

PREDIÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DAS MADEIRAS DE EUCALIPTO E PINUS POR MEIO DO INFRAVERMELHO PRÓXIMO

Patrícia Gomes Ribeiro, Eng. Ftal, MSc., Prof. da UNIFIMES – Mineiros/GO,
doutoranda do PPG/EFL/UNB/Brasília/DF/Brasil, ribeiropg@unb.br, Universidade
de Brasília;

Joaquim Carlos Gonzalez, Eng. Ftal, Prof. Dr., Brasília/DF/Brasil,
goncalvez@unb.br, Universidade de Brasília;

Tereza Cristina Monteiro Pastore, Bacharel em Química, Dr^a., Brasília/DF/Brasil,,
tereza.pastore@ibama.gov.br, LPF/SFB/IBAMA;

Jez Willian Batista Braga, Bacharel em Química, Prof. Dr., Brasília/DF/Brasil,,
jez@unb.br, Universidade de Brasília.

RESUMO

Na atual conjuntura econômica a indústria madeireira tem cada vez mais buscado a excelência e a qualidade de seus produtos. O conhecimento prévio das propriedades da madeira, de forma rápida e eficiente, permite determinar o seu uso adequado. O objetivo do trabalho foi a caracterização tecnológica das madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* Var. *hondurensis* por meio de espectroscopia no infravermelho próximo (*Near infrared spectroscopy* – *NIRS*). A pesquisa foi desenvolvida na Universidade de Brasília (UnB), em conjunto com o Laboratório de Produtos Florestais – LPF/SFB/IBAMA/DF. Os espectros de reflectância foram obtidos em um espectrofotômetro *IR* com transformada de Fourier (FT-NIRS), com dispositivo de reflectância difusa EasyDiff da marca Pike, e foram submetidos à análise multivariada pelo método dos Mínimos Quadrados Parciais (PLS) e à validação cruzada para a obtenção da curva de calibração e correlação com as propriedades físicas e mecânicas. Na análise por *NIRS*, observou-se que podem ser utilizadas quaisquer das faces da madeira (tangencial ou radial), entretanto a face tangencial representa melhor os resultados. Concluiu-se que as espécies podem ser separadas em grupos de coníferas e folhosas, por suas características distintas, e suas propriedades físicas e mecânicas podem ser preditas com o uso do NIR sendo as propriedades de maiores destaques a densidade, o MOE e o MOR.

Palavras-chave: madeira, propriedades, infravermelho próximo.

1. INTRODUÇÃO

Dada a diversidade das espécies florestais madeireiras e a grande variação nas suas características (físicas, mecânicas, cor, grã, resistência ao apodrecimento, odor), a madeira torna-se uma matéria-prima de múltiplas utilizações.

No mercado o uso a ser dado à tora de madeira e em que produtos esta deve ser transformada (madeira serrada, laminados, dormentes, postes, moirões, estacas, aglomerados, celulose, carvão, lenha, dentre outros) é definido pela demanda e a oferta. As empresas buscam tecnologias inovadoras para dar qualidade aos seus produtos e eficiência, gerando competitividade. O desenvolvimento de novas tecnologias, bem como o aprimoramento de técnicas já conhecidas é o modo mais eficiente de melhorar a qualidade dos produtos fabricados pela indústria florestal e consequentemente utilizar de forma racional o potencial madeireiro que o Brasil disponibiliza.

Para melhorar a qualidade dos produtos, maximizar o uso da matéria prima e reduzir os problemas do processo produtivo é necessário um conhecimento prévio e mais preciso das propriedades da madeira a ser utilizada. O desenvolvimento de metodologia eficiente, rápida e “não destrutiva” contribui para alcançar esses objetivos.

Dentro desse contexto, as técnicas não destrutivas apresentam vantagens em relação aos métodos convencionais, pois é possível analisar um grande volume de material com maior rapidez e precisão, o material pode ser utilizado posteriormente, e se torna versátil para se enquadrar numa rotina de linha de produção.

Segundo Ross et al. (1998) a avaliação não destrutiva é uma técnica de identificação das propriedades de um determinado material para verificar a existência ou não de descontinuidades ou defeitos, realizada com a utilização de ensaios não destrutivos, sem alterar suas características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais e sem interferir em seu uso posterior.

Dentre estas técnicas enquadram-se à avaliação visual (colorimetria), testes químicos (infravermelho próximo), técnicas de emissão acústica, vibração (ondas de tensão), emissão ultrassônica, raios-x, dentre outras.

O emprego da espectroscopia de reflectância no infravermelho teve início na década de 60, quando Hart et al. (1962) desenvolveram um método para determinar a umidade em sementes baseada em análise espectrofotométrica no infravermelho próximo (*NIRS*). Watson (1977) cita a utilização do *NIRS* para a análise de produtos agrícolas.

O espectro do infravermelho é dividido em infravermelho próximo, médio e distante. A região espectral do infravermelho próximo compreende radiação com comprimentos de onda no intervalo de aproximadamente 800 a 2500 nm (SKOOG et al., 2002).

A técnica envolve a aquisição de um espectro de absorvância/reflectância depois que a radiação de NIRS penetra em uma amostra. A reflectância da luz para cada comprimento de onda é medida com um espectrofotômetro sendo utilizada para o cálculo da absorção. A energia absorvida pelo material é correlacionada com a propriedade desejada (NISGOSKI, 2005).

O espectro de absorção obtido dá informação sobre as moléculas ou grupos moleculares envolvidos (SO et al., 2004), sendo comparado com medidas obtidas usando técnicas analíticas convencionais como a análise multivariada, entretanto sua interpretação é difícil, pois contém um alto número de bandas de fortes sobreposições.

No Brasil, o uso do *NIRS*, para a área florestal, iniciou-se com o trabalho de Nisgoski (2005), que avaliou propriedades da madeira e do papel de *Pinus taeda* e têm sido amplamente adotadas na pesquisa científica (Barcellos, 2007; Ribeiro, 2009; Costa 2009; Pastore et al., 2011).

O objetivo do trabalho foi a caracterização tecnológica das madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* Var. *hondurensis* por meio de espectroscopia no infravermelho próximo (*Near infrared spectroscopy – NIRS*).

2. METODOLOGIA

A pesquisa foi desenvolvida na Universidade de Brasília, em conjunto com o Laboratório de Produtos Florestais – LPF/SFB (Serviço Florestal Brasileiro).

Neste estudo foram utilizadas madeiras de *Pinus caribaea* Var. *hondurensis* e *Eucalyptus grandis*. As amostras foram analisadas com lupa e obtiveram confirmação de especialista. Foram confeccionados 45 corpos-de-prova nas dimensões de 2 x 2 x 45 cm, utilizados em ensaio não destrutivo (*NIRS*) e convencionais (densidade e flexão estática).

Os corpos-de-prova foram acondicionados em câmara climatizada a $65 \pm 1\%$ de umidade e $20 \pm 3^\circ\text{C}$, para estabilização da umidade a 12%, conforme a norma da Comissão Panamericana de Normas Técnicas (COPANT) 459 (1972).

Para o ensaio de *NIRS* foram confeccionados três amostras de cada material, nas dimensões de 2 x 2 x 1 cm, com exposição da face (transversal, radial e tangencial), obtidos a partir dos corpos-de-prova utilizados no ensaio convencional de densidade e retratibilidade. Os corpos-de-prova foram submetidos a acabamento com lixa de papel nº 80, para retirar marcas do instrumento de corte e o brilho da madeira, deixando a superfície áspera, para com isso aumentar a reflectância difusa e diminuir a reflectância especular.

Os espectros de reflectância foram obtidos por meio de um espectrofotômetro no infravermelho próximo com transformada de Fourier (FT-*NIRS*), marca Bruker, modelo Tensor 37, com dispositivo de reflectância difusa EasyDiff da marca Pike.

Foram tomados 5 espectros por amostra de madeira (em cada face exposta, escolhida para a medição): um em cada extremidade e um no centro do corpo de

prova. Para cada amostra foram efetuadas 320 leituras (*scans*), sendo 64 leituras (*scans*) por espectro. Para adquirir um espectro o valor médio das 64 leituras foi comparado à referência.

Os espectros obtidos nos ensaios de *NIRS* foram submetidos à análise multivariada pelo método dos Mínimos Quadrados Parciais (PLS) e submetidos à validação cruzada para a obtenção da curva de calibração e correlação das propriedades físicas e mecânicas.

Os corpos-de-prova das espécies em estudo foram submetidos a ensaios convencionais de densidade básica, retratibilidade e flexão estática (COPANT 461/72, 462/71 e 006/72, respectivamente).

Os resultados obtidos nos ensaios convencionais foram submetidos à análise estatística descritiva: cálculo de média, mínimo, máximo e desvio padrão. Foram empregados a análise de variância (ANOVA), e teste de Tukey com significâncias a 1 e 5 % de probabilidade.

Os resultados obtidos nos ensaios convencionais foram correlacionados com os resultados dos ensaios não destrutivos. As correlações foram determinadas pelo método de correlação de Pearson a 1 e 5 %.

Foram calculadas regressões para ajustes de equações estimando valores de propriedades físicas e mecânicas das madeiras em estudo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A face tangencial das madeiras de *Pinus* e *Eucalyptus* é a que melhor prediz os valores de densidade básica, tanto calibração quanto na validação cruzada.

Para a madeira de *Eucalyptus* foi feita a calibração de um modelo com dois fatores; utilizando a técnica do PLS obteve-se coeficiente de determinação (R^2) de 0,64 para a calibração e 0,50 para a validação cruzada. Schimleck et al. (2001) em trabalho com *Eucalyptus delegatensis* obtiveram um R^2 de 0,9 para a densidade, utilizando PLS da segunda derivada dos espectros.

Para a madeira de *Pinus* a calibração do modelo foi feita com cinco fatores; utilizando a técnica do PLS obteve-se R^2 de 0,95 para a calibração e 0,75 para a validação cruzada. Nisgoski (2005) analisando a densidade de *Pinus taeda*, envolvendo a variação base-altura das árvores em duas idades (10 e 17 anos), efetuando a calibração e a validação de um modelo, com nove fatores, por meio de PLS obteve R^2 de 0, e 0,78 respectivamente.

A calibração e validação referente à densidade básica das madeiras em estudo não se apresentaram muito satisfatórias, o que pode ter sido causado pela mínima diferença existente nos valores de densidade básica observada entre as amostras utilizadas no estudo, podendo ser melhorada com a utilização de um número maior de amostras e que possuam um intervalo de valores de densidade básica mais contrastante.

Ao analisar a reprodutibilidade volumétrica por *NIRS*, observou-se que para a madeira de *Eucalyptus* o modelo pode ser validado tanto pela face tangencial quanto pela face radial, enquanto que para a madeira de *Pinus* apenas pela face tangencial.

Para a madeira de *Eucalyptus*, observa-se que ao efetuar a calibração de um modelo, com dois fatores, utilizando a técnica do PLS para a face tangencial obteve-se R^2 de 0,83 para a calibração e 0,37 para a validação cruzada. Da mesma forma para a face radial, obteve-se R^2 de 0,74 e 0,47 para calibração e validação cruzada, respectivamente.

A madeira de *Pinus* (face tangencial), na calibração do modelo, obteve R^2 de 0,69 para a calibração e 0,49 para a validação cruzada, com dois fatores.

A predição do coeficiente de anisotropia das madeiras de *Eucalyptus* e *Pinus* não foram satisfatórias. Conseguiu-se montar um modelo de calibração, mas não se conseguiu uma validação aceitável para esse modelo.

A melhor face para a predição do módulo de elasticidade (MOE) para ambas as madeiras, *Eucalyptus* e *Pinus*, é a tangencial. A face transversal para as duas madeiras não permite a validação, permite somente a construção do modelo de calibração.

A face tangencial do *Eucalyptus* permitiu uma calibração para o modelo com seis fatores, R^2 de 0,99 para a calibração e de 0,23 para a validação cruzada.

A face tangencial do *Pinus* permitiu uma calibração para o modelo com seis fatores, R^2 de 0,99 para a calibração e de 0,88 para a validação cruzada. A face radial permitiu uma calibração para o modelo também com seis fatores, R^2 de 0,99 para a calibração e de 0,70 para a validação cruzada.

Os resultados encontrados para o módulo de elasticidade conferem com os encontrados na literatura. Kelley et al. (2004) num estudo com madeira seca de *poplar* encontrou R^2 de 0,75, enquanto Rials et al. (2002) caracterizando painéis de MDF encontraram um R^2 de 0,80.

Na predição do MOR por meio do *NIRS* observa-se que os coeficientes de determinação foram baixos considerando um número pequeno de fatores, e nem sempre foi possível a validação do modelo.

Ao submeter as faces da madeira de *Eucalyptus* aos ensaios de *NIRS*, notou-se que para a face tangencial, é possível montar um modelo de calibração com R^2 de 0,52 utilizando três fatores, pela técnica do PLS. As faces transversal e radial permitiram calibrações para o modelo com quatro fatores e coeficientes de determinação acima de 0,80

Analisando os espectros *NIRS* para as faces de *Pinus*, observou-se, que as faces tangencial e radial permitiram a construção de um modelo de calibração com sete fatores com R^2 de 0,99. Para a face transversal, a calibração e a validação apresentaram R^2 de 0,99 e 0,50 respectivamente.

Os resultados encontrados para o módulo de ruptura conferem com os reportados na literatura. Kelley et al. (2004) num estudo com madeira de diferentes espécies de *Southern pine* encontrou coeficiente de correlação de 0,86. Rials et al. (2002) caracterizando painéis de MDF por meio de *NIRS* encontrou um coeficiente de determinação de 0,82. Segundo Schimleck et al. (2005) estimando o MOE e o MOR do *Pinus taeda* usando o *NIRS* com amostras de lenho juvenil e tardio obtiveram boas calibrações, com R² de 0,77 (MOE, face radial) e 0,86 (MOR, face transversal).

Observou-se que ao predizer as propriedades de densidade, retratibilidade volumétrica, MOE e MOR para as espécies por meio do *NIRS*, a face que melhor apresentou resultados foi a face tangencial, embora outras literaturas contradigam essa afirmação, considerando a face radial da madeira, a face mais ilustrativa (SCHIMLECK et al. (2006); HEIN, 2008).

4. CONCLUSÃO

A técnica de análise não destrutiva por meio de infravermelho próximo pode ser considerada alternativa a caracterização das madeiras de *Pinus caribaea* Var. *hondurensis* e *Eucalyptus grandis*.

A técnica permite separar espécies em grupos de coníferas e folhosas, pelas características distintas, e predizer suas propriedades físicas e mecânicas.

A face que melhor ilustra a predição das propriedades físicas (densidade e retratibilidade volumétrica) e mecânicas (MOE e MOR) para as madeiras de *Pinus caribaea* Var. *hondurensis* e *Eucalyptus grandis*, por meio do *NIRS*, é a face tangencial. E as propriedades que obtiveram melhores respostas à técnica foram: a densidade, o MOE e o MOR.

A técnica mostrou-se muito eficaz do ponto de vista econômico e prático, já que não exige preparo elaborado de amostras e nem utiliza reagentes químicos, além de depender da experiência do operador.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARCELLOS, D. C. 2007. Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo. **Tese (Doutorado)** – Português, Universidade Federal de Viçosa (UFV). Viçosa, Minas Gerais, Brasil: 162 p.

COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. 1972. **Maderas: método de acondicionamento**. 459. COPANT, 5p.

COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. 1972. **Maderas: método de determinación del peso específico aparente**. 461. COPANT, 5p.

COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. 1971. **Maderas: método de determinación variación dimensional**. 462. COPANT, 5p.

COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. 1972. **Maderas: método de flexión**. 006. COPANT, 5p.

COSTA, M. A. 2009. Avaliação de Metodologias alternativas para caracterização do ataque de fungos apodrecedores de madeiras. **Dissertação (Mestrado)**. Português. Universidade de Brasília (UnB), Brasília, Brasil, 83 p.

HART, J. R.; NORRIS, K. H.; GOLUMBIC, C. 1962. Determination of the moisture content of seeds by near – Infrared Spectrophotometry of their methanol extracts , **Cereal Chem.**, 39, 94 – 99.

HEIN, P. R. G. 2008. Avaliação das propriedades da madeira de *Eucalyptus urophylla* por meio da espectroscopia no infravermelho próximo. **Dissertação (Mestrado)**. Português. Universidade Federal de Lavras (UFLA) – Lavras, Minas Gerais, Brasil. 88 p.

KELLEY, S. S. et al. 2004. **Use of Near Infrared Spectroscopy for characterization of wood**. 5^a. Conferência internacional de biomassa das Américas. In: <http://www.brdisolutions.com/pdfs/bcota/abstracts/29/z362.pdf>. Acesso em 16 de fevereiro de 2011.

NISGOSKI, S. 2005. Espectroscopia no infravermelho próximo no estudo de características da madeira e papel de *Pinus taeda* L. **Tese (Doutorado)**. Português. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 160 p.

PASTORE, T. C. M. et al. 2011. Near infrared spectroscopy (NIRS) as a potential tool for monitoring trade of similar woods: discrimination of true mahogany, cedar, andiroba, and curupixá. **Holzforschung**. v. 65, p. 73-80.

RIALS, T. G.; KELLEY, S. S.; SO, C. 2002. Use of advanced spectroscopic techniques for predicting the mechanical properties of wood composites. **Wood Fiber Science**. 34(3): p. 398–407.

RIBEIRO, P. G. 2009. Utilização de técnicas não destrutivas para caracterização de madeiras de *Pinus caribaea* Var. *hondurensis* e de *Eucalyptus grandis*. **Dissertação (Mestrado)**. Português. Universidade de Brasília (UnB), Brasília, Brasil, 114 p.

ROSS, R. J.; BRASHAW, B. K.; PELLERIN, R. F. 1998. Nondestructive evaluation of wood. **Forest Products Journal**, Madison, v. 48, n. 1, p. 14-19, jan.

SCHIMLECK, L. R.; EVANS, R.; ILLIC, J. 2001. Estimation of *Eucalyptus delegatensis* wood properties by near-infrared spectroscopy. **Canadian Journal of Forest Research**. Canadá, v.31, n.10, p.1671-1675.

SCHIMLECK, L. R. et al. 2005. Near infrared spectroscopy for the nondestructive estimation of clear wood properties of *Pinus taeda* L. from the southern United States. **Forest Products Journal**, v. 55, n. 12, p. 21- 28.

SCHIMLECK, L. R. et al. 2006. Comparison of *Pinus taeda* L. wood property calibrations based on NIR spectra from the radial-longitudinal and radial-transverse faces of wooden strips. **Holzforschung**, 59, p. 214-218.

SKOOG, D. A.; HOLLER, J. F.; NIEMAN, T. A. 2002. **Princípios de Análise Instrumental**, Quinta Edição, Porto Alegre: Bookman.

SO, C. et al. 2004. The application of near infrared (*NIRS*) spectroscopy to inorganic preservative-treated wood. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 36, n. 4, p. 329-336.

WATSON, C. A. 1977. Near Infrared reflectance spectrophotometric analysis of agricultural products, **Anal. Chem.**, 49, 835A – 840A.