horas (Tabla 6) fueran mayores que según los reportados por Gonçalves et al. (2017b). La adición de tanino a los adhesivos puros proporcionó aumentos significati-

vos en la absorción de agua (2 y 24 hs de inmersión). Considerando que el tanino añadido proporcionó aumentos en la absorción de agua, debido a sus propiedades higroscópicas.

Un factor que puede explicar el hinchamiento para algunos adhesivos es la relación de compresión, que en este caso fue de 1,25. Según Kollmann et al. (1975) considera que el rango ideal debe estar entre 1,3 y 1,6 para definir esta razón el grado de densificación del tablero. Por tanto, una baja relación de compresión da como resultado un panel con más espacios vacíos y facilitando así la penetración de agua.

En este sentido hay el trabajo de Gonçalves et al. (2017b) en que se trabajaron diferentes motivos de compactación y adhesivos. Los autores afirmaron que cuantos mayores las razones de compactación, menores fueron las absorciones de agua, en la mayoría de los adhesivos probados.

Debido a la presencia de corteza en las partículas la absorción de agua fue notable, ya que interfiere con la adhesión entre el sustrato y el adhesivo, proporcionando más huecos dentro del panel, lo que facilita la absorción de agua. Según estudios realizados por Melo et al. (2010) evaluaron la calidad del tablero de partículas mediante diferentes proporciones de madera de *Eucalyptus grandis* y cáscara de arroz, obtuvo que al aumentar el porcentaje corteza en los paneles dieron valores más altos de absorción de agua.

Tabla 6. Valores promedios de la absorción de agua (AA) nos tableros.

Table 6. Average values of water absorption (AA) in the particleboards.

Adhesivo	AA 2 h (%) / Temperatura (°C)		AA 24 h (%) / Temperatura (°C)	
	120	140	120	140
UF 100%	74,42 dB*	128,80 bA	97,78 dB	147,79 bA
FF 100%	96,36 cA	105,96 cA	104,59 cdB	117,04 cdA
TF 100%	102,34 cA	109,39 cA	99,18 dA	81,54 eB
TUF 90:10	97,66 cA	95,87 dA	111,09 cdB	120,17 cA
TUF 80:20	103,64 cB	143,38 aA	119,86 cB	157,99 abA
TFF 90:10	121,19 bA	91,87 dB	138,07 bA	108,46 dB
TFF 80:20	159,75 aA	149,71 aA	171,57 aA	160,99 aB

*Promedios seguidos por la misma letra, minúscula en la vertical, y mayúscula en la horizontal (para las respectivas propiedades), no difieren estadísticamente ($p > 0,05$) para el teste de Tukey.

Estimación de la densidad por densitometría de rayos X

El análisis de regresión lineal indicó una relación entre los promedios de la densidad máxima y mínima, obtenidas por la densitometría de rayos X, teniendo en cuenta el valor promedio de 168 especímenes de tableros de partículas (Tabla 7), el test ($p < 0,01$ por la prueba de t) mostró que la densidad máxima media global del modelo de regresión explica 93,78%

y en general significa una densidad mínima de 68,29% de la variación total de la densidad, por lo que este se explica por la máxima media.

Los valores medios para el perfil de densidad aparente al largo de espesor en los tableros aglomerados están representados en la Figura 2, en la cual se muestran además, los adhesivos (14) usados a partir de las diferentes temperaturas testadas.

Tabla 7. Ecuaciones estimadas para la densidad media aparente en función de los promedios máximos y mínimos para los adhesivos probados.

Table 7. Estimated equations for apparent mean density as a function of the maximum and minimum averages for the tested adhesives.

Adhesivo	Densidad Máxima (kg m^{-3})		Densidad Mínima (kg m^{-3})	
Temperatura 120°C	Ecuación estimada	R ²	Ecuación estimada	R ²
UF	$\hat{D}_M = 28,7812 + 1,0324^{**} D_{M\text{áx}}\#$	0,8565	$\hat{D}_M = 317,1723 + 0,1570^{\text{ns}} D_{M\text{in}}$	0,5773
FF	$\hat{D}_M = -121,9590 + 1,3131^{**} D_{M\text{áx}}$	0,9741	$\hat{D}_M = 165,1875 + 0,5338^{**} D_{M\text{in}}$	0,8369
TF	$\hat{D}_M = -279,4386 + 1,6877^{**} D_{M\text{áx}}$	0,8481	$\hat{D}_M = 329,9407 + 0,0182^{\text{ns}} D_{M\text{in}}$	0,0509
TUF 90:10	$\hat{D}_M = 22,2191 + 1,0481^{**} D_{M\text{áx}}$	0,9949	$\hat{D}_M = -46,8183 + 0,9252^{**} D_{M\text{in}}$	0,9708
TUF 80:20	$\hat{D}_M = 72,1424 + 0,9625^{**} D_{M\text{áx}}$	0,7589	$\hat{D}_M = 44,3630 + 0,5572^{\text{ns}} D_{M\text{in}}$	0,1842
TFF 90:10	$\hat{D}_M = -106,1510 + 1,3338^{**} D_{M\text{áx}}$	0,9062	$\hat{D}_M = 388,9981 + 0,0260^{\text{ns}} D_{M\text{in}}$	0,0820
TFF 80:20	$\hat{D}_M = 290,8510 + 0,5007^{\text{ns}} D_{M\text{áx}}$	0,5499	$\hat{D}_M = 170,1350 + 0,3019^{\text{ns}} D_{M\text{in}}$	0,1785
Temperatura 140°C	Ecuación estimada	R ²	Ecuación estimada	R ²
UF	$\hat{D}_M = 140,7490 + 0,8159^{**} D_{M\text{áx}}$	0,8171	$\hat{D}_M = 252,7350 + 0,1271^{\text{ns}} D_{M\text{in}}$	0,0651
FF	$\hat{D}_M = 74,7628 + 0,9632^{**} D_{M\text{áx}}$	0,8738	$\hat{D}_M = -49,8359 + 0,9325^{**} D_{M\text{in}}$	0,8762
TF	$\hat{D}_M = 48,3259 + 1,0132^{**} D_{M\text{áx}}$	0,9950	$\hat{D}_M = -27,7205 + 0,8711^{**} D_{M\text{in}}$	0,9644
TUF 90:10	$\hat{D}_M = 37,5686 + 1,0164^{**} D_{M\text{áx}}$	0,9784	$\hat{D}_M = -15,5197 + 0,8825^{**} D_{M\text{in}}$	0,9340
TUF 80:20	$\hat{D}_M = 51,3876 + 1,0201^{**} D_{M\text{áx}}$	0,9827	$\hat{D}_M = -6,7545 + 0,7449^{**} D_{M\text{in}}$	0,5869
TFF 90:10	$\hat{D}_M = 58,2225 + 0,9749^{**} D_{M\text{áx}}$	0,8585	$\hat{D}_M = 181,7196 + 0,5456^{\text{ns}} D_{M\text{in}}$	0,2473
TFF 80:20	$\hat{D}_M = 114,3011 + 0,9274^{**} D_{M\text{áx}}$	0,7299	$\hat{D}_M = 338,6165 - 0,0687^{\text{ns}} D_{M\text{in}}$	0,0847
General	$\hat{D}_M = 85,7445 + 0,9366^{**} D_{M\text{áx}}$	0,9378	$\hat{D}_M = -176,7497 + 1,1341^{**} D_{M\text{in}}$	0,6829

\hat{D}_M = Densidad promedio estimada (kg m^{-3}); $D_{M\text{áx}}$ = Densidad promedio de las Máximas (kg m^{-3}); $D_{M\text{in}}$ = Densidad promedio de las Mínimas (kg m^{-3}); ** Significativo ($p < 0,01$). ns - No significativo ($p > 0,01$).

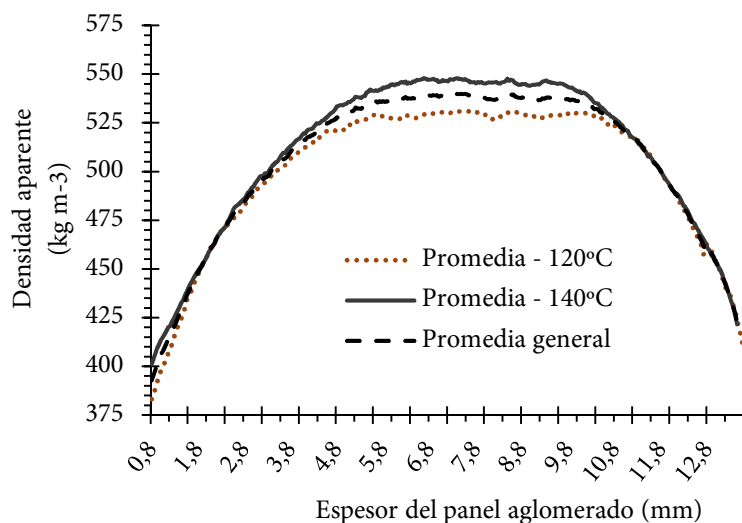


Figura 2. Promedia de los perfiles de densidad aparente del espesor de los tableros aglomerados para las temperaturas estudiadas.

Figure 2. Mean of the apparent density profile along the thickness of the particleboard for two temperatures evaluated.

La evaluación de los valores del perfil de densidad aparente al largo de espesura determinado por el método de densitometría de rayos X, mostró que existe una equivalencia entre los tableros, indicando una homogeneidad. Los tableros no presentaron el perfil “M” característico. Este perfil representa aquellos tableros con densidad más elevadas en los extremos y menor en el centro, lo cual no permite una homogeneidad en esos tableros, esto puede ocurrir en la prensa en caliente durante el proceso de producción, lo cual afecta todas las propiedades físicas y mecánicas del producto final (XU, 1999; WONG et al., 2000).

En este trabajo fue observado lo contrario, dado que la densidad obtenida en los extremos del tablero fue menor, mientras que en el centro fue mayor, lo cual indica un comportamiento “U” invertido. Según Chen et al. (2010) citan que las variaciones ocurridas en el perfil de densidad pueden estar asociadas a la mala manipulación durante la formación del colchón, así como a una deficiente proyección de encolado de las partículas.

Otro factor que puede influir en los perfiles de densidad de los tableros es el origen de las partículas, debido que son residuos de aserraderos, los cuales pueden presentar algunas

impurezas como corteza y otras partículas de geometrías diversas dado que son obtenidas en los diversos procesos de transformación de la madera.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos a partir del perfil de densitometría de rayos X, el diagrama de dispersión obtenido muestra los valores promedios de la densidad aparente de los tableros aglomerados obtenidos por densitometría de rayos X y la densidad aparente de los tableros (Figura 3). El diagrama indica que existe una correlación significativa entre los dos puntos finales, expresados por coeficiente de determinación (R^2) del 79,45% ($p < 0,05$). Un comportamiento similar se encontró por Wang et al. (2006) e Gonçalves et al. (2017), este último encontró una correlación superior ($R^2 = 99,94\%$, $p < 0,05$), donde se analizaron los valores promedios de densidad aparente de los tableros aglomerados de partículas de madera obtenidos por densitometría de rayos X y por gravimetría, entre las formas de obtención de la densidad.

Conclusiones

La absorción de agua se vio afectada negativamente debido a la presencia de altos contenidos de sílica y extractivos.

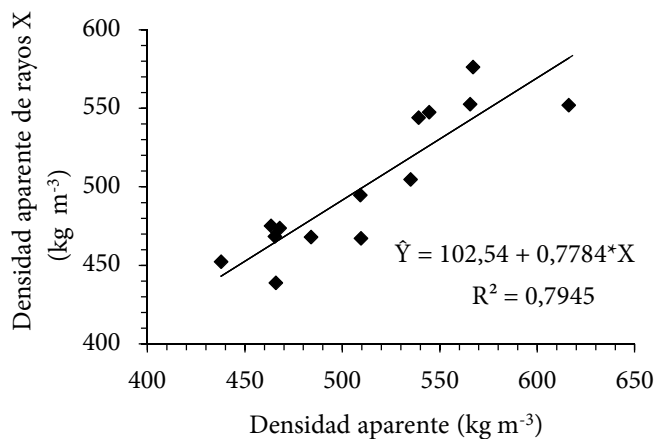


Figura 3. Correlación entre las densidades aparente del tablero aglomerado y obtenido por densitometría de rayos X.

Figure 3. Correlation between the apparent densities of the agglomerated board and obtained by X-ray densitometry.

Los valores máximos de absorción de agua durante 2 y 24 horas fueron obtenidos con Tanino Fenol formaldehído a 80:20, seguido de Fenol formaldehído 90:10, Tanino Urea formaldehído 80:20 y Tanino Urea formaldehído 90:10, dados a la presencia de altos contenidos de silicatos y extractivos en la madera.

La combinación del tanino comercial extraído de la corteza de *Acacia mearnsii* en modificación de 10% y 20% a los adhesivos químicos urea y fenol formaldehído mostró los mejores resultados para el hinchamiento de los tableros después de 2 horas, en relación a la norma "Standard Commercial" - CS 236-66 (1968) para tableros aglomerados.

Se encontró una fuerte correlación entre la densidad media aparente y la densidad máxima media obtenidas por densitometría de rayos X y por gravimetría, explicada en más de 79%, lo que indica que esta técnica puede constituir una herramienta importante para este tipo de estimación.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Fundación de Amparo a la Investigación e Innovación del Espírito Santo – FAPES (Brasil)

para la concesión de una beca de investigación del primer autor; la empresa Seta S/A (Estância Velha, RS, Brasil), productor y exportador de tanino; la empresa Momentive Químicos de Brasil Ltda. (Curitiba, Brasil) por la donación de la urea formaldehído y fenol-formaldehído adhesivo; y la empresa Santa Rita (Dores do Rio Preto, ES, Brasil) para el suministro de aserrín utilizado.

Referencias

- ALBUQUERQUE, C. E. C.; IWAKIRI, S.; KEINERT JUNIOR, S. Adesão e Adesivos. In: Iwakiri, S. (Coord.). PAINEIS DE MADEIRA RECONSTITUÍDA. Curitiba: FUPEF, p. 1-30 p. 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14810-3**: Chapas de madeira aglomerada – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 32 p. 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL – ABTCP. **M-11/77**: Cinzas em madeira. São Paulo: ABTCP. 1977.
- CHEN, S.; LIU, W.; FANG, L.; WELLWOOD, R. Digital X-ray analysis of density distribution characteristics of wood-based panels. **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 44, p. 85-93, 2010.
- GONÇALVES, F. G.; LELIS, R. C. C. Propriedades de duas resinas sintéticas após adição de tanino modificado. **Floresta e Ambiente**, v. 16, n. 2, p. 01-07, 2009.
- GONÇALVES, F. G.; LELIS, R. C. C. Caracterização Tecnológica da Madeira de *Acacia mangium* Willd em Plantio Consorciado com Eucalipto. **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 3, p. 286-295, 2012. Doi: dx.doi.org/10.4322/loram.2012.034
- GONÇALVES, F. G.; LELIS, R. C. C.; CARVALHO, A. M.; TOMAZELLO FILHO, M. Densitometria de raios x na avaliação da densidade em painéis de partículas. **Revista Ciência Florestal**, no prelo. 2017.
- GONÇALVES, F. G.; LELIS, R. C. C.; OLIVEIRA, J. T. S. Influência da composição da resina tanino-uréia-formaldeído nas propriedades físicas e mecânicas de chapas aglomeradas. **Revista Árvore**, v. 32, n. 4, p. 715-722, 2008.

- GONÇALVES, F. G.; LELIS, R. C. C.; OLIVEIRA, J. T. S.; GARCIA, R. A.; BRITO, E. O. Chapas aglomeradas confeccionadas com uréia-formaldeído sob adição de tanino em pó. **Revista Ciência Florestal**, v. 27, n. 4, p. 1349-1363, 2017b.
- IRLE, M.; BARBU, M. C. Wood-Based Panel Technology. In: WOOD-BASED PANELS. Thoemen, H.; Mark, I.; Milan, S. (Ed.). Chapter 1. p. 1-94. London: Brunel University Press. 2010.
- IWAKIRI, S.; SHIMIZU, J.; SILVA, J. C.; MENEZZI, C. H.; PUEHRINGHER, C. A.; VENSON, I.; LARROCA, C. Produção de painéis de madeira aglomerada de *Grevillea robusta* A. Cunn. ex R. Br.. **Revista Árvore**, v. 28, n. 6, p. 883-887. 2004. Doi: 10.1590/S0100-67622004000600013
- KOLLMANN, F. F. P.; KUENZL, E. W.; STAMM, A. J. Principles of wood Science and Technology: wood based materials. Berlin: Springer-Verlog, 1975. v. 2, 703p.
- LIMA, T. J.; SILVA, R. J.; VIEIRA, R. S. Aproveitamento de resíduos gerados no processamento da madeira de eucalipto. In: Oliveira, J. T. S.; Fiedler, N. C.; Nogueira, M. (Coord.). TECNOLOGIAS APLICADAS AO SETOR MADEIREIRO III. Jerônimo Monteiro: Suprema, 255-290 p. 2008.
- MALONEY, T. M. **Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing**. San Francisco: M. Freeman, 1977. 689 p.
- MARRA, A. A. **Technology of Wood Bonding: principles in practice**. New York: Van Nostrand Reinhold. 1992.
- MELO, R. R.; SANTINI, E. J.; PAES, J. B.; GARLET, A.; STANGERLIN, D.; MENEZZI, C. H. S. Resistência de painéis aglomerados confeccionados com madeira de *Eucalyptus grandis* e diferentes adesivos a fungos e cupins xilófagos. **Cerne**, v. 16, n. 5, p. 82-89. 2010.
- PIZZI, A. Natural Phenolic Adhesives I: Tannin. In: PIZZI, A.; MITTAL, K. L. (Ed.). **Handbook of Adhesive Technology**. 2nd Edition, New York: Marcel Dekker, 2003.
- QUINTEK MEASUREMENT SYSTEMS (QMS). Density profiler model QDP-01X. **User's guide**. Knoxville, TN. 73p., 2012.
- SILVA, B. C.; VIEIRA, M. C.; OLIVEIRA, G. L.; GONÇALVES, F. G.; RODRIGUES, N. D.; LELIS, R. C. C.; IWAKIRI, S. Qualidade de compensados fabricados com adesivos à base de tanino-formaldeído de *Pinus oocarpa* e fenol-formaldeído. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 19, n. 4, p. 511-519, 2012.
- TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY – TAPPI. **T-204 om-88**: Solvent extractives of wood and pulp. Atlanta: TAPPI Press. 1996.
- TEODORO, A. S.; LELIS, R. C. C. Extração de taninos da casca de *Eucalyptus pellita* e avaliação de suas propriedades. **Rev. Univ. Rural**, Série Ciências da Vida, Seropédica: EDUR, v. 23, n. 2, p. 65-70, 2003.
- TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MORI, F. A. Correlação canônica das características químicas e físicas da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, v. 9, n. 1, p. 66-80. 2003.
- VALE A. T.; GENTIL, L. V. Produção e uso energético de biomassa e resíduos agroflorestais. In: Oliveira, J. T. S.; Fiedler, N. C.; Nogueira, M. (Coord.). TECNOLOGIAS APLICADAS AO SETOR MADEIREIRO III. Jerônimo Monteiro: Suprema, 125-158 p. 2008.
- VITAL, B. R. Métodos de determinação da densidade da madeira. Boletim Técnico. Viçosa: SIF. 1984.
- WANG X.; A. SALENIKOVICH, M.; MOHAMMAD, L. J. HU. Evaluation of density distribution in wood-based panels using X-ray scanning. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD, 14. University of Applied Sciences, Germany, Eberswalde, Published by Shaker Verlag (ISBN 3-8322-3949-9). 2006.
- WONG, E. D.; ZHANG, M.; HAN, G.; KAWAI, S.; WANG, Q. Formation of the density profile and its effects on the properties of fiberboard. **Journal Wood Science**, Berlin, v. 46, p. 202-209, 2000.
- XU, W. Influence of vertical density distribution on bending modulus of elasticity of wood composite panels: a theoretical consideration. **Wood Fiber Science**, New York, v. 31, n. 3, p. 277-282, 1999.