

Avaliação de propriedades físico-mecânicas e espectroscopia no infravermelho próximo de três espécies florestais

Henrique Römer Schulz¹, Andrey Pereira Acosta¹, Ezequiel Gallio¹, Mário Antônio Pinto da Silva Júnior², Kelvin Techera Barbosa², Patrícia Soares Bilhalva dos Santos³

¹ Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – Universidade Federal de Pelotas – Pelotas – RS.
e-mail: henriqueschulz09@hotmail.com; andreysvp@gmail.com; egeng.florestal@gmail.com; darcigatto@yahoo.com.

² Curso de Engenharia Industrial Madeireira – Universidade Federal de Pelotas – Pelotas – RS.
e-mail: mariosilva.eng@gmail.com.

³ Laboratório de Química da Biomassa Florestal -Curso de Engenharia Florestal– Universidade Federal de Universidade Federal do Pará – Altamira – PA. E-mail: patriciasbs@ufpa.br

Resumo: O objetivo deste trabalho foi de avaliar a massa específica aparente a 12 % ($\rho_{12\%}$), flexão estática (módulo de elasticidade – Moe e módulo de ruptura – Mor), dureza Janka ($\sigma_{\text{Máx}}$) e espectroscopia no infravermelho próximo (Nir), das madeiras de *Corymbia maculata*, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus tereticornis*, por meio de técnicas normatizadas. Observou-se uma diferença significativa baseado na análise estatística com 5 % de probabilidade de erro. Em que a espécie A espécie de *Corymbia citriodora* obteve um destaque quando comparada as demais espécies para os parâmetros de flexão estática e para as demais caracterizações avaliadas a espécie de *Eucalyptus tereticornis*. Em relação ao Nir foi possível identificar as bandas características dos constituintes químicos da madeira e avaliar a variação dos mesmos quando relacionados as três espécies. Sendo assim, é necessário a caracterização das propriedades tecnológicas para destinar a finalidade correta para as diferentes espécies florestais.

Palavras-chave: *Eucalyptus*, Flexão estática, Dureza Janka, Nir.

Evaluation of physical-mechanical properties and spectroscopy in the near red infrase of three forest species

Abstract: The objective of this work was to evaluate the apparent specific mass at 12% ($\rho_{12\%}$), static flexure (modulus of elasticity - Moe and modulus of rupture - Mor), Janka hardness (σ_{Max}) and near infrared spectroscopy (Nir) of the woods of *Corymbia maculata*, *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus tereticornis*, by means of standardized techniques. A significant difference was observed based on the statistical analysis with 5 % probability of error. In that the species *Corymbia citriodora* obtained a prominence when compared the other species for the parameters of static flexion and for the other characterizations evaluated the species of *Eucalyptus tereticornis*. In relation to the Nir, it was possible to identify the characteristic bands of the chemical constituents of the wood and to evaluate the variation of the same when related to the three species. Therefore, it is necessary to characterize the technological properties to destine the correct purpose for the different forest species.

Keywords: *Eucalyptus*, Static bending, Hardness Janka, Nir.

1. INTRODUÇÃO

A madeira é um material heterogêneo que apresenta variações em suas propriedades, sendo elas, físicas, mecânicas, químicas, térmicas. É empregada em diversos segmentos industriais madeireiros. Segundo (Batista et al., 2010 e Schulz et al., 2019), as espécies de reflorestamentos

principalmente do gênero *Eucalyptus*, possuem destaque, pois são utilizadas em construção civil, madeira serrada, celulose e papel, fazendo-se necessária a análise de suas propriedades tecnológicas.

Os conhecimentos de tais propriedades tecnológicas, fornecem informações importantes para as diversas fases de processamento industrial, bem como para a utilização do produto final. Conforme Trevisan et al. (2012), é de grande importância o conhecimento das variações ocorridas na massa específica no sentido base-topo de uma árvore. Madeiras com altos valores de Moe indicam alta elasticidade e com elevado valor de Mor, alta resistência. O ensaio de dureza é um dos testes mecânicos frequentemente utilizados em empresas, universidades e centros de pesquisa, pois está diretamente relacionado com a resistência do material.

A espectroscopia no infravermelho próximo (Nir), caracteriza vibrações moleculares em diferentes comprimentos de onda, o que se associam a diferentes tipos de ligações. Segundo Hwang et al. (2016), a técnica do NIR possui vantagens, quando comparada a outras técnicas. Pesquisas com vêm se destacando e tendo uma maior utilização, por não necessitar a preparação das amostras, por sua rapidez, sem ter influência do operador e sem uso de reagentes químicos.

Com isso o objetivo deste estudo foi avaliar as propriedades tecnológicas, massa específica aparente a 12 % ($\rho_{12\%}$), flexão estática (módulo de elasticidade – Moe e módulo de ruptura – Mor), dureza Janka ($\sigma_{M\acute{a}x}$) e espectroscopia no infravermelho próximo (Nir), das madeiras de *Corymbia maculata*, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus tereticornis*.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O material foi fornecido por uma empresa parceira e outra parte pelo Laboratório de Propriedades Físicas e Mecânicas da madeira, do curso de Engenharia Industrial Madeireira-UFPel, onde ocorreu as análises das propriedades tecnológicas. Foram utilizadas tábuas das espécies de *Corymbia maculata*, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus tereticornis*, com idade aproximada de 22 anos, confeccionando-se 18 corpos de prova (6 por espécie para cada teste tecnológico) com dimensões de 2 cm no tangencial, 2 cm no radial e 33 cm no longitudinal. Após confeccionados, os corpos de prova ficaram acondicionados em sala climatizada (temperatura de 20 °C e 65 % de umidade relativa) até massa constante.

A massa específica aparente ao teor de umidade de 12 % ($\rho_{12\%}$) (Equação 1), foi determinada seguindo as recomendações das normas ASTM D 2395 (2017), sendo as dimensões determinadas com auxílio de paquímetro digital (0,01 mm) e as massas obtidas com balança

analítica (0,001 g).

Equação (1)

Em que: $\rho_{12\%}$, $M_{12\%}$ e $V_{12\%}$ – massa específica aparente ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), massa (g) e volume (cm^3) ao teor de umidade de 12 %;

Os testes de flexão estática e dureza Janka da madeira foram realizados seguindo as recomendações da normativa D 143 descrita pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM), utilizando uma máquina universal de ensaios (Emic), com capacidade de carga de 300 kN. Para a dureza Janka, o teste foi verificado, através do esforço (em MPa) necessário para introduzir uma semiesfera de aço com $1,13 \text{ cm}^2$ de diâmetro, obtendo-se a tensão máxima ($\sigma_{\text{Máx}}$) nos planos tangencial e radial para cada corpo de prova. O teste de flexão estática da madeira foi realizado, através da aplicação de uma força no centro da amostra que estava bi apoiada, deste teste foram obtidos a módulo de ruptura (M_{or}) e módulo de elasticidade (M_{oe}). O ensaio foi conduzido com velocidade de 1,3 mm/min e a célula de carga que possui capacidade para 3 toneladas, sendo o vão 14 vezes o eixo anatômico radial.

Posteriormente, os corpos de prova foram moídos em um moinho do tipo willey, peneirados em peneiras de 45 e 60 mesh, os espectros de NIR foram obtidos para cada amostra individualmente utilizando triplicatas em um equipamento FEMTO NIR 900. A coleta dos dados ocorreu por meio de 64 varreduras, com resolução de 1 nm entre os comprimentos de onda 1100 nm a 2500 nm, utilizando reflectância.

3. RESULTADOS

Os parâmetros de massa específica aparente a 12 % ($\rho_{12\%}$), flexão estática e dureza Janka das três espécies estudadas, são apresentados na Tabela 1. Nota-se que houve diferença estatística significativa para as propriedades, excetuando-se a tensão máxima no plano radial. A espécie de *Corymbia citriodora* obteve um destaque quando comparada as demais espécies para os parâmetros de flexão estática e para as demais caracterizações avaliadas a espécie de *Eucalyptus tereticornis*.

Tabela 1. Valores médios de massa específica aparente a 12 % ($\rho_{12\%}$), Flexão estática (M_{or} e M_{oe}) e dureza Janka ($\sigma_{\text{Máx}}$) nos planos tangencial e radial.

Espécies	$\rho_{12\%}$	Flexão estática		Dureza Janka	
		Mor	Moe	$\sigma_{\text{Máx}}$ Tang	$\sigma_{\text{Máx}}$ Rad

<i>Corymbia</i>	0,84 B ^(0,04)	147,18 C ^(12,69)	18880,40 B ^(1719,82)	49,51 A ^(5,30)	36,60 A ^(4,02)
<i>Eucalyptus grandis</i>	0,65 A ^(0,04)	102,71 B ^(10,72)	10980,60 A ^(285,93)	44,40 A ^(5,57)	39,58 A ^(1,54)
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	0,91 C ^(0,04)	76,11 A ^(28,71)	9187,82 A ^(3542,53)	63,44 B ^(4,93)	41,87 A ^(6,64)
Teste F	67,90 *	21,10 *	25,89 *	18,51 *	1,77

Em que: valores entre parênteses e sobrescritos apresentam o desvio padrão e médias seguidas por mesma letra não diferem significativamente em 5 % de probabilidade de erro pelo teste de Tukey e teste F; * – significativo à 5 % de probabilidade de erro pelo teste F ($p \leq 0,05$); $\rho_{12\%}$ - unidade $g \cdot cm^{-3}$; Mor, Moe, $\sigma_{Máx}$ Tang, $\sigma_{Máx}$ Rad – unidade Mpa.

A análise dos espectros de NIR é representada na Figura 1, onde os espectros característicos das três espécies florestais analisadas no presente estudo, são avaliados no comprimento de onda entre 1000 nm^{-1} a 2600 nm^{-1} . Pode se constatar que houve intensidade distintas em diferentes comprimentos de onda, tais bandas estão relacionadas com determinadas ligações químicas que estão diretamente ligados com os constituintes químicos da madeira. Comprimentos de onda de 1100 nm^{-1} a 1200 nm^{-1} , estão associados a (lignina), de 1350 nm^{-1} a 1500 nm^{-1} (celulose, hemicelulose e lignina), de 1650 nm^{-1} a 1750 nm^{-1} (água e lignina), de 1850 nm^{-1} a 1950 nm^{-1} (hemicelulose e lignina), de 2050 nm^{-1} a 2150 nm^{-1} (celulose, extrativos e lignina), de 1250 nm^{-1} a 2350 nm^{-1} (água e lignina).

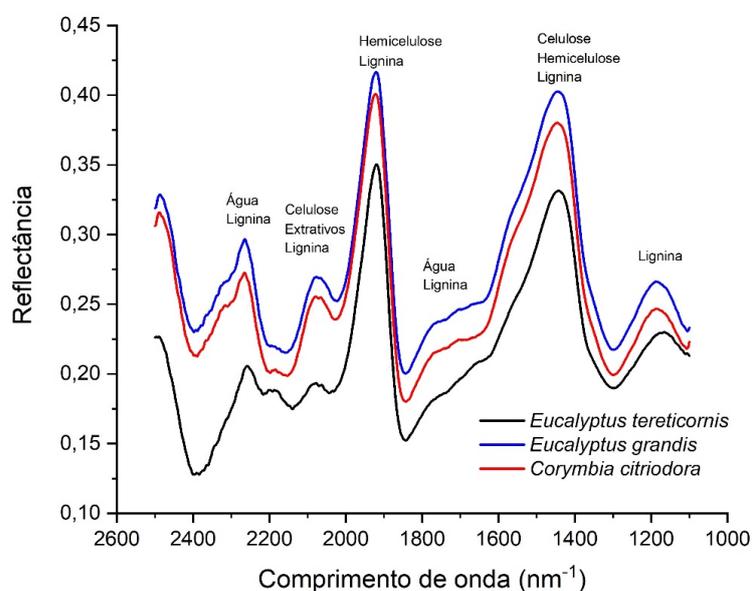


Figura 1. Espectros do infravermelho próximo (Nir).

4. DISCUSSÃO

As madeiras de *Corymbia maculata*, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus tereticornis*, possuem uma $\rho_{12\%}$ de 0,84 g.cm⁻³, 0,65 g.cm⁻³ e 0,91 g.cm⁻³, sucessivamente, sendo que a espécie de *Eucalyptus tereticornis* apresentou um valor médio superior de 40 % quando comparado ao *Eucalyptus grandis*, que apresentou o menor valor médio. A espécie de *Corymbia citriodora*, apresentou uma superioridade de 93,94 % e 105,50 % quando comparado ao *Eucalyptus grandis*, para o Mor e Moe, respectivamente. Para a $\sigma_{M\acute{a}x}$ Tang a espécie que mostrou os maiores valores foi o *Eucalyptus tereticornis*, para a $\sigma_{M\acute{a}x}$ Rad não houve diferença significativa.

Segundo (Batista et al., 2010 e Trevisan et al., 2012), constataam valores próximos aos parâmetros tecnológicos avaliados nesse estudo. Melo et al. (2013) afirma que as propriedades mecânicas e físicas, possuem correlações significativas, o que ficou evidenciado nesse estudo.

Para o NIR as maiores variações entre as espécies foram evidenciadas em destaque nas bandas de 1700 nm⁻¹. Hein et al. (2009), constata que nas bandas de 1700 nm⁻¹ podem ser interpretados como a lignina. Já a faixa de reflectância atribuída a OH em água e CH em CH₃ e CH₂ (2300 nm⁻¹) mostraram notórias diferenças entre as espécies sendo o *Eucalyptus tereticornis* o que demonstrou menor valor para reflectância, caracterizando esta espécie como possuindo menor frequência de ligações OH, CH, CH₃ E CH₂. Do contrário a espécie de *Eucalyptus grandis* demonstrando maior valor para reflectância neste comprimento de onda, o que lhe caracteriza como uma espécie com muita frequência destes tipos de ligações.

Segundo Carneiro et al. (2010), a região em 2100 nm⁻¹ correspondendo ao alongamento O-H do constituinte químico celulose, as diferenças entre as espécies analisadas nessa banda, estão ligadas a massa específica, o que se evidencia é um pico mais constante para a espécie de *Corymbia maculata*, o que faz relação com sua elevada densidade.

Hein et al. (2009) ao estudar as propriedades químicas da madeira de *Eucalyptus urophylla* por meio de NIR, observou seus maiores picos em 1600 nm⁻¹ e 2300 nm⁻¹, valores próximos aos observados no presente estudo para maiores diferenças entre os picos das três espécies analisadas, estes valores se diferem entre espécies pelo fato de que apesar de serem madeiras de folhosas estas possuem muitas diferenças em suas composições químicas, o que faz referência também em sua diferença nas propriedades mecânicas.

Estas diferenças espectrais resultantes do NIR, podem ser usadas para auxiliar a descrever as características mecânicas e físicas de madeira, facilitando assim, em questões como diferenciação, identificação e aplicação destas.

5. CONCLUSÕES

Pode concluir-se com a realização deste trabalho que:

- Analisando as propriedades mecânicas a espécie de *Corymbia citriodora* obteve um destaque quando comparada as demais espécies para os parâmetros de flexão estática. Para a dureza Janka e $\rho_{12\%}$, a espécie de *Eucalyptus tereticornis*. Sendo assim, é necessário a caracterização das propriedades tecnológicas para destinar a finalidade correta para as diferentes espécies florestais.
- Em relação ao NIR, demonstrou ser uma ferramenta de ótimo uso para diferenciação entre as ligações químicas dos constituintes majoritários da madeira, evidenciando suas diferenças espectrais, podendo assim ser utilizado para diferenciar espécies quanto suas propriedades físicas e mecânicas.

6. REFERÊNCIAS

American Society for Testing and Materials. ASTM D 143-1994: standard test methods for small clear specimens of timber. Annual Book of ASTM Standard. West Conshohocken, PA, 2014.

American Society for Testing and Materials. ASTM D2395-17: standard test methods for density and specific gravity (relative density) of wood and wood-based materials. Annual book of ASTM standards. West Conshohocken, PA, 2017.

Batista DC, Klitzke RJ, Santos CVT. Densidade básica e retratibilidade da madeira de clones de três espécies *Eucalyptus*. *Ciência Florestal* 2010, 20 (4): 665-674.

Carneiro ME, Magalhães WLE, Muniz GIB, Schimleck LR. Near infrared spectroscopy and chemometrics for predicting specific gravity and flexural modulus of elasticity of *Pinus spp.* veneers. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 2010, 18 (6): 481-489.

Hein PRG, Lima JT, Chaix G. Effects of sample preparation on NIR spectroscopic estimation of chemical properties of *Eucalyptus urophylla* ST Blake wood. *Holzforschung* 2010, 64 (1): 45-54.

Hwang SW, Horikawa Y, Lee W, Sugiyama J. Identification of *Pinus* species related to historic architecture in Korea using NIR chemometric approaches. *Journal of Wood Science* 2016, 62 (2): 156-167.

Melo RR, Araldi DB, Stangerlin DM, Müller MT, Gatto DA. Uso das características tecnológicas da madeira para o agrupamento de espécies florestais, *Nativa* 2013, 1 (1): 1-7.

Schulz HR, Barbosa KT, Acosta AP, Cardoso GV. Caracterização de propriedades tecnológicas de papéis de fibra virgem e reciclada após refinamento. *BIOFIX Scientific Journal* 2019, 4 (2): 160-165.

TREVISAN, R.; DENARDI, L.; HASELEIN, C. R.; GATTO, D. A. Efeito do desbaste e variação longitudinal da massa específica básica da madeira de *Eucalyptus grandis*. *Scientia Forestalis*, v.40,

