



EVELIZE APARECIDA AMARAL

**COMPORTAMENTO HIDROMECHANICO DA MADEIRA
DE *Eucalyptus* DURANTE A SECAGEM POR
ESPECTROSCOPIA NO NIR E VELOCIMETRIA DE
IMAGEM POR PARTÍCULAS**

LAVRAS – MG

2022

EVELIZE APARECIDA AMARAL

**COMPORTAMENTO HIDROMECAÂNICO DA MADEIRA DE *Eucalyptus*
DURANTE A SECAGEM POR ESPECTROSCOPIA NO NIR E
VELOCIMETRIA DE IMAGEM POR PARTÍCULAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração Ciência e Tecnologia da Madeira, para obtenção do título de doutor.

Orientador

Prof. Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein

Co-orientador

Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho

LAVRAS – MG

2022

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Amaral, Evelize Aparecida.

Comportamento hidromecânico da madeira de *Eucalyptus* durante a secagem por espectroscopia no NIR e velocimetria de imagem por partículas / Evelize Aparecida Amaral. - 2022.
59 p. : il.

Orientador(a): Paulo Ricardo Gherardi Hein.

Coorientador(a): Paulo Fernando Trugilho.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2022.

Bibliografia.

1. Espectroscopia NIR. 2. Análise de Imagens. 3. Qualidade da madeira. I. Gherardi Hein, Paulo Ricardo. II. Trugilho, Paulo Fernando. III. Título.

EVELIZE APARECIDA AMARAL

**COMPORTAMENTO HIDROMECÂNICO DA MADEIRA DE *Eucalyptus*
DURANTE A SECAGEM POR ESPECTROSCOPIA NO NIR E
VELOCIMETRIA DE IMAGEM POR PARTÍCULAS**

**HYDROMECHANICAL BEHAVIOR OF *Eucalyptus* WOOD DURING
DRYING BY SPECTROSCOPY IN NIR AND IMAGE VELOCIMETRY BY
PARTICLES**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração Ciência e Tecnologia da Madeira, para obtenção do título de doutor.

Aprovada em 29 de abril de 2022.

Dr. Allan Motta Couto - UEMS

Dra. Livia Cassia Viana - UFT

Dra. Maria Fernanda Vieira Rocha – BRACELL

Dr. Thiago Campos Monteiro – UFPR

Orientador

Prof. Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein

Co-orientador

Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho

LAVRAS – MG

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus! É ele que conduz e guia minha vida para eu ser um ser humano melhor.

Agradeço aos meus pais, Antônio e Rosângela, que sempre me incentivaram e não mediram esforços para que eu pudesse alcançar meus objetivos e ser feliz.

Aos meus irmãos, Antônio César e Isis, que sempre estiveram ao meu lado, me apoiando nos momentos bons e ruins.

Ao meu vovô, que tenho certeza de estar sempre cuidando de mim lá de cima. Dedico minhas conquistas a ele.

Ao meu namorado André, por todo amor, força e companheirismo durante todos esses anos.

A minha sogra Geni e meu cunhado Gustavo, por me acolher como filha/irmã e sempre me incentivar.

As minhas amigas-irmãs de infância Ana Caroline e Luciana, por todo carinho e companheirismo nesses anos. Nossas histórias serão, para sempre, guardadas no meu coração e contadas com muito carinho.

Aos amigos que a pós-graduação me proporcionou. Alison, Carine, Daiane Elessandra, Nayara, Lívia, Luana, Thawane e Uasmim, vocês são luz na minha vida e deixam minha caminhada mais iluminada e leve.

As minhas amigas Ludmila e Thais, que por mais distantes estão sempre presentes em meu coração.

Aos meus dogs Bibi, Chitarinha, Totó e Zequinha, que são fontes de amor e companheirismo.

Ao meu comitê de orientação, Paulo Hein e Paulo Trugilho, pela confiança, conhecimentos compartilhados, incentivo e dedicação.

Aos professores e servidores do PPGCTM pelos conhecimentos compartilhados e dedicação à profissão.

Aos membros das bancas de defesa de projeto, qualificação e tese por todas as colaborações enriquecedoras.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira (PPGCTM), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas

Gerais (FAPEMIG).

Enfim, meu muito obrigada a todos que diretamente ou indiretamente fizeram e fazem parte da minha trajetória.

*“Conheça todas as teorias, domine todas as técnicas, mas ao tocar uma alma humana,
seja apenas outra alma humana.”*

(Carl Jung)

RESUMO

As propriedades físicas da madeira como umidade e retratibilidade estão entre os parâmetros mais importantes para qualificar o material, pois afetam diretamente seu desempenho em aplicações estruturais e industriais. Contudo, por ser um material heterogêneo, a umidade e as contrações da madeira podem apresentar variações dentro da peça. Por isso, o uso de técnicas não destrutivas pode ser uma alternativa viável no monitoramento do comportamento hidromecânico do material. O objetivo deste estudo foi desenvolver uma solução para monitorar a variação espacial da umidade e das contrações da madeira durante a secagem a partir da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) e análise de imagens. Pontos equidistantes foram marcados na superfície radial de uma tábua de madeira recém-abatida. Espectros no NIR foram registrados em cada marcação com uma sonda de fibra ótica durante a secagem da peça de madeira. Calibração pré-estabelecida para estimativa da umidade da madeira foi aplicada em cada espectro para gerar informações de umidade em cada ponto durante as fases de secagem. A análise espectral foi feita por Análise de Componentes Principais (PCA) enquanto as estimativas foram obtidas por Regressão dos Mínimos Quadrados Parciais (PLS-R) e as classes de umidade por Análise discriminante por Mínimos Quadrados Parciais (PLS-DA). Após a aquisição espectral em cada etapa de secagem, imagens foram obtidas por câmera fotográfica e as marcações foram referenciadas no software ImageJ para monitoramento das contrações durante a secagem. As estimativas da umidade a partir dos espectros NIR apresentaram forte correlação com valores de referência ($R^2_{cv}=0.92$, $RMSE_{cv}=9.82\%$). A partir das estimativas foi possível gerar imagens gráficas para visualizar e quantificar a variação espacial da umidade e das contrações durante a secagem da madeira. Nas fases iniciais da secagem, as extremidades do material apresentaram umidade elevada em relação ao centro da peça. Contudo, a perda de umidade foi 11% maior nas extremidades da peça quando comparada com seu interior e a contração externa foi 3 vezes maior em relação a interna. A aquisição espectral via NIR e a análise de imagens são ferramentas eficientes para estimar a umidade e contração da madeira, respectivamente.

Palavras-chave: Espectroscopia NIR; Análise de Imagens; Qualidade da madeira; Propriedades físicas.

ABSTRACT

The physical properties of wood such as moisture and shrinkage are among the most important parameters to qualify the material, as they directly affect its performance in structural and industrial applications. However, as it is a heterogeneous material, moisture and wood contractions may vary within the piece. Therefore, the use of non-destructive techniques can be a viable alternative for monitoring the hydromechanical behavior of the material. The objective of this study was to develop a solution to monitor the spatial variation of moisture and wood contractions during drying using near-infrared (NIR) spectroscopy and image analysis. Equidistant points were marked on the radial surface of a freshly felled wood board. NIR spectra were recorded at each marking with a fiber optic probe during the drying of the wood piece. Pre-established calibration for wood moisture estimation was applied to each spectrum to generate moisture information at each point during the drying phases. The spectral analysis was performed by Principal Component Analysis (PCA) while the estimates were obtained by Partial Least Squares Regression (PLS-R) and the moisture classes by Partial Least Squares Discriminant Analysis (PLS-DA). After the spectral acquisition in each drying step, images were obtained by camera and the markings were referenced in the ImageJ software to monitor contractions during drying. Moisture estimates from NIR spectra showed strong correlation with reference values ($R^2_{cv}=0.92$, $RMSE_{cv}=9.82\%$). From the estimates it was possible to generate graphic images to visualize and quantify the spatial variation of moisture and contractions during wood drying. In the initial stages of drying, the ends of the material presented high moisture in relation to the center of the piece. However, the moisture loss was 11% higher at the ends of the part when compared to its interior and the external contraction was 3 times greater than the internal one. Spectral acquisition via NIR and image analysis are efficient tools to estimate wood moisture and shrinkage, respectively.

Keywords: NIR spectroscopy; Image Analysis; Wood quality; Physical properties.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS	3
2.1	Objetivo Geral.....	3
2.2	Objetivos Específicos.....	3
3	REFERÊNCIAL BIBLIOGRÁFICO	4
3.1	Umidade da madeira.....	4
3.2	Densidade básica da madeira	5
3.3	Retratibilidade da madeira.....	6
3.4	Espectroscopia no infravermelho próximo (NIR)	7
3.5	Técnica NIR para estimar a umidade da madeira.....	8
3.6	Técnica NIR para estimar a densidade da madeira	9
3.7	Análise de imagens digitais.....	10
4	MATERIAL E MÉTODOS	12
4.1	Origem e preparo de material.....	12
4.2	Aquisição espectral via NIR.....	14
4.3	Monitoramento da umidade e taxa de secagem.....	15
4.4	Determinação da densidade básica.....	15
4.5	Calibração do modelo	16
4.6	Validação do modelo.....	16
4.7	Estatística multivariada.....	17
4.8	Contração da madeira.....	18
4.9	Processamento e análises de imagens	20
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
5.1	Dados de referência da calibração.....	22
5.1.1	Densidade básica	22
5.1.2	Umidade.....	22
5.2	Taxa de secagem.....	23
5.3	Assinatura espectral.....	24
5.4	Análise de componentes principais (PCA).....	26
5.5	Modelos de calibração e validação a partir da PLS-R	28
5.5.1	Densidade	28

5.5.2	Umidade.....	30
5.6	Varição espacial da umidade da madeira	34
5.7	Varição espacial das contrações da madeira	37
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema ilustrativo do funcionamento de um espectrômetro.	7
Figura 2: Etapas do modelo de estimativa da umidade da madeira via espectroscopia NIR.	12
Figura 3: Tábua controle utilizada para aquisição espectral via NIR.	13
Figura 4: Corpos de prova utilizados na calibração do modelo.	14
Figura 5: Aquisição espectral por meio da fibra ótica na face radial da madeira.	16
Figura 6: Aquisição espectral por meio da fibra ótica na face radial da tábua controle.	17
Figura 7: Etapas para o estudo das contrações da madeira.	19
Figura 8: Setup para aquisição de imagens digitais.	20
Figura 9: Gráfico gerado a partir dos valores das coordenadas longitudinais e latitudinais dos pontos de marcação.	21
Figura 10: Perda de umidade dos corpos de prova em relação ao tempo de secagem. ...	23
Figura 11: Médias dos espectros não tratados e tratados com a primeira derivada registrados nos corpos de prova de madeira em diferentes etapas de secagem.	25
Figura 12: Médias dos espectros não tratados e tratados com a primeira derivada registrados na tábua controle em diferentes etapas de secagem.	25
Figura 13: Análise de componentes principais de espectros NIR dos corpos de prova medidos durante a secagem da madeira.	27
Figura 14: Análise de componentes principais de espectros NIR da tábua controle medidos durante a secagem da madeira.	28
Figura 15: Modelos de calibração e validação cruzada estimativa da densidade básica da madeira a partir de espectros NIR.	29
Figura 16: Modelos de calibração e validação cruzada estimativa da umidade da madeira a partir de espectros NIR.	31
Figura 17: Gráfico dos modelos de regressão dos valores de umidade da madeira obtidos em laboratório e estimados pelo NIR de acordo com a Tabela 4.	33
Figura 18: Gráfico da distribuição espacial da perda e ganho de água na madeira.	36
Figura 19: Gráfico de vetores PIV da secagem da madeira.	37
Figura 20: Variação espacial das contrações da madeira durante a secagem.	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Taxa de secagem natural da madeira de acordo com o tipo de água removida.	24
Tabela 2: Modelos de calibração e validação cruzada estimativa da densidade básica da madeira a partir de espectros NIR.	30
Tabela 3: Matriz de confusão da predição da umidade da madeira com base nos espectros NIR através do modelo global.	32
Tabela 4: Modelo de predição para estimar a umidade da madeira a partir de espectros NIR.	33
Tabela 5: Dados de referência da umidade superficial da madeira coletada em 11 etapas.	35

EQUAÇÕES

Equação 1	15
Equação 2	15
Equação 3	20

1. INTRODUÇÃO

A umidade, densidade e níveis de contração são parâmetros que determinam a qualidade da madeira para fins estruturais e industriais. Variação nestas importantes propriedades podem afetar o esforço mecânico, secagem, processamento, cura da cola e desempenho de adesão. Assim, selecionar madeira com propriedades adequadas à aplicação futura é essencial para racionalizar o uso dos recursos florestais.

As indústrias de polpa celulósica selecionam madeiras com densidade em torno de 450 kg/m³ para obter melhores rendimentos e produzir polpa com resistência físico-mecânicas adequadas (ADIA et al., 2014). Já o setor moveleiro, além de buscar por madeiras densas para melhorar as propriedades mecânicas dos móveis, selecionam materiais livres de defeitos (SILVA; CASTRO; EVANGELISTA, 2015). Dessa forma, determinar os parâmetros de qualidade da matéria-prima utilizada é uma atividade rotineira nas indústrias de base florestal.

Para determinar os parâmetros de qualidade da madeira é necessário adotar técnicas rápidas, eficientes, de baixo custo e que permita reutilizar o material. Neste cenário, as técnicas não destrutivas se destacam, pois visam reduzir os custos, tempo, além de direcionar o material para seu melhor uso (DINIZ et al., 2019). Entre os métodos não destrutivos, a espectroscopia no NIR (do inglês, *Near Infrared*) tem sido amplamente utilizada para caracterização de materiais das mais diversas áreas do conhecimento, tais como industrial alimentícia, farmacêutica, médica, têxtil e agrícola. Na área florestal, a técnica NIR vem sendo aplicada com sucesso para estimar os parâmetros das propriedades físicas (HADDADI et al., 2016) químicas (PECORARO et al., 2015), anatômicas (HEIN et al., 2012) e mecânicas (FUJIMOTO et al., 2008) da madeira.

Para ser aplicada na indústria, a espectroscopia NIR necessita do desenvolvimento de um modelo de calibração que relaciona os espectros NIR das amostras de madeira à sua constituição química conhecida, por exemplo, o conteúdo de água (PASQUINI, 2018). Após o processo de calibração, a precisão e robustez do modelo devem ser validadas a partir de amostras independentes (NAES et al., 2002).

Atualmente a técnica NIR é empregada em larga escala para estimativa dos parâmetros das propriedades físicas da madeira. Algumas pesquisas científicas obtiveram modelos que apresentaram bom desempenho em validações cruzadas e independentes para estimativa da umidade (ZHANG et al., 2011; HANS et al. 2012; AMARAL et al.,

2020; DOS SANTOS et al., 2020) e densidade básica (HEIN, LIMA e CHAIX, 2009; INAGAKI et al., 2012, VIANA et al., 2009; HEIN et al., 2012, ROSSO et al., 2013; COSTA et al., 2018; AMARAL et al., 2021) da madeira utilizando a técnica NIR.

No entanto, os estudos que aplicam a técnica NIR para estimar a umidade e densidade da madeira, normalmente utilizam apenas um ponto de aquisição espectral na amostra, o qual fornece uma estimativa média do parâmetro avaliado. Sendo a madeira heterogênea, os valores de umidade e densidade podem variar em uma mesma peça. Assim, uma análise de toda superfície da madeira mostra-se necessária, pois dependendo da região de aquisição espectral, o resultado pode ser sub ou superestimado. Além disso, para poder avaliar visualmente as variações da umidade e as contrações que ocorrem na madeira durante a secagem é necessário adotar técnicas não invasivas, tais como análises de imagens.

As análises de imagens são feitas a partir de fotografias capturadas durante a secagem do material. Após essas imagens serem coletadas, são tratadas e analisadas por softwares específicos, tais como o ImageJ e Scilab.

Tendo por base o conhecimento científico sobre a aplicação da espectroscopia no NIR para predição da umidade e densidade da madeira e as técnicas baseadas em análises de imagens para monitorar as contrações, partiu-se da hipótese de que a associação das duas técnicas permite monitorar a variação superficial das contrações decorrentes da desorção de água durante a secagem em tempo real e entender melhor a dinâmica da secagem da madeira e seus efeitos nas deformações do material.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo deste estudo foi desenvolver uma solução para monitorar a variação espacial da umidade e das contrações da madeira durante a secagem a partir da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) e análise de imagens.

2.2. Objetivos Específicos

- a) Desenvolver modelo multivariado para estimativa da umidade e densidade básica da madeira de *Eucalyptus* a partir da espectroscopia NIR;
- b) Monitorar a variação superficial da dessorção da madeira durante a secagem por meio da variação espectral no NIR em tempo real;
- c) Referenciar imagens obtidas em diferentes fases de secagem de uma peça de madeira para quantificar e monitorar a variação superficial das contrações da madeira.
- d) Associar imagens digitais da variação superficial das contrações obtidas por velocimetria por imagens de partículas e mapas da dessorção obtidas por espectroscopia no NIR para entender a dinâmica da secagem em peças de madeira.

3. REFERÊNCIAL BIBLIOGRÁFICO

3.1. Umidade da madeira

Embora a umidade não seja uma característica intrínseca da madeira, está entre os principais parâmetros das propriedades físicas do material. A variação da umidade afeta o comportamento do material durante o processamento industrial e as fases de aplicação (TSUCHIKAWA e SCHWANNINGER, 2013). Assim, a determinação e o monitoramento da umidade durante a secagem são essenciais para garantir a qualidade dos produtos à base de madeira.

Técnicas destrutivas como o método gravimétrico e químico normalmente são utilizadas para determinação da umidade da madeira. Em nível industrial, são métodos demorados (dias ou meses), caros, destrutivos e geralmente limitados para determinado número de amostras. Para caracterização de suas matérias-primas, as empresas do setor florestal demandam metodologias rápidas, de baixo custo, precisas e que possam ser aplicadas para um grande número de amostras (WANG et al. 2021).

Diante dos gargalos operacionais da indústria, é crescente a adoção de metodologias não destrutivas para estimativa da umidade da madeira. Dentre os métodos, destacam-se os medidores elétricos (BRISCHKE; RAPP; BAYERBACH, 2008), densitometria de raios-X (WATANABE et al., 2008) e espectroscopia no infravermelho próximo (PASQUINI, 2018).

Os medidores elétricos mais utilizados para predição da umidade da madeira são de resistência elétrica, capacitivo ou resistivo. Alguns estudos apresentaram resultados satisfatórios ao utilizar medidores elétricos no monitoramento do conteúdo de umidade da madeira (BRISCHKE; RAPP; BAYERBACH, 2008; VAN DEN BULCKE; VAN ACKER; DE SMET, 2009; ISAKSSON e THELANDERSSON, 2013; BRISCHKE; MEYER-VELTRUP; BORNEMANN, 2017). Contudo, os medidores elétricos possuem limitações na medição da umidade, pois medem apenas a região onde o eletrodo está inserido e não traz valores confiáveis para umidade acima de 30% e abaixo de 7%.

Outro método não destrutivo para predição da umidade da madeira é a aplicação da densitometria de raios-X. É um método utilizado na medicina (densitometria óssea) e foi adaptado para a madeira. Possui sensibilidade e praticidade, além de permitir o detalhamento da estrutura interna de um corpo de prova de madeira. Pesquisas aplicaram o método no monitoramento da secagem (WATANABE et al., 2008, 2012),

higroscopicidade (TANAKA, AVRAMIDIS e SHIDA, 2009) e absorção de água na madeira (SANDBERG; SALIN, 2012; LI et al., 2013). Os estudos apresentaram estatísticas satisfatórias para estimativa da umidade. Porém, além de ser uma metodologia cara é necessário o preparo dos corpos de prova.

Atualmente, a espectroscopia no infravermelho próximo é empregada em larga escala para predição das características da madeira. Após o espectrômetro ser calibrado é possível por meio da análise dos espectros, predizer parâmetros das propriedades da madeira, como por exemplo, o teor de umidade. Estudos utilizaram a técnica NIR na estimativa da umidade em madeira (SOFIANTO et al., 2017; AMARAL et al., 2020; DOS SANTOS et al., 2020). Os resultados mostraram que a aplicação da técnica NIR na estimativa da umidade da madeira é uma alternativa viável, tanto do ponto de vista produtivo quanto econômico.

3.2. Densidade básica da madeira

A densidade básica da madeira é um parâmetro físico decorrente da junção de diversos fatores como composição química, dimensão e arranjo dos elementos anatômicos e proporção do lenho inicial e tardio. A determinação desse parâmetro é muito importante, pois indica a qualidade do material e evita que afete os processos industriais que tem como matéria-prima a madeira. (MATTOS et al., 2011).

A determinação da densidade básica da madeira corresponde à relação entre sua massa seca e seu volume saturado, expressa em g/cm^3 ou kg/m^3 de acordo com norma NBR 11941 (ABNT, 2003). Algumas metodologias destrutivas são utilizadas para determinação do volume do material como o método de imersão e flutuação. Contudo, são métodos onerosos e que demandam tempo, além de serem metodologias que danificam o material, impossibilitando sua reutilização.

Técnicas não destrutivas estão sendo utilizadas como alternativas para caracterização da matéria prima. Dentre as técnicas, uma que têm se destacado é a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR). Além de ser uma técnica rápida e acurada, precisa de mínimo preparo do material, podendo ser realizada até mesmo em campo (SHARMA et al. 2020).

Trabalhos utilizaram a técnica NIR para estimar a densidade básica da madeira (HEIN et al., 2008; ARRIEL et al., 2019; AMARAL et al., 2021). Os resultados forneceram estatísticas satisfatórias para predição desse parâmetro. Além disso, os

autores concluíram haver variações nos resultados de acordo com a face de aquisição espectral na madeira. As faces que apresentaram os melhores modelos foram a transversal e radial (VELOSO et al., 2018; AMARAL et al., 2021).

Essa determinação da densidade é essencial, pois a madeira não é um material homogêneo e sua densidade varia entre espécies, árvores de uma mesma espécie e dentro de uma mesma árvore, tanto no sentido da base para o topo como no sentido da medula para a casca. Devido essas variações, para utilização tecnológica é essencial o estudo da densidade no sentido medula casca (MELO et al., 2006).

Para as empresas florestais como as de papel e celulose que visam produzir polpa celulósica com alto rendimento e elevada resistência físico-mecânica, a determinação da densidade da madeira é um dos principais requisitos para a avaliação da qualidade do material. Além disso, a densidade traz informações que servem como referência para diversos usos da madeira, tais como indústria moveleira e na construção civil (MATTOS et al., 2011).

3.3. Retratibilidade da madeira

A madeira é um material higroscópico, ou seja, possui a capacidade de adsorver ou dessorver água para o meio ambiente. A adsorção ocorre pela inserção de moléculas de água nos espaços submicroscópicos entre as micelas e nas regiões amorfas de celulose e hemiceluloses, provocando seu afastamento e ocasionando assim, a expansão da madeira. Já o fenômeno de dessorção é caracterizado pela retirada de água dos espaços submicroscópicos mencionados, ocasionando a aproximação das micelas e das moléculas que as constituem, provocando à contração da madeira (GOMES et al., 2006).

Para que ocorra variação dimensional do material é necessário que a perda ou ganho de água ocorra abaixo do ponto de saturação das fibras (~30%). Além disso, as variações dimensionais são diferentes de acordo com o plano de corte da madeira, normalmente as maiores variações ocorrem no plano tangencial, seguido pelo radial (OLIVEIRA e SILVA, 2003).

Alguns estudos foram desenvolvidos sobre a retratibilidade da madeira. Logsdon, Finger e Borges (2008) estudaram a variação dimensional da madeira de *Aspidosperma populifolium*. Logsdon e Finger e Penna (2008) avaliaram a retratibilidade da madeira de *Guarea trichilioides*. Os resultados destes estudos demonstraram que essas espécies podem ser utilizadas na fabricação de móveis que aceitem pequenos empenamentos. A

avaliação foi baseada nos valores de volume inicial e final dos corpos de prova, medidos na face tangencial e radial, utilizando paquímetro digital.

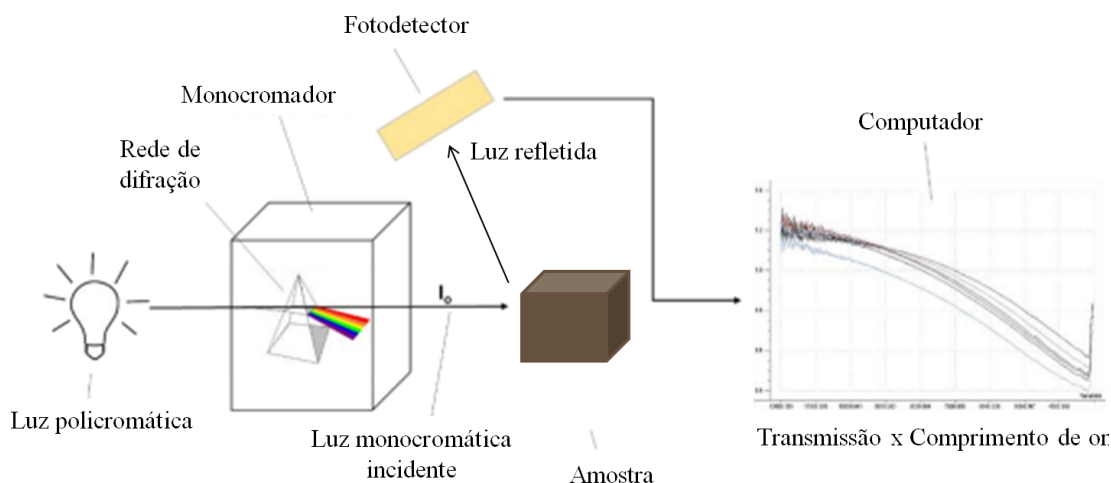
O método de avaliação da reprodutibilidade utilizando paquímetro digital é o mais usual. Contudo, não apresenta boa precisão e fornece apenas valores da contração média do material. Nesse contexto, o uso de metodologias que permita uma análise mais completa é necessária.

3.4. Espectroscopia no infravermelho próximo (NIR)

O infravermelho próximo é a região espectral logo após o visível e abrange a faixa de comprimento de onda de 750 a 2500 nm. O princípio de funcionamento da técnica NIR baseia-se na espectroscopia vibracional, que mede a interação da luz com as ligações químicas do material estudado (NAES et al., 2002; PASQUINI, 2018).

Os equipamentos utilizados nesta técnica são geralmente constituídos de quatro partes fundamentais: fonte luminosa; sistema de separação da luz policromática em função de diferentes comprimentos de onda; sistema para suporte das amostras e fotodetector (Figura 1) (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Figura 1: Esquema ilustrativo do funcionamento de um espectrômetro.



Fonte: Adaptado Taiz e Zeiger (2004).

A interação da radiação NIR com o material ocorrerá quando houver ressonância entre o campo elétrico gerado pela oscilação da ligação química e a onda eletromagnética. O equipamento chamado espectrômetro emite radiação infravermelha sobre a amostra

(sólida ou líquida) e os sensores captam as oscilações nas vibrações moleculares dos constituintes químicos nela existentes, podendo provocar os fenômenos de absorção, reflexão ou transmissão de forma particular à radiação que lhes são incididas (PASQUINI, 2018).

A técnica NIR associada à estatística multivariada é uma ferramenta eficiente na caracterização de materiais orgânicos, como a madeira (TSUCHIKAWA e KOBORI, 2015). A técnica necessita do desenvolvimento de um modelo de calibração que relaciona os espectros NIR das amostras de madeira a sua constituição química conhecida (RAYMOND, 2002). Após o processo de calibração, a precisão e robustez do modelo devem ser validadas a partir de amostras independentes (NAES et al., 2002). A técnica NIR apresenta potencial para prever propriedades mecânicas, físicas, químicas e anatômicas da madeira, o qual tem sido objeto de revisões realizadas por So et al. (2004), Tsuchikawa e Kobori (2015), Leblon et al. (2013), Hein, Pakkanen e Dos santos (2017) e Wang et al. (2021).

3.5. Técnica NIR para estimar a umidade da madeira

Para monitorar o conteúdo de água na madeira é necessário adotar técnicas rápidas, eficientes de baixo custo e que permita reutilizar o material. Assim, alguns estudos têm aplicado a técnica NIR para avaliar sua robustez na estimativa da umidade em madeira. Defo, Taylor e Bond (2007) aplicaram a espectroscopia NIR na predição da umidade da madeira de *Quercus coccinea* recém serrada. Espectros foram obtidos a partir da face tangencial, radial e transversal. O melhor desempenho foi na face transversal $R^2=0.93$ e $RMSEP=2.9\%$. Mora et al. (2011) utilizaram a técnica NIR para determinar a quantidade de espectros necessários para obter resultados satisfatórios na estimativa da umidade da madeira de *Pinus taeda*. Os autores verificaram que o número de espectros por disco poderia ser reduzido para quatro leituras, com $R^2=0.85$ e $RMSEP=2\%$. Reduções adicionais aumentaram os erros de predição.

Zhang et al. (2011) aplicaram a técnica NIR para prever a umidade da madeira de *Pinus koraiensis* em sete intervalos de comprimentos de onda. O melhor modelo foi encontrado no intervalo de 1000 a 2100 nm, com $R^2=0.98$ e $RMSEP=0.04\%$. No estudo de Hans et al. (2012), os autores aplicaram a espectroscopia NIR para estimar a umidade da madeira de *Picea mariana* Mill. congelada e descongelada. Espectros foram coletados no alburno e cerne, nas faces tangenciais e transversais. Foram gerados modelos

preditivos para discos de madeira congelados e descongelados (modelo separado e generalizado). Os modelos foram semelhantes, não houve efeitos da temperatura nas calibrações para estimativas de umidade.

Sofianto et al. (2017) aplicaram a espectroscopia NIR em sistema on-line desenvolvido com velocidade de 120m/min para prever a umidade de duas espécies: *Cryptomeria japonica* e *Pseudotsuga menziesii*. A medição da umidade foi realizada de 30% a 12%. O erro quadrático médio dos valores de validação cruzada (RMSECV) da predição da umidade foi de 1.0% e 0.6% para madeira de *Cryptomeria japonica* e *Pseudotsuga menziesii*, respectivamente. A velocidade de medição on-line de espectros NIR forneceu resultados satisfatórios para predição da umidade e pode ser aplicado na linha de produção industrial de compensados para aumentar a eficiência.

3.6. Técnica NIR para estimar a densidade da madeira

A determinação da densidade básica e sua variação no interior na árvore, tanto no sentido radial quanto longitudinal é fundamental para compreensão da qualidade da madeira (MELO et al. 2006). Na prática, os valores de densidade básica podem ser utilizados para classificações de madeiras, visto que é um parâmetro que possui relação direta com demais propriedades do material, além de influenciar seus produtos e coprodutos.

Visando otimizar o processo de caracterização da matéria prima nas indústrias de base florestal, a espectroscopia no NIR foi apontada como uma técnica promissora para estimativa de parâmetros das propriedades físicas da madeira, como a densidade básica (ARRIAL et al., 2019).

Os modelos de regressão multivariados desenvolvidos a partir de espectros NIR foram utilizados com sucesso para estimar a densidade básica da madeira em diferentes espécies tais como *Pinus taeda* (MORA, SCHIMLECK E ISIK, 2008), *Eucalyptus urophylla* (HEIN, LIMA E CHAIX, 2009) e *Eucalyptus ssp.* (ARRIAL et al., 2019).

Alguns estudos avaliaram o efeito da face (radial, tangencial e transversal) da madeira na aquisição espectral via NIR para estimar a densidade básica (HEIN, LIMA E CHAIX, 2009; COSTA et al., 2018; AMARAL et al., 2021). De acordo com os resultados dos estudos, os melhores modelos multivariados foram obtidos via face transversal e radial, respectivamente. Além da face, a qualidade da superfície da madeira também pode influenciar na aquisição espectral. Zhan, Liu e Yang (2015) avaliaram o efeito da

rugosidade da superfície da madeira de *Cunninghamia lanceolata* e *Eucalyptus pellita* nos espectros obtidos via NIR. Os resultados mostraram forte correlação entre a rugosidade da madeira e a robustez dos modelos estatísticos.

Kitamura, Inagaki e Tsuchikawa (2016) listaram quatros principais causas para dispersão da luz na madeira: (1) interação da luz com pequenas partículas com índices de refração diferentes. (2) incompatibilidade do índice de refração da madeira com as substâncias da parede e o lúmen celular (3) espalhamento na borda áspera entre o lúmen celular e as substâncias da parede celular e (4) espalhamento devido à natureza birrefringente da microfibrila de celulose ou distribuição espacial dos componentes químicos na parede celular da madeira.

3.7. Análise de imagens digitais

A análise e processamento de imagens são técnicas que possuem ferramentas capazes de modificar, analisar e manipular imagens digitais (MASCARENHAS; VELASCO, 1989). Dentre os softwares de análises e processamento de imagens, o ImageJ e o Scilab se destacam, principalmente por serem softwares livre, gratuito e de fácil manuseio. O programa ImageJ foi desenvolvido pelo National Institute of Health e é disponibilizado gratuitamente em <http://rsb.info.nih.gov/ij/>, sendo de domínio público e constantemente aperfeiçoado.

O ImageJ tem como objetivo extrair do processamento e análises de imagens digitais informações fornecidas por parâmetros que possibilitarão a descrição, interpretação ou entendimento da imagem pelo computador (HANNICKEL et al., 2012). O software disponibiliza algumas ferramentas como o *plugin* da técnica velocimetria por imagem de partículas (PIV). O download do plugin pode ser realizado na sessão de plugins no website do software (imagej.nih.gov).

O plugin “PIV” é interativo, sendo assim, ocorre a redução da janela de interrogação progressivamente, de modo a atingir uma melhor resolução dos resultados. Existem dois métodos de correlação entre duas imagens. Primeiro, pode-se utilizar a correlação cruzada convencional, em que há comparação entre duas janelas de interrogação do mesmo tamanho. Ou, pode-se utilizar o método de comparação com algoritmo com coeficiente de correlação normalizado, em que a janela de interrogação é comparada por uma janela de busca maior (HAIN e KAHLER, 2007).

Diferente do ImageJ, o Scilab é um software voltado para resolução de problemas numéricos. O Scilab foi criado em 1990 por um grupo de pesquisadores do INRIA (Institut de Recherche en Informatique et en Automatique) e do ENPC (Ecole Nationale des Ponts et Chaussées) da França. O download do programa está disponível para download gratuito em <http://www.scilab.org> e pode ser legalmente utilizado, copiado, distribuído e modificado (PIRES, 2004).

É um software eficaz para geração de gráficos 2D e 3D, implementação de funções para manipulação de matrizes, operações com polinômios, funções de transferência, sistemas lineares e grafos (CAMPOS, 2010).

4. MATERIAL E MÉTODOS

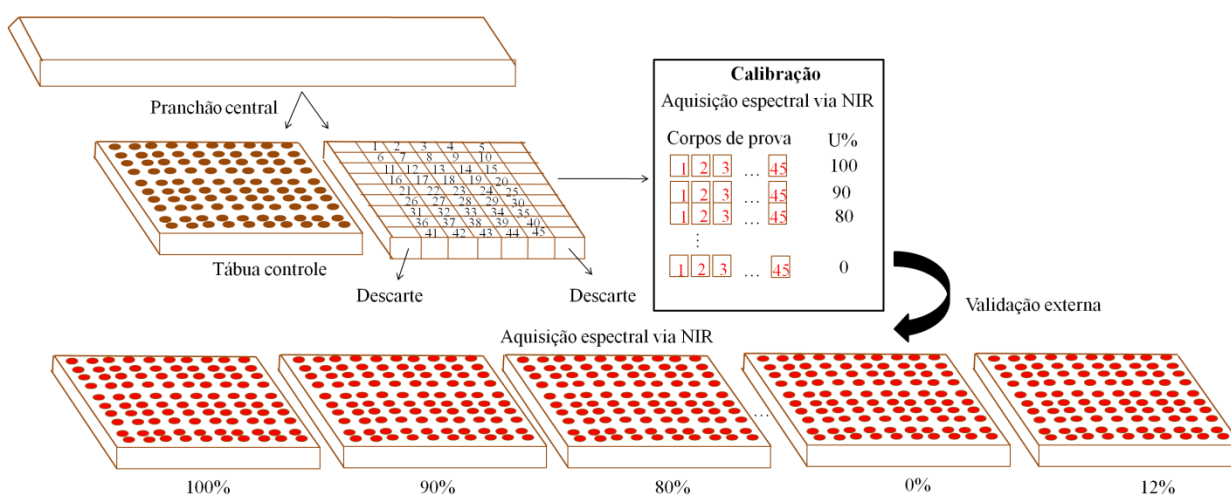
4.1. Origem e preparo de material

O material utilizado na pesquisa foi proveniente do clone AEC144, híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* aos 7 anos de idade, fornecido pela Fazenda Praia Grande, localizada na cidade de Santo Antônio do Amparo – MG (20° 57' 19" Sul, 44° 55' 0" Oeste).

Após a árvore (DAP = 67cm) ser abatida, foi realizado imediatamente seu transporte para a Universidade Federal de Lavras (UFLA), especificamente para Unidade Experimental de Desdobro e Secagem da madeira, onde foi desdobrada e confeccionada duas tábuas com dimensões de 400 mm (radial) x 10 mm (tangencial) x 200 mm (axial) a partir do pranchão central da tora. Em seguida, as tábuas foram acondicionadas em câmara climática à 20±1°C de temperatura e 60±2% de umidade relativa do ambiente, com o intuito de controlar a perda de umidade das amostras.

A Figura 2 representa de forma resumida as etapas de calibração e validação do modelo para estimativa da umidade da madeira que serão descritas a seguir.

Figura 2: Etapas do modelo de estimativa da umidade da madeira via espectroscopia NIR.

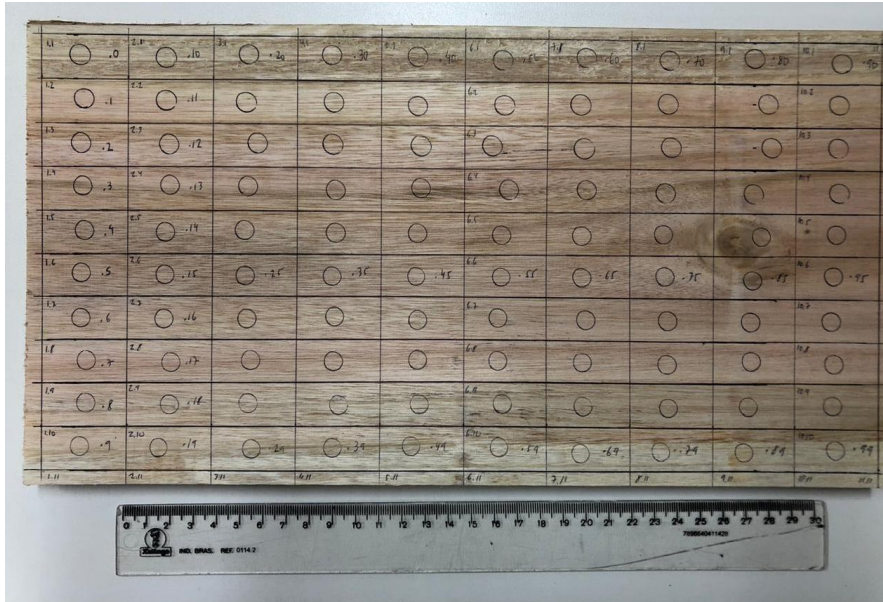


Fonte: Da autora (2021).

Das duas tábuas confeccionadas, a primeira manteve suas dimensões originais e foi denominada de tábua controle. Foram demarcadas 10 linhas e 10 colunas com distâncias padronizadas, formando assim, um total de 100 retângulos na tábua. No centro

de cada retângulo foi feito um círculo com dimensão de 10 mm² (Figura 3), mesma circunferência da fibra ótica utilizada para medição dos espectros no NIR.

Figura 3: Tábua controle utilizada para aquisição espectral via NIR.



Fonte: Da autora (2021).

A segunda tábua teve 20 mm de suas extremidades retiradas para ser utilizada como material de controle da umidade da tábua. Posteriormente, o restante do material foi cortado nas dimensões de 25 mm (radial) x 10 mm (tangencial) x 25 mm (axial), totalizando 45 corpos de prova (Figura 4), os mesmos foram utilizados para calibração do modelo, determinação do teor de umidade por meio da gravimetria e do volume pelo método de imersão em água, norma NBR 14929 (ABNT, 2017).

Figura 4: Corpos de prova utilizados na calibração do modelo.



Fonte: Da autora (2021).

A experimentação após a confecção das tábuas foi realizada nos laboratórios de ciência e tecnologia da madeira e de biomateriais, ambos pertencente ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Lavras.

4.2. Aquisição espectral via NIR

A aquisição espectral foi realizada utilizando o espectrômetro de transformada de Fourier da marca Bruker (Bruker Optik GmbH, Ettlingen, Germany, model: MPA) associado ao software OPUS versão 7.0. O espectrômetro é composto por duas vias de aquisição: esfera integradora e sonda de fibra ótica. No entanto, neste estudo apenas a sonda de fibra ótica foi utilizada para realizar as leituras espectrais. A fibra ótica diferente da esfera integradora possui mobilidade, o que facilita a aquisição espectral.

A sonda de fibra ótica apresenta os seguintes elementos: fonte NIR, roda de filtros, interferômetro e detector. Além disso, pode ser utilizada para amostras líquidas, sólidas ou em pó.

Os espectros NIR foram obtidos na região do infravermelho próximo na faixa de 12500 a 3600 cm^{-1} , com resolução espectral de 3.87 cm^{-1} no modo de reflexão difusa. Contudo, devido aos ruídos, para o estudo foi considerada a faixa de 9000 a 4000 cm^{-1} de acordo com o trabalho de Dos Santos et al. (2020).

4.3. Monitoramento da umidade e taxa de secagem

A umidade dos corpos de prova foi realizada em 10 etapas durante a secagem, de acordo o método descrito pela norma NBR 14929 (ABNT, 2017). Foi monitorada a secagem natural do material, desde a condição verde até a anidra, a cada perda de 10% de massa em relação à sua massa inicial. O material permaneceu em ambiente controlado ($T=20^{\circ}\text{C}$ e $UR=60\%$) até atingir umidade de equilíbrio (12% base seca) e posteriormente foi levado para a estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ até a massa se estabilizar.

Com base nos valores obtidos pela perda de água durante à secagem da madeira, foi determinada a taxa de secagem em três faixas de umidade: condição recém abatida à 30%, 30% à 16% e condição recém abatida à 16%. Essas faixas foram escolhidas baseadas na umidade de equilíbrio (~16%) e no PSF (~30%). Para o cálculo foi utilizada a Equação 1.

Equação 1:

$$TS = \frac{TU_i - TU_f}{T}$$

Em que: TS = taxa de secagem ($\text{U}\% \cdot \text{dias}^{-1}$); U_i = Umidade inicial; U_f = Umidade final; T (tempo em dias).

4.4. Determinação da densidade básica

A densidade básica foi determinada de acordo com a norma NBR 11941 (ABNT, 2003). Foram utilizados 45 corpos de prova para determinação do volume pelo método de imersão em água (Princípio de Arquimedes) e, ao final do experimento foram coletados os valores de massa seca das amostras. A partir disso, a densidade básica foi calculada conforme a relação da Equação 2.

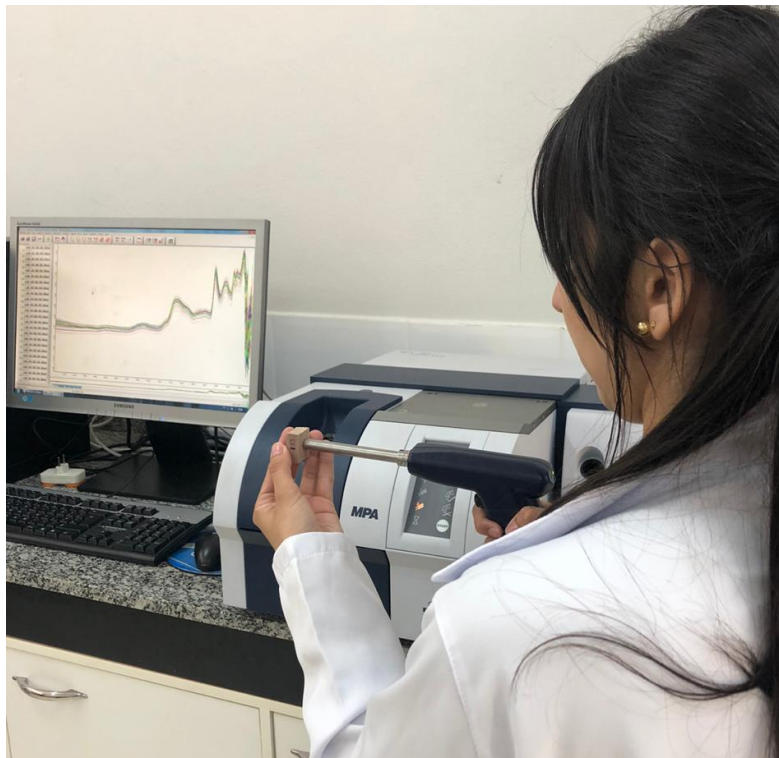
Equação 2:

$$DB \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{\text{Massa seca}}{\text{Volume verde}}$$

4.5. Calibração do modelo

Foram utilizados 45 copos de prova com dimensões de 25 mm (radial) x 10 mm (tangencial) x 25 mm (axial). O material foi identificado e espectros no NIR foram adquiridos da condição recém-cortada até a condição anidra, a cada perda de 10% de massa em relação à massa inicial do corpo de prova, totalizando 10 etapas e 450 medições. A aquisição espectral foi realizada por meio da fibra ótica na superfície radial do material (Figura 5). Posteriormente, os espectros adquiridos foram correlacionados com os valores de umidade e densidade básica determinados em laboratório.

Figura 5: Aquisição espectral por meio da fibra ótica na face radial da madeira.



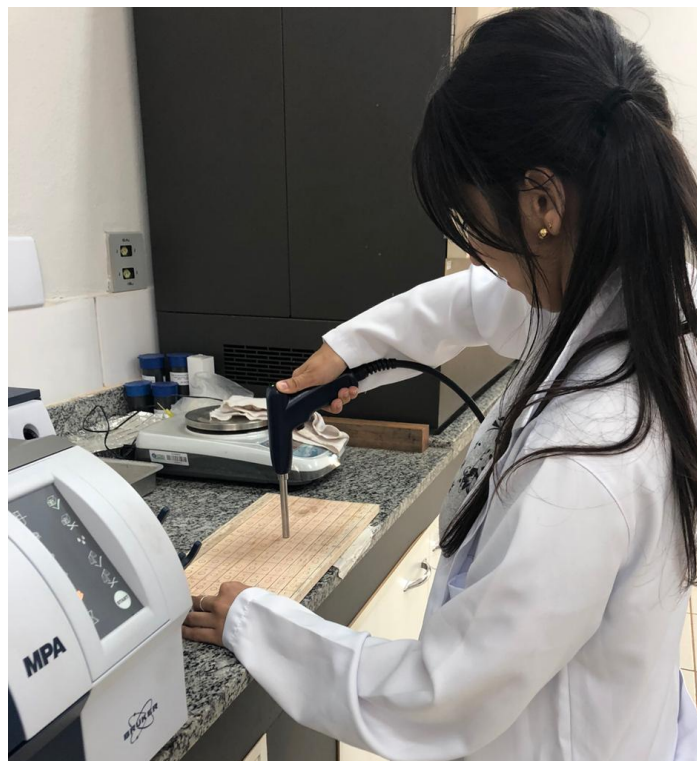
Fonte: Da autora (2021).

4.6. Validação do modelo

Foi utilizada uma tábua, denominada tábua controle com dimensões de 400 mm (radial) x 10 mm (tangencial) x 200 mm (axial), e em sua superfície radial foram demarcadas 100 circunferências de 10 mm². Utilizando a sonda de fibra ótica, espectros no NIR foram obtidos a cada perda de 10% de massa de água em relação à massa inicial

da tábua, totalizando 10 etapas e 1000 medições (Figura 6). O modelo de calibração gerado pelos 45 corpos de prova em 10 etapas foi utilizado para validar o modelo de estimativa superficial da umidade na tábua.

Figura 6: Aquisição espectral por meio da fibra ótica na face radial da tábua controle.



Fonte: Da autora (2021).

4.7. Estatística multivariada

Para ajuste dos modelos, Análise de Componentes Principais (PCA), Regressão de Mínimos Quadrados Parciais (PLS-R) e a Análise discriminante por mínimos quadrados parciais (PLS-DA) foram desenvolvidas utilizando o software livre Chemoface (<https://www.ufla.br/chemoface/>) versão 1.63 (NUNES et al., 2011).

A PCA foi realizada com o intuito de avaliar o efeito da presença de água na madeira em suas assinaturas espectrais durante a secagem. A análise baseia-se na redução dos números de dados a serem analisados, principalmente quando os dados são constituídos em grande quantidade de variáveis inter-relacionadas. Assim, possibilita a identificação das medidas responsáveis pelas maiores variações entre os resultados, sem perdas significativas de informações. A PLS-R foi desenvolvida para associar os espectros NIR

aos valores de densidade básica e umidade da madeira determinados em laboratório e assim, gerar um modelo de regressão capaz de estimar valores contínuos de densidade básica e umidade com base nos espectros NIR registrados na madeira. A análise PLS-DA foi realizada a fim de classificar os valores de umidade em três classes: 0-40%, 40-80% e acima de 80% com base nas assinaturas espectrais NIR.

As calibrações foram realizadas a partir dos espectros originais e tratadas pela primeira derivada usando o algoritmo de Savitzky-Golay com filtro de 13 pontos e polinômio de segunda ordem, conforme descrito em Costa et al. (2018). O tratamento matemático tem como intuito eliminar ruídos e melhorar a qualidade do sinal da calibração.

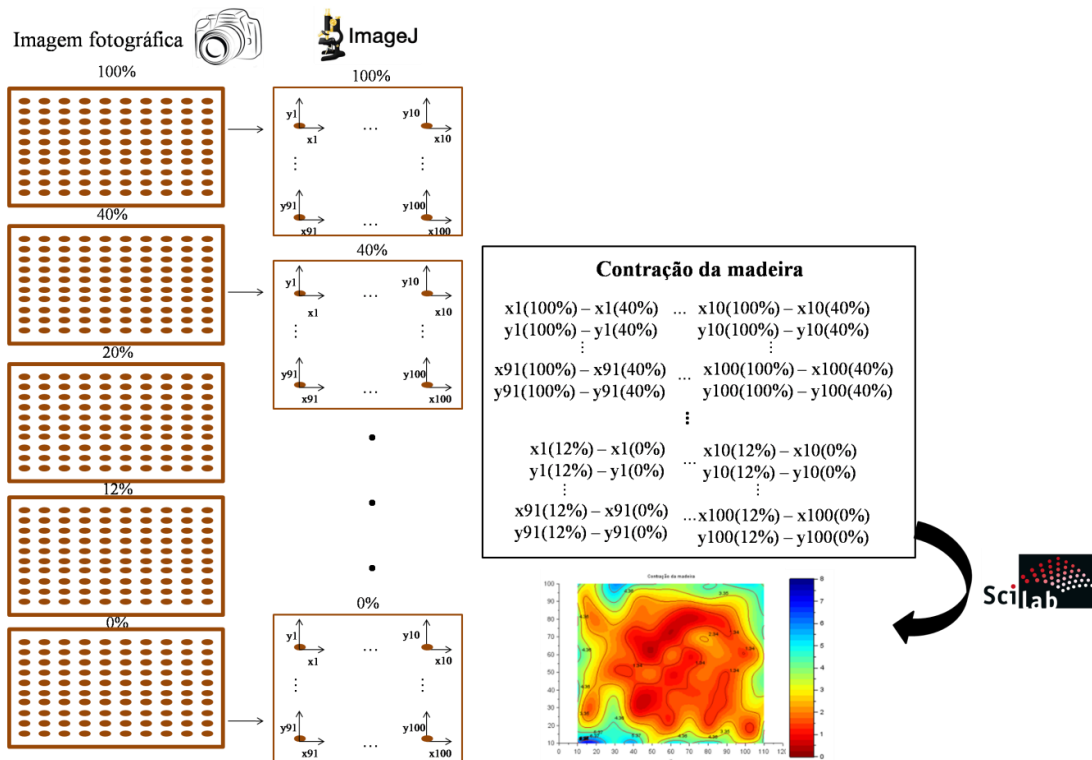
Para selecionar os melhores modelos preditivos, foram adotados os seguintes critérios: coeficiente de determinação do modelo de validação cruzada (R^2_{cv}), raiz quadrada do erro padrão médio do modelo de validação cruzada (RMSE_{cv}) e razão de desempenho do desvio (RPD). Além disso, após o ajuste de vários modelos preliminares um total de 7 variáveis latentes foram estabelecidas para todos os modelos.

A validação independente foi feita utilizando 2/3 das amostras escolhidas aleatoriamente para calibração e 1/3 das amostras restantes para validação do conjunto de teste. Posteriormente, o modelo de calibração foi utilizado para validar os espectros coletados na tábua controle em 11 etapas de secagem.

4.8. Contração da madeira

A Figura 7 representa de forma resumida as etapas do estudo das contrações da madeira, descritas posteriormente.

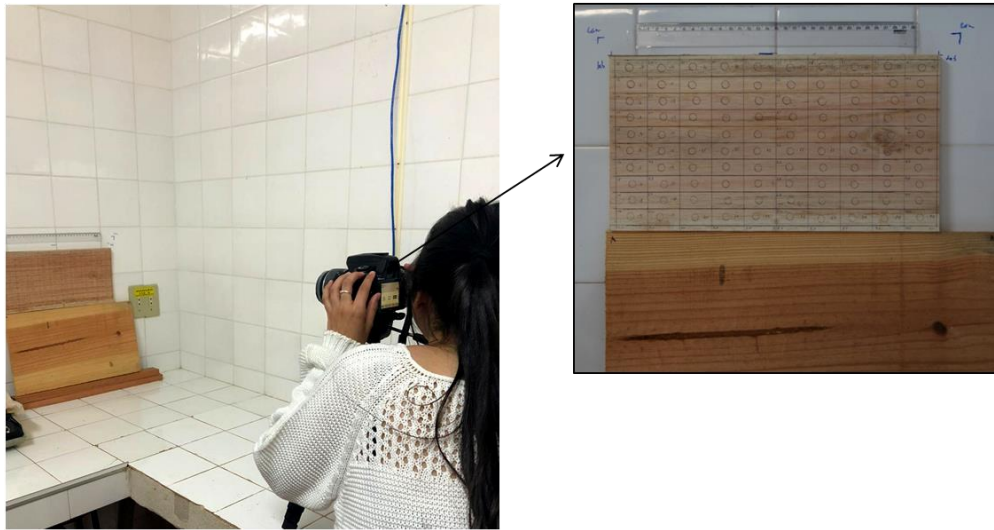
Figura 7: Etapas para o estudo das contrações da madeira.



Fonte: Da autora (2021).

Imagens da tábua controle foram obtidas a partir de uma câmera CCD digital posicionada em um tripé com distância padronizada (Figura 8). A captura das imagens foi realizada baseando na umidade da tábua controle. Assim, foram capturadas 5 imagens em diferentes condições de umidade (100%, 40%, 20%, 12% e 0% B.S). As imagens foram organizadas, preparadas e analisadas pelo software Image J. Em cada imagem foi utilizada a ferramenta múltiplos pontos, demarcando a interseção de cada linha vertical e horizontal contida na superfície da tábua controle. A partir das demarcações foi possível obter os valores das coordenadas de cada ponto em pixels.

Figura 8: Setup para aquisição de imagens digitais.



Fonte: Da autora (2021).

Uma linha fixa também foi utilizada como referência para as imagens. Assim foi traçada uma linha com coordenada (0,0). Baseando nessa linha foi calculada a variação que cada ponto teve em relação aos demais à medida que o material foi perdendo água adsorvida.

4.9. Processamento e análises de imagens

As imagens foram transferidas para o software ImageJ, onde foram cortadas, redimensionadas, demarcadas e analisadas. Na interseção das linhas verticais e horizontais foram adicionados pontos com o auxílio da ferramenta múltiplo pontos, totalizando 121 pontos (Figura 9). Em cada ponto continha a coordenada x e coordenada y, em pixel. A partir de uma régua presente na imagem foi possível traçar uma linha, estabelecer uma medida fixa em cm e realizar a conversão dos demais valores.

A distância de cada ponto de uma mesma imagem foi feita por meio do teorema de Pitágoras (Equação 3)

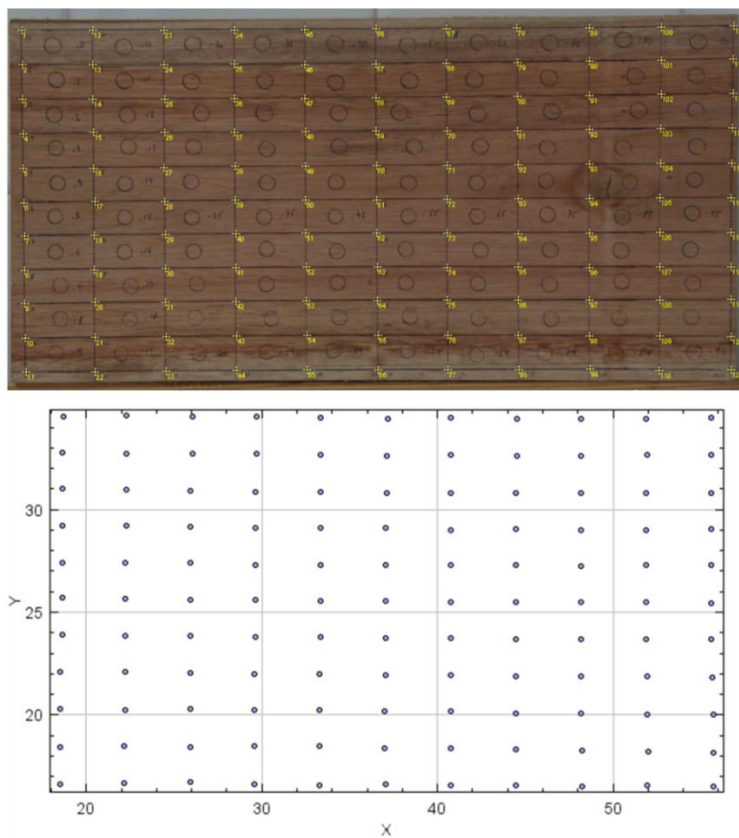
Equação 3:

$$a^2 + b^2 = c^2$$

O mesmo processo foi realizado para as demais imagens. Após obter a distância entre os pontos de cada tábua, essas distâncias foram comparadas com as distâncias dos pontos das demais tábuas.

Para demonstrar os vetores de mudança de posição das partículas durante a perda de água adsorvida, foi utilizado o plugin de análise de imagem de partículas (PIV). Para isso, as imagens foram abertas em seqüência, redimensionadas para 8 bits e inseridas na opção “interactive PIV advanced” (interação de PIV avançado).

Figura 9: Gráfico gerado a partir dos valores das coordenadas longitudinais e latitudinais dos pontos de marcação.



Fonte: Da autora (2021).

Além do uso do PIV, após as imagens terem sido transformadas em valores numéricos e matrizes, foi utilizado a partir de um script pré-definido o software scilab para gerar os mapas da variação superficial da umidade e contração durante o processo de secagem da madeira.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Dados de referência da calibração

5.1.1. Densidade básica

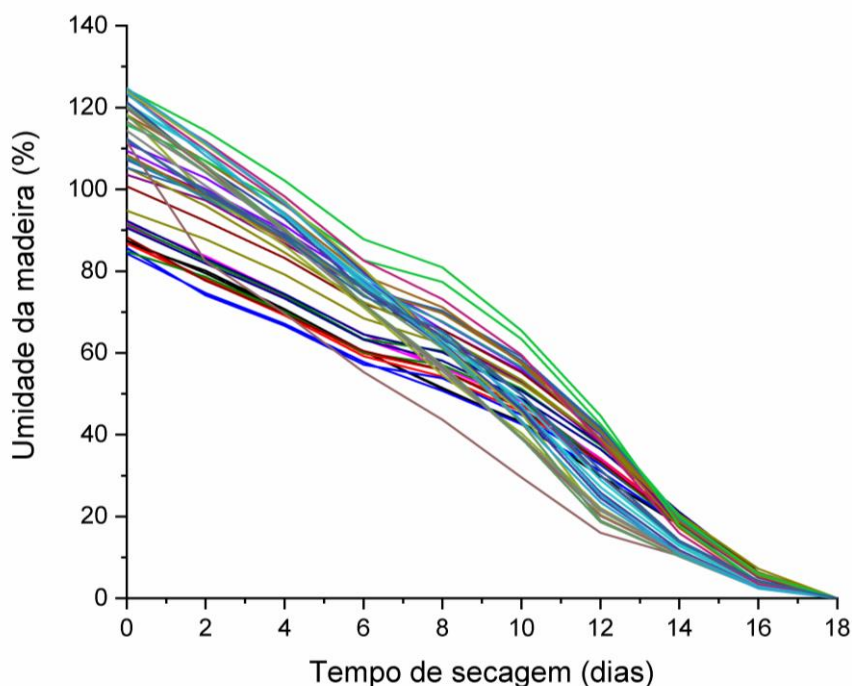
Os 45 corpos de prova utilizados para calibração apresentaram densidade básica média de 0.465 g/cm³, variando entre 0.400 a 0.503 g/cm³ e coeficiente de variação de 5.24%. Hein (2012) estudou híbridos de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, aos 6 anos de idade e relatou valor médio de densidade básica de 0.420 g/cm³ com valor mínimo de 0.288 g/cm³ e máximo de 0.617 g/cm³. A baixa variação dos valores de densidade básica do presente estudo pode estar relacionada aos corpos de prova ser provenientes de uma única tábua retirada a partir do pranchão central da tora e ao número reduzido de amostras utilizadas.

5.1.2. Umidade

Para os valores de umidade, a média foi de 52.27%, com mínimo de 0 e máximo de 124.71% e coeficiente de variação de 71.17%. Os resultados foram semelhantes a alguns trabalhos. Dos Santos (2017) estimou a dessorção de água na madeira de *Eucalyptus* e reportou valores de umidade média de 45.08%, variando de 0 à 252.62% com coeficiente de variação de 106.89%. Amaral (2018) avaliou a umidade em cavacos de madeira de *Eucalyptus* que apresentaram umidade média de 35.81% com mínimo de 0%, máximo de 148.65% e coeficiente de variação de 104.79%. O estudo desses autores estava nas mesmas condições de umidade e temperatura do presente estudo. O alto valor do coeficiente de variação obtido pela estatística descritiva se justifica devido suas umidades terem sido determinadas desde a condição saturada até a condição anidra.

Os valores de umidade foram determinados em laboratório desde a condição saturada até a condição anidra, sendo que do início até 14º dia a perda de água foi natural e do 14º ao 18º a secagem aconteceu em estufa convencional (Figura 10).

Figura 10: Perda de umidade dos corpos de prova em relação ao tempo de secagem.



De acordo com a Figura 10, a secagem natural foi finalizada com 14 dias e os corpos de prova apresentaram umidade de aproximadamente 16%. Esses resultados foram satisfatórios, principalmente devido o intuito da secagem ao livre ser realizada para que a madeira chegue à umidade de equilíbrio do ambiente (UE), sendo a secagem em estufa convencional necessária para atingir valores de umidade abaixo da UE.

É possível observar na Figura 10 que a madeira apresentou perda de umidade constante até 12º dia. A partir desse dia ocorreu uma redução na velocidade de secagem, estabilizando o teor de umidade (~22%) e dificultando a perda de água. Essa dificuldade na retirada de água da madeira está associada ao valor ser referente à água de impregnação e não livre (KLIZTKE, 2005).

5.2. Taxa de secagem

A Tabela 1 apresenta as taxas de secagem (TS) médias obtidas da condição recém abatida até o ponto de saturação das fibras (~30%), no qual a retirada é de água livre. De 30% à 16%, retirada de água adsorvida e a TS do estado recém abatida à 16%, remoção de água livre e adsorvida.

Tabela 1: Taxa de secagem natural da madeira de acordo com o tipo de água removida.

Faixas de umidade	T.S (U%. Dia ⁻¹) Média	CV%
Verde a 30%	6.80	24.04
30% a 16%	3.97	28.68
Verde a 16%	6.05	18.36

T.S = Taxa de secagem; CV = Coeficiente de variação.

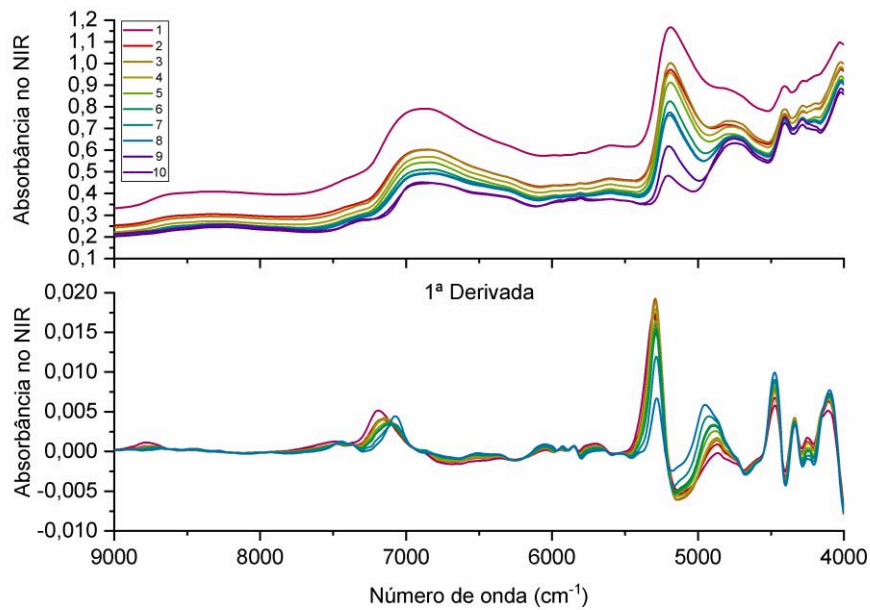
Na Tabela 1 é possível observar uma alta velocidade de secagem em todas as faixas de umidade analisadas. Esse comportamento pode ser justificado devido à pequena dimensão dos corpos de prova 25 mm (radial) x 10 mm (tangencial) x 25 mm (axial). A velocidade de secagem foi de aproximadamente duas vezes maior do que a retirada de água adsorvida. Segundo Nascimento et al. (2019) a retirada de água livre apresenta maior taxa de secagem em relação a água adsorvida, devido a água adsorvida da madeira estar aderida na parede celular.

Zen et al. (2019) avaliando a taxa de secagem ao ar livre de tábuas da madeira de *Eucalyptus spp.* com dimensões nominais de 25 mm x 110 mm x 2500 mm (espessura, largura e comprimento) observaram uma velocidade de secagem 6 vezes maior na retirada de água livre quando comparada a água adsorvida.

5.3. Assinatura espectral

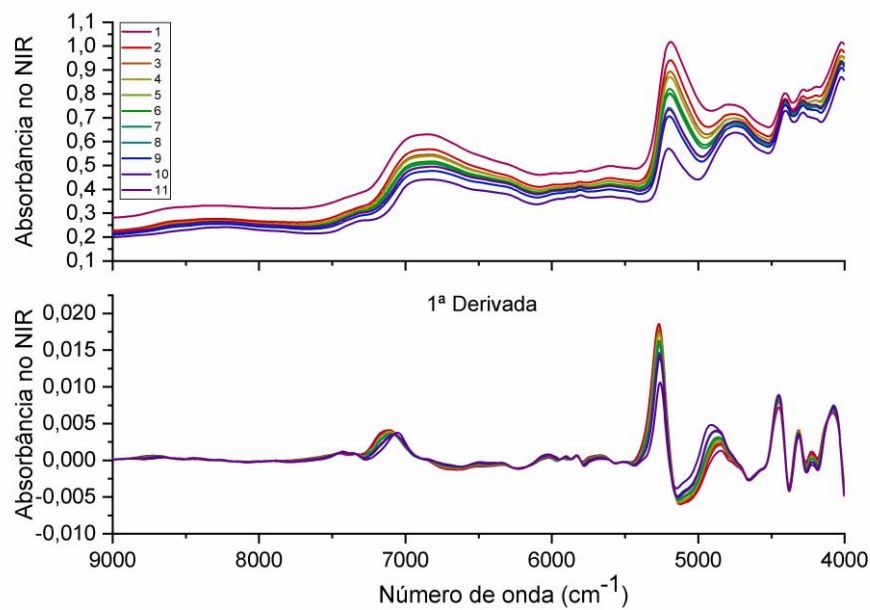
A média dos espectros NIR coletados em diferentes etapas de secagem para os corpos de prova da calibração e para a tábua controle podem ser vistos na Figura 11 e 12, respectivamente. Foram adquiridos espectros NIR com valores brutos e com o tratamento da primeira derivada, medidos de 9000 a 4000 cm⁻¹. Os espectros de ambos os materiais obtiveram comportamento parecidos quanto às bandas de absorção no NIR.

Figura 11: Médias dos espectros não tratados e tratados com a primeira derivada registrados nos corpos de prova de madeira em diferentes etapas de secagem



Fonte: Da autora (2021).

Figura 12: Médias dos espectros não tratados e tratados com a primeira derivada registrados na tábua controle em diferentes etapas de secagem.



Fonte: Da autora (2021).

Os maiores valores de absorvância podem ser visualizados em intervalos específicos do NIR chamados bandas. As bandas de absorção para madeira foram apresentadas por Schwanninger et al. (2011), em forma de número de onda. Assim, as vibrações das ligações químicas da molécula de água podem ser observadas nos espectros NIR.

Os maiores valores de absorvância NIR podem ser observados nos comprimentos de onda de aproximadamente 7.100 e 5.300 cm^{-1} ou (1.428 e 1.924 nm). Esses intervalos correspondem aos grupos funcionais específicos presentes na madeira (C-H, N-H, S-H ou O-H) e são altamente impactadas por variações no teor de umidade.

Esses valores estão de acordo com os resultados obtidos por Watanabe et al. (2011) que encontraram maior absorção no comprimento de onda de 1.430 e 1.910 nm e Costa et al. (2018) em que encontraram picos entre 5600 e 5400 cm^{-1} (1760-1820 nm). A variação nas bandas de absorção pode estar associada à variação do teor de umidade, uma vez que indicam vibrações características dos grupos hidroxila-OH presentes na água. Esses picos aumentam com o aumento do teor de umidade da madeira.

De acordo com Martens e Tormod (1989), os espectros tratados pela primeira derivada têm como objetivo melhorar a qualidade do sinal e diminuir os ruídos, a fim de se obter espectros de melhor qualidade. Assim pode-se observar que espectros submetidos ao tratamento da primeira derivada apresentaram menos ruídos quando comparados aos espectros brutos.

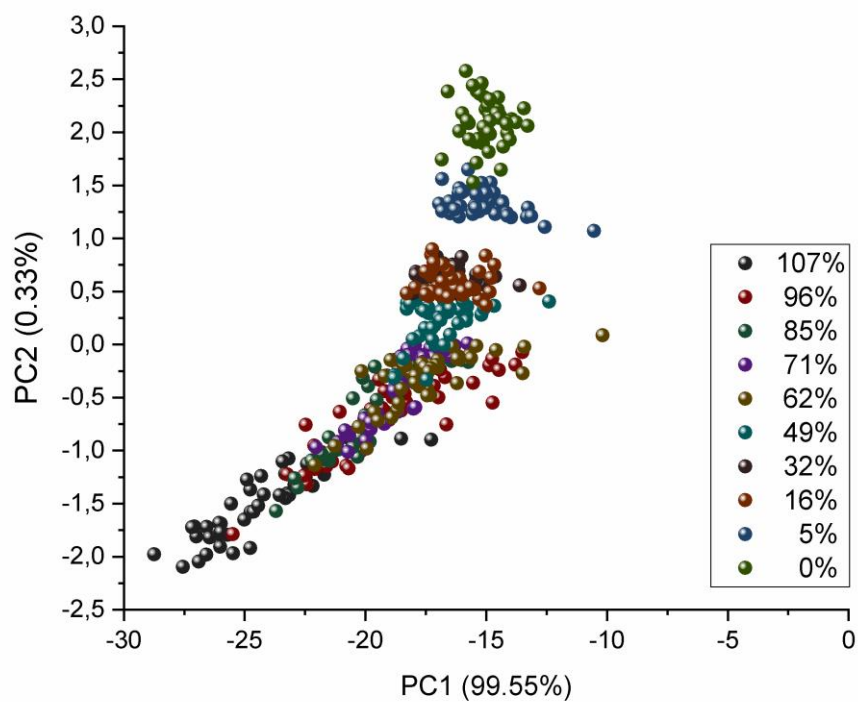
5.4. Análise de componentes principais (PCA)

Os escores da análise de componentes principais (PCA) realizada com os espectros dos corpos de prova e da tábua controle em diferentes fases de secagem foram plotados em gráfico bidimensional (Figura 13 e 14), respectivamente. Na figura 13, a componente principal 1 (PC1) e a componente principal 2 (PC2) explicaram juntas 99.88% da variação dos dados, dos quais 99.55% é explicado pelo PC1 e 0.33% é explicado pelo PC2. Na figura 14 a PC1 explicou 99.77% dos dados e a PC2 0.16%, totalizando 99.93% da variação dos dados explicadas.

Os espectros NIR se agruparam de acordo com a perda de água durante a secagem da madeira e no caso da Figura 14 etapa 11, com o ganho de umidade. As amostras mais secas apresentaram melhor agrupamento em relação às amostras mais úmidas. Esse comportamento pode ser justificado devido à alta variação do teor de umidade inicial das

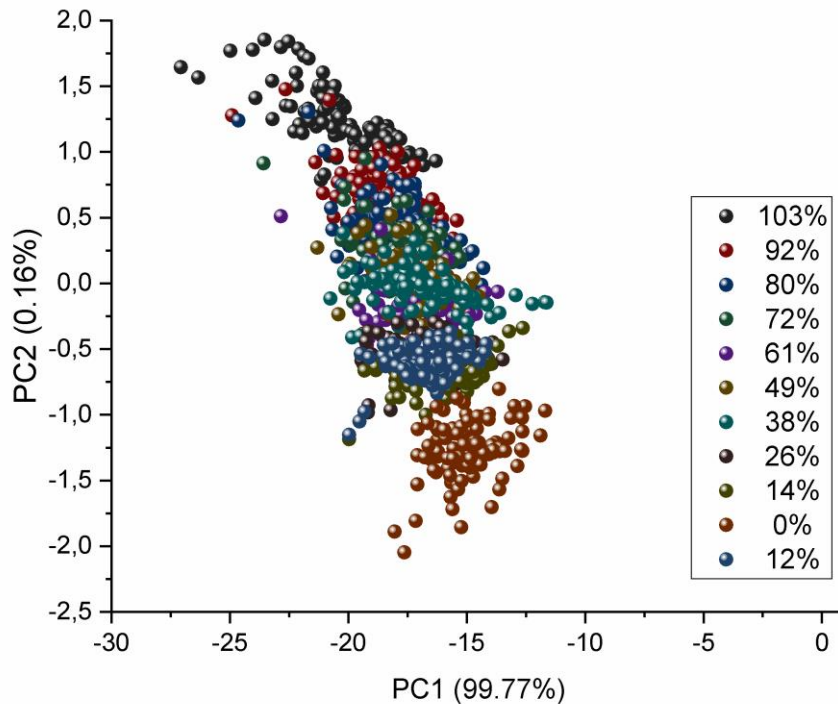
amostras e, na medida em que o material foi secando, os valores do teor de umidade diminuiu sua variação. O mesmo resultado foi observado por Amaral et al. (2020) ao utilizarem a técnica NIR para distinguir valores médios de umidade de cavacos de madeira em durante a secagem.

Figura 13: Análise de componentes principais de espectros NIR dos corpos de prova medidos durante a secagem da madeira.



Fonte: Da autora (2021).

Figura 14: Análise de componentes principais de espectros NIR da tábua controle medidos durante a secagem da madeira.



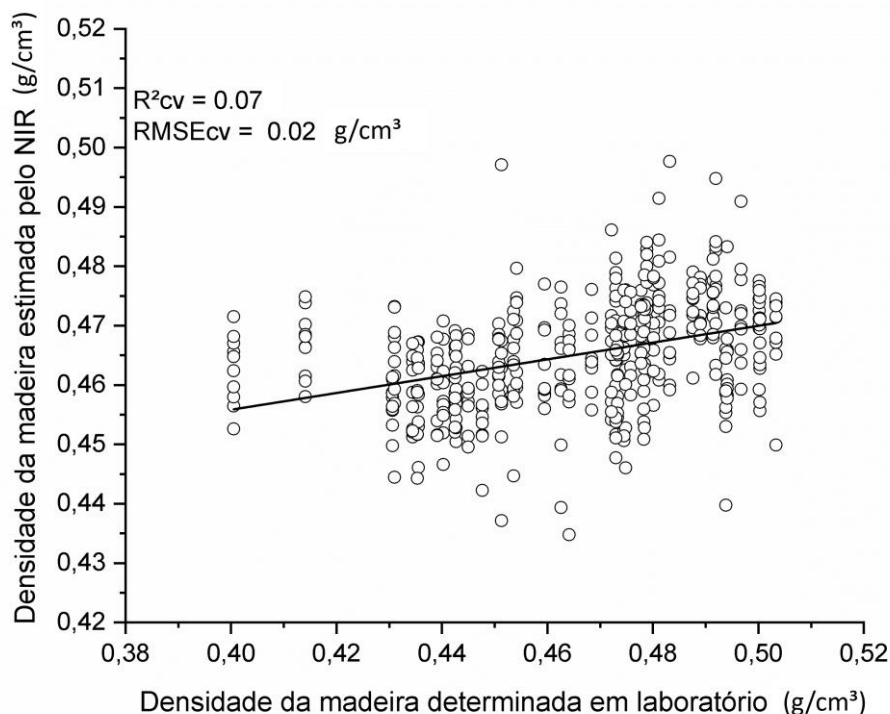
Fonte: Da autora (2021).

5.5. Modelos de calibração e validação a partir da PLS-R

5.5.1. Densidade

Para a densidade básica da madeira, o modelo com os dados sem tratamentos não forneceu correlações satisfatórias (Figura 15). Ao separar os dados por classe ou aplicar alguns tratamentos como a primeira derivada, normalização e excluir os números de onda de 9000 a 12000 cm^{-1} , não houve melhora nas estatísticas do modelo para a densidade básica.

Figura 15: Modelos de calibração e validação cruzada estimativa da densidade básica da madeira a partir de espectros NIR.



R^2_{cv} – coeficiente de determinação da validação cruzada; $RMSE_{cv}$ – erro padrão da validação.

Fonte: Da autora (2021).

Os valores obtidos de $R^2_{cv} = 0,07$ e $RMSE_{cv} = 0,02 \text{ g/cm}^3$ no modelo de validação cruzada (Figura 15), não foram satisfatórios para estimar a densidade básica. Esse resultado pode estar associado ao fato de os valores de densidades básicas estarem próximos. Por ter utilizado apenas uma peça (tábua) localizada na região central do pranchão, não houve variação significativa de densidade básica. Além disso, utilizou 45 corpos de prova, esse número de amostras pode não ter sido suficiente para ter variações e estimar a densidade básica da madeira. Para que o modelo funcione bem é importante que exista variação nos valores de densidade.

5.5.2. Umidade

As estatísticas associadas a PLS-R do modelo global e utilizadas nos modelos PLS-DA são apresentadas na Tabela 2 e, o gráfico geral dos coeficientes de regressão são mostrados na Figura 16. Esses modelos PLS-R foram desenvolvidos para estimar valores contínuos do modelo global e em cada uma das três categorias de umidade (0-40%; 40-80% e >80%).

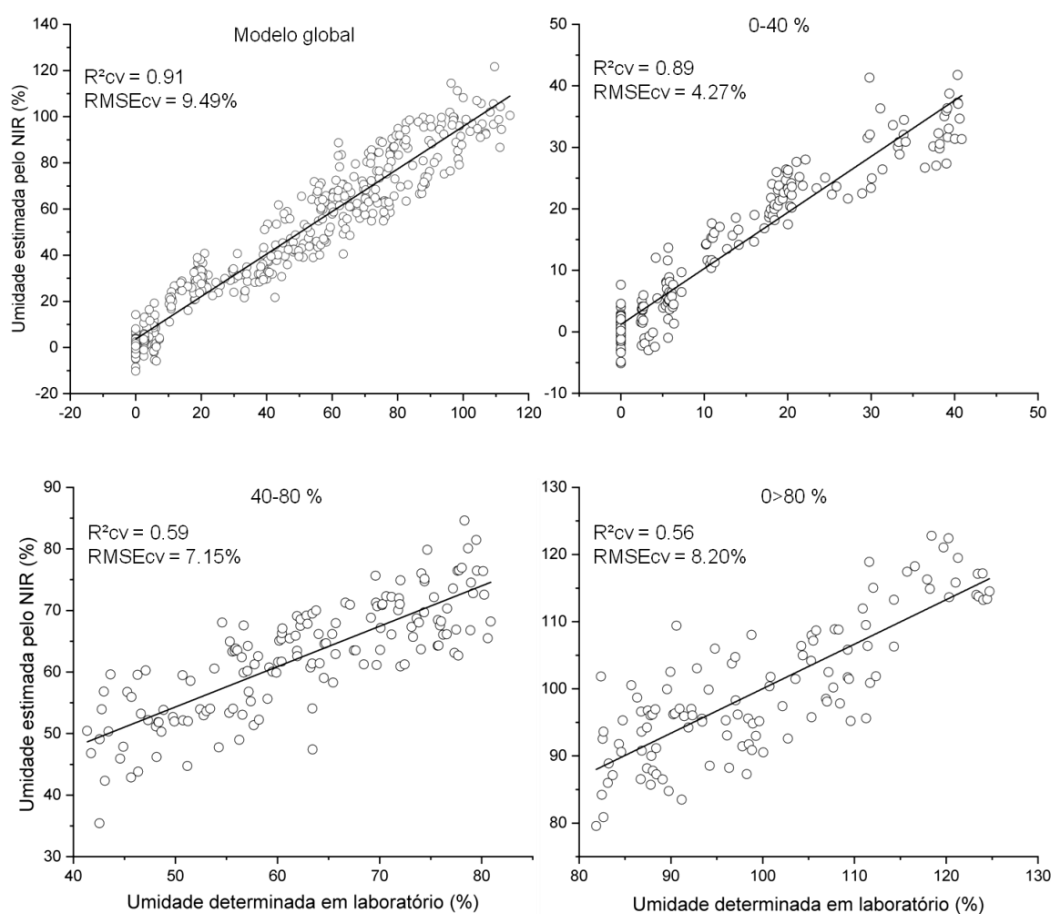
Tabela 2: Modelos de calibração e validação cruzada estimativa da densidade básica da madeira a partir de espectros NIR.

Modelos	Trat	R ² _c	RMSE _c (%)	R ² _{cv}	RMSE _{cv} (%)	RPD
Modelo Global	(-)	0.92	9.49	0.91	9.81	3.42
	1d	0.91	9.58	0.90	10.22	3.38
0-40%	(-)	0.91	3.92	0.89	4.27	3.20
	1d	0.88	4.37	0.86	4.84	2.83
40-80%	(-)	0.65	6.53	0.56	7.15	1.38
	1d	0.64	6.61	0.53	7.60	1.35
>80%	(-)	0.66	7.19	0.56	8.20	1.40
	1d	0.73	6.33	0.62	7.61	1.68

Trat – tratamento matemático; (-) – dados originais; 1d – primeira derivada; R²_c – coeficiente de determinação da calibração; RMSE_c – erro padrão da calibração; R²_{cv} – coeficiente de determinação da validação cruzada; RMSE_{cv} – erro padrão da validação; RPD – relação de desempenho do desvio padrão.

Fonte: Do autor (2021).

Figura 16: Modelos de calibração e validação cruzada estimativa da umidade da madeira a partir de espectros NIR.



R^2_{cv} – coeficiente de determinação da validação cruzada; $RMSE_{cv}$ – erro padrão da validação

Fonte: Da autora (2021).

A Tabela 2 mostra que dentre as classes de umidade, a classe de 0 a 40%, foi a que apresentou as melhores estimativas de umidade da madeira, resultando em R^2_{cv} de 0.89 e $RMSE_{CV}$ de 4.27%, o que indica que este modelo é adequado para estimar a umidade da madeira

Os valores obtidos de R^2_{cv} e $RMSE_{cv}$ no modelo global de validação cruzada (Tabela 2) foram maiores que em estudos semelhantes. Dos Santos et al. (2020) utilizando a espectroscopia no NIR por meio da fibra ótica para estimar a dessecção de água em amostras de madeira de *Eucalyptus*, encontraram resultados de R^2_{cv} de 0.83 e $RMSE_{cv}$

de 20.51%. Amaral et al. (2020), utilizando a espectroscopia no NIR para estimar a umidade em cavacos de madeira, obtiveram valores de $R^2 = 0.90$ de e $RMSE = 11.86\%$.

As três classes de umidade (0% a 40%, 40% a 80% e > 80%) foram realizadas para gerar modelos capazes de prever a umidade da madeira por classificação usando PLS-DA. Uma matriz confusão foi apresentada na Tabela 3 para avaliar a razão de classificação correta.

Tabela 3: Matriz de confusão da predição da umidade da madeira com base nos espectros NIR através do modelo global.

Umidade Nominal %	Umidade estimada pelo NIR %			Classificação correta		Total de amostras
	0-40	40-80	>80	No. Correta	%	
0-40	180	2	0	180	98.90	182
40-80	38	93	19	93	62.00	153
>80	0	26	89	89	77.39	115

Os modelos PLS-DA apresentaram uma grande porcentagem de classificações corretas para madeira da classe 0-40%, resultando em 98.90% de acertos, exceto duas amostras que foram confundidos com a classe de umidade de 40-80%. No entanto, os erros de classificação não desvalorizam o método, pois é um número baixo. Na classe de 40-80% houve um número maior de incorretas, amostras confundidas tanto com a classe de 0-40 como com valores >80% de umidade. Trinta e oito das 153 amostras pertencentes a classe de 40-80% foi confundida e classificada como 0-40%. Já 19 amostras foram classificadas erroneamente como >80% de umidade. Para as amostras >80% de umidade, 26 foram classificadas de forma errada na classe 40-80%, totalizando 77.39% de acertos. Em suma, a classificação das amostras de madeira utilizando a PLS-DA a partir espectros NIR não tratados apresentam alta porcentagem de sucesso (62 a 98.90%), indicando boa eficiência dos modelos de classificação.

Em comparação com as classificações da Tabela 3, a classe de 40-80% de umidade ficou ainda mais mista, resultando na maior taxa de classificação incorreta (62%). É provável que esses erros de classificação ocorram porque os valores de umidade nessa faixa são mais difíceis de diferenciar.

Diante disso, como o modelo global apresentou valores de R^2v e $RMSEcv$ satisfatórios (Tabela 2), o mesmo foi utilizado para gerar o modelo de predição da umidade a partir dos espectros NIR (Tabela 4). A regressão dos valores de umidade da madeira obtidos em laboratório e estimados no NIR podem ser visualizados na Figura 17.

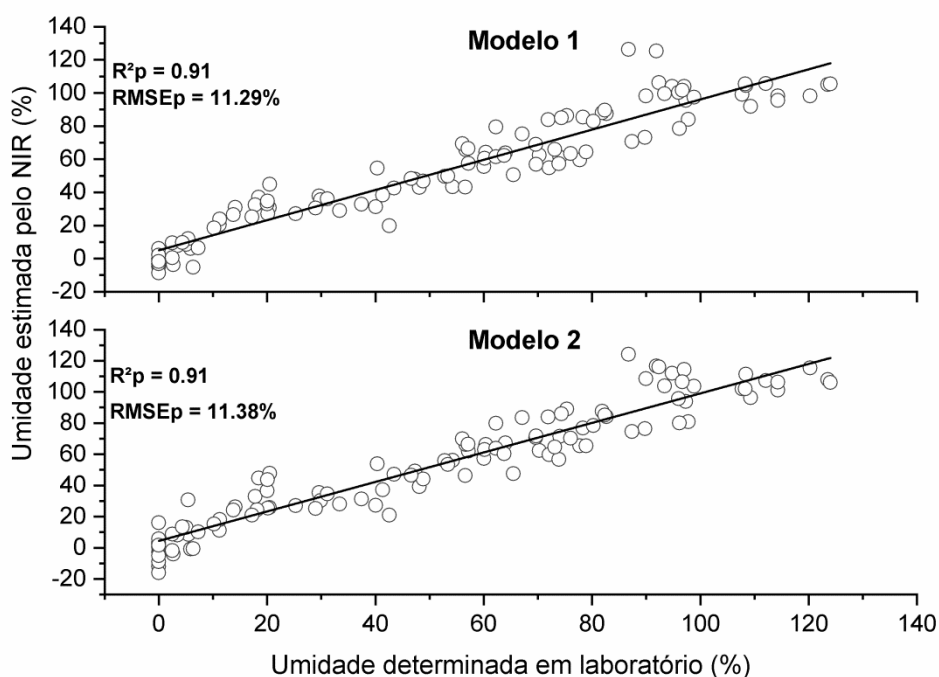
Tabela 4: Modelo de predição para estimar a umidade da madeira a partir de espectros NIR.

Modelo	1	2
R^2p	0.91	0.91
RMSEp	11.29	11.38
RPD	3.15	3.24
VL	7	7

R^2p – coeficiente de determinação para a validação externa; RMSEP – erro médio quadrático para a validação externa; RPD – relação de desempenho do desvio padrão; VL– Variável latente.

Fonte: Do autor (2021).

Figura 17: Gráfico dos modelos de regressão dos valores de umidade da madeira obtidos em laboratório e estimados pelo NIR de acordo com a Tabela 4.



R^2p – coeficiente de determinação para a validação externa; RMSEP – erro médio quadrático para a validação externa.

Fonte: Da autora (2021).

Os valores do coeficiente de determinação e erro médio quadrático para a validação externa apresentaram estatísticas satisfatórias com $R_p = 0.91$ e $RMSEP = 11.29\%$ (Figura 13). Esses valores foram semelhantes a outros estudos. Watanabe et al. (2011) utilizando o NIR para realizar a classificação da umidade da madeira verde do abeto, verificou que o NIR é eficiente na determinação da umidade independente com R^2_p de 0.93 e RMSEP de 5.7%. Santos et al. (2020) utilizando a fibra ótica para medir espectros NIR no monitoramento da perda de água durante a secagem da madeira, obtiveram valores de $R^2_p = 0.85$ e $RMSEP = 15.05\%$.

De acordo com a Figura 17, não houve melhora no modelo após aplicação da primeira derivada, dessa forma para o presente estudo, não se faz necessário a aplicação de tratamentos matemáticos.

Além dos valores de R^2_{cv} , $RMSE_{cv}$, R^2_p e $RMSEP$, a relação de desempenho do desvio padrão (RPD) é um parâmetro importante para ser avaliado. Segundo Williams e Sobering (1993) valores de RPD entre 3 e 5 indicam que as calibrações do modelo são satisfatórias para as predições. Assim de acordo com os resultados o modelo se mostrou satisfatório, com RPD de 3.15.

5.6. Variação espacial da umidade da madeira

A Tabela 5 apresenta os valores estimados de umidade em cada etapa de secagem. Etapa de 1 à 10 mostra a perda de água (condição saturada à anidra) e de 10 à 11 o ganho de água (condição anidra à umidade de equilíbrio-UE).

Tabela 5: Dados de referência da umidade superficial da madeira coletada em 11 etapas.

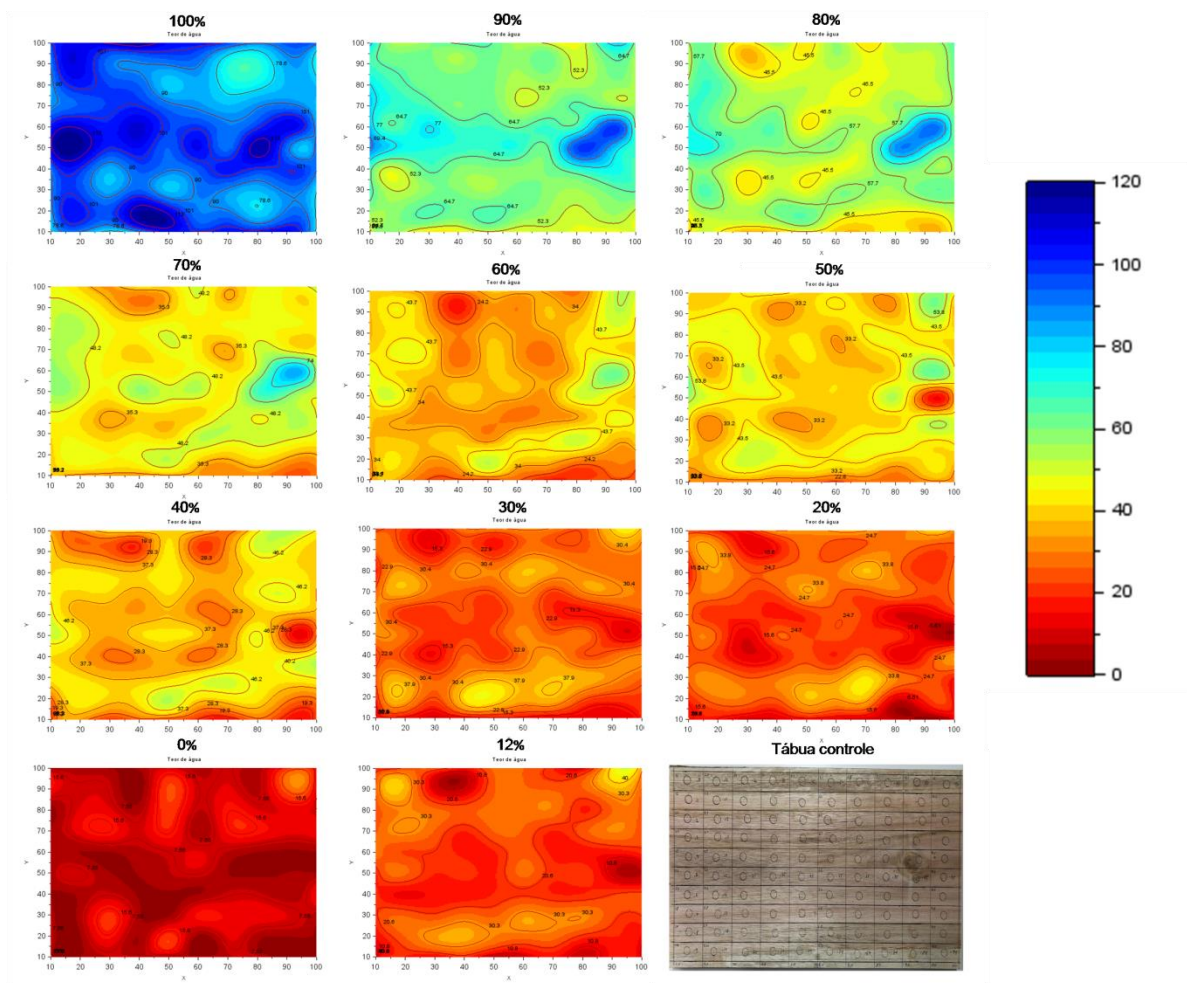
Etapa	Máx%	Mín%	DP	Média%	MédiaI%	MédiaE%	CV%
1	121.61	69.98	11.21	94.59	90.88	101.00	11.85
2	98.12	41.58	10.62	62.53	64.73	52.34	16.99
3	91.24	33.82	9.79	54.54	57.76	45.57	17.96
4	83.90	23.64	8.66	44.52	48.25	35.38	19.46
5	61.48	16.13	7.81	36.19	34.76	24.29	21.59
6	60.05	15.60	7.55	40.55	33.25	22.87	18.64
7	55.19	14.46	8.60	36.67	28.39	19.38	23.45
8	43.51	7.83	7.72	24.96	22.98	15.33	30.93
9	41.34	1.58	8.39	22.24	22.76	15.24	37.74
10	24.65	0.19	5.55	6.94	15.67	7.56	79.99
11	42.24	5.00	7.12	21.08	20.69	10.88	33.79

Máx = máximo; Mín = mínimo; DP = desvio padrão; MédiaI= média interna; MédiaE= média externa; CV= coeficiente de variação.

Fonte: Da autora (2021).

A Tabela 5 nos mostra que as médias das umidades foram diminuindo de acordo com a secagem da madeira. Além disso, ao analisar as médias internas e externas foi possível observar que da etapa 1 a 7, a extremidade da peça perdeu aproximadamente 11% de água mais rápido quando comparada a região central. Na etapa 8 a 10 essa diferença diminui (~7%), visto que a maior parte da umidade da superfície estava abaixo do ponto de saturação das fibras. Na Figura 18 é possível visualizar a variação superficial da umidade da madeira em uma mesma peça de madeira durante a secagem.

Figura 18: Gráfico da distribuição espacial da perda e ganho de água na madeira.



Fonte: Da autora (2021).

Na Figura 18 é possível observar que inicialmente as extremidades da peça de madeira apresentavam umidades elevadas e, à medida que a madeira foi perdendo água, suas extremidades perderam água com maior velocidade em relação ao interior da peça. Este resultado está de acordo com o trabalho de Kobori et al. (2013). Os autores aplicaram a espectroscopia no NIR para monitorar a umidade de amostras de *Fagus sylvatica* e *Pinus sylvestris* durante a secagem natural. A variação da umidade foi expressa por 256 níveis de cinza com resolução cinza de 8 bits, onde o preto indicava o máximo de umidade (200%) e branco indicava o mínimo (0%). A partir dos resultados, os autores puderam constatar que a umidade da borda externa das amostras das duas espécies de madeira diminuiu com maior velocidade em relação a região central.

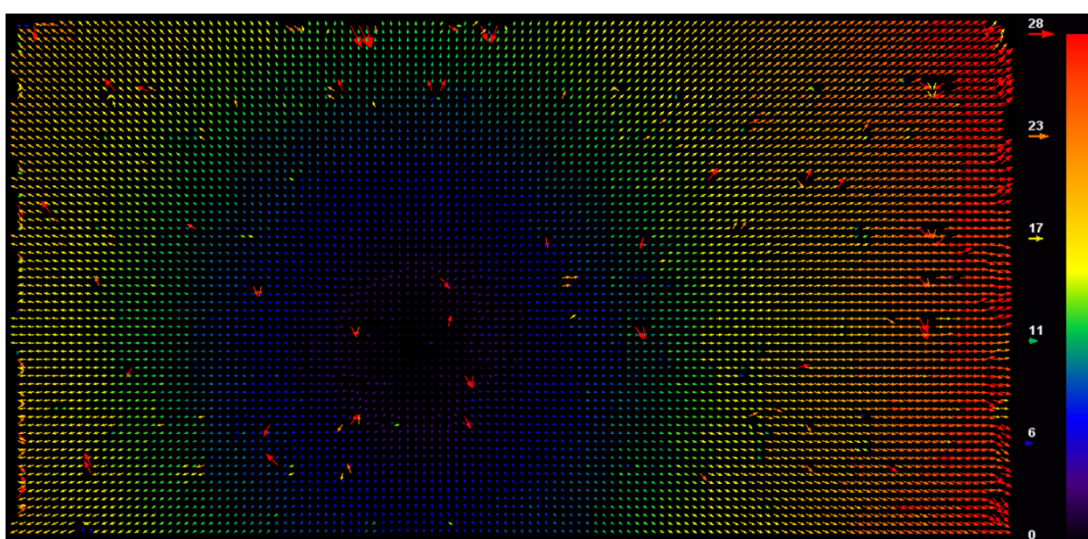
No valor de umidade de 0% à 12%, onde ocorreu o ganho de água, a madeira teve absorção pelas extremidades, o que condiz com o mecanismo de absorção de água pelo

material. Além disso, a região destacada de azul na umidade de 60%, pode ter ocorrido devido a um nó existente nesse local da tábua controle, como mostra a Figura 18.

5.7. Variação espacial das contrações da madeira

A partir da velocimetria de imagens por partículas foi possível analisar a direção dos vetores durante a secagem do material. Além disso, foi possível visualizar as regiões onde ocorreram as maiores deformações (Figura 19).

Figura 19: Gráfico de vetores PIV da secagem da madeira.

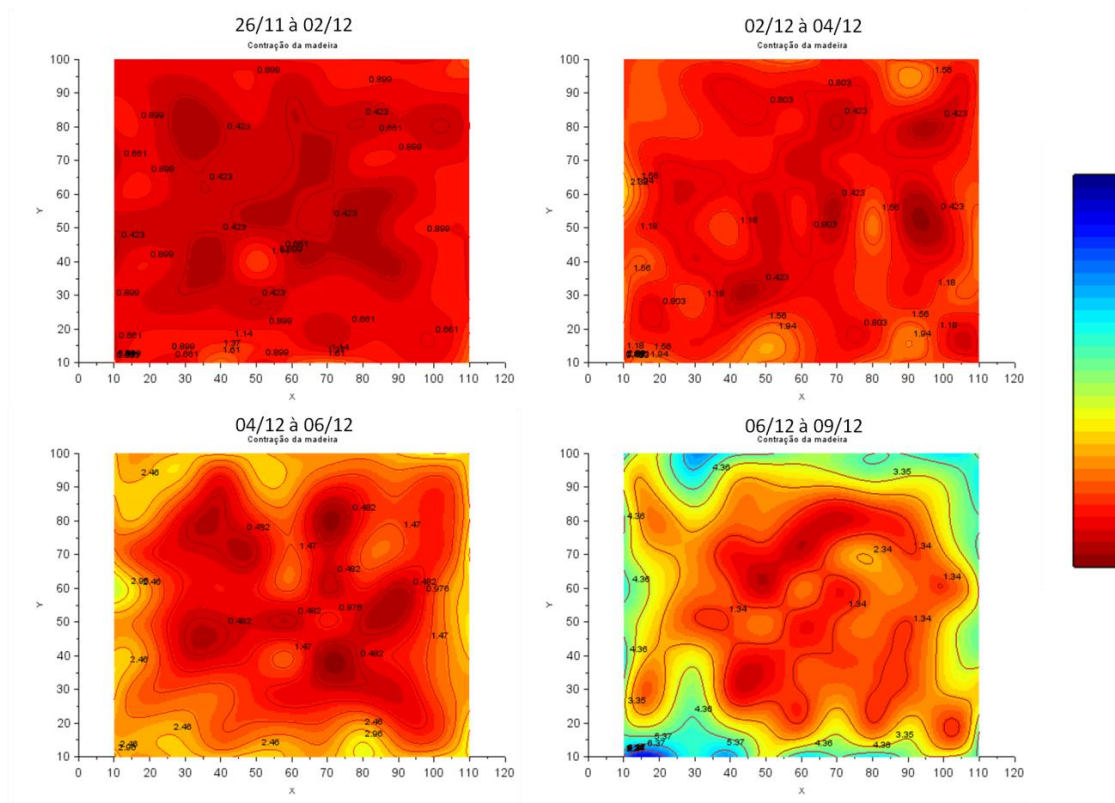


Fonte: Da autora (2021).

A partir da Figura 19, foi possível visualizar que as maiores contrações ocorreram nas extremidades do material. Esse resultado condiz com a variação de umidade encontrada na peça, visto que foram na região exterior próxima a casca os maiores valores de umidade inicial e maiores perdas de umidade durante a secagem. Já a região central do material com menor umidade inicial, foi a parte mais difícil de perder água, consequentemente de se contrair.

À medida que a madeira foi perdendo água ao longo dos dias, foi possível visualizar as contrações do material (Figura 20), o qual seguiu o mesmo padrão apresentado pelo gráfico de vetores PIV.

Figura 20: Variação espacial das contrações da madeira durante a secagem.



Fonte: Da autora (2021).

De acordo com a Figura 20, os valores médios de contração interna foram de aproximadamente 0.423, 0.516, 0.976 e 1.34 mm. Enquanto os valores médios de contração externa foram de 0.899, 1.180, 2.460 e 4.360 mm, respectivamente.

As contrações começaram a acontecer em maiores proporções nos dias 04/12 ao dia 06/12, período em que a maior parte da umidade da parte externa do material estava abaixo de 30%. Como a região interna da peça ainda possuía umidade mais elevada e difícil de perder, ocorreu menores contrações nessa região.

Quando comparada a contração da parte interna com a externa é possível perceber que ao final da secagem, a contração na parte externa foi cerca de 3 vezes maior em relação a interna.

O estudo da contração da madeira via PIV e análises de imagens ainda é pouco encontrado na literatura. Existem aplicações dessa técnica para outros tipos de materiais, mas devido a madeira ser um material heterogêneo, é necessário estudos mais profundos que comprovem a eficácia das técnicas em diversas situações.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os modelos para estimativa da umidade da madeira apresentaram estatísticas satisfatórias para validação cruzada ($R^2_{cv}=0.92$, $RMSE_{cv}=9.82\%$ e $RPD=3.31$) e predição ($R^2_p = 0.91$, $RMSE_p=11.29\%$ e $RPD=3.15$). Além disso, ao separar as umidades por classes, o melhor modelo foi obtido pela classe de 0 à 40% com valores de $R^2_{cv}=0.89$ e $RMSE_{cv}=4.27\%$. Já para a estimativa da densidade básica o modelo não apresentou resultados satisfatórios com $R^2_{cv} = 0.07$ e $RMSE_{cv}=0.02\%$, isso pode ter ocorrido devido a baixa variação dos valores de densidade básica do material. Durante a secagem dos corpos de prova, observou uma alta velocidade de secagem em todas as faixas de umidade analisadas. Esse comportamento pode ser justificado devido à pequena dimensão dos corpos de prova. Além disso, a velocidade de secagem foi de aproximadamente duas vezes maior para retirada de água livre, quando comparada a retirada de água adsorvida. A partir das imagens gráficas foi possível visualizar e quantificar a variação espacial da umidade e contração da madeira. As extremidades do material apresentaram valores de umidades iniciais elevados em relação ao centro da peça. Contudo, a perda de umidade foi aproximadamente 11% maior nas extremidades da peça quando comparada com seu interior, o que condiz com o mecanismo de secagem da madeira. Já em relação a contração, a externa foi 3 vezes maior em relação a do interior da peça. A aquisição espectral via NIR e a análise de imagens são ferramentas eficientes para estimar a umidade e contração da madeira, respectivamente. Contudo, devido a madeira ser um material heterogêneo, estudos mais profundos ainda devem ser realizados para a contração da madeira via PIV e análises de imagens.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: Madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003, 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14929**: Madeira: determinação do teor de umidade de cavacos - método por secagem em estufa. Rio de Janeiro, 2017. 3p.

ADIA, D. S. et al. Exploration of unutilized fast growing wood species from secondary forest in central kalimantan: study on the fiber characteristic and wood density. **Procedia Environmental Sciences**, v. 20, p. 321 - 327, 2014.

ALMEIDA, D. H. et al. Determinação da rigidez de *Pinus elliottii* em diferentes teores de umidade por meio de ensaios mecânicos não destrutivos. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 110, p. 303-309, 2016.

AMARAL, E. A. **Estimativa da umidade em cavacos de madeira por espectroscopia no infravermelho próximo**. 2018. 58 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.

AMARAL, E. A. et al. Estimation of moisture in Wood chips by near infrared spectroscopy. **Maderas: Ciencia y tecnologia**, Chile, v. 22, n. 3, p. 291-302, 2020.

ARRIEL, T. G. et al. Developing near infrared spectroscopic models for predicting density of eucalyptus wood based on indirect measurement. **Cerne**, Lavras, v. 25, n. 3, p. 294 - 300, 2019.

BARROS, S. et al. Colagem de madeira de eucalipto com adesivos naturais. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 3, 2018.

BRISCHKE, C.; MEYER-VELTRUP, L.; BORNEMANN, T. Moisture performance and durability of wooden facades and decking during six years of outdoor exposure. **Journal Build**, v. 13, p. 207–215, 2017.

BRISCHKE, C.; RAPP, A.O.; BAYERBACH, R. Measurement system for long-term recording of wood moisture content with internal conductively glued electrodes. **Build Environ**, v. 43, p. 1566–1574, 2008.

BURGER L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da Madeira**. São Paulo: Ed. Nobel, 154p. 1991.

CAMPOS, M. C. M. M.; TEIXEIRA, H. C. G. **Controles típicos de equipamentos e processos industriais**. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2010. 396 p.

COGDILL, R. P. et al. Estimation of the physical wood properties of *Pinus taeda* L radial strips using least square support vector machines. **Journal Near Infrared Spectroscopy**, v. 12, p. 263 - 269, 2004.

COSTA, E. V. S. et al. Influence of spectral acquisition technique and wood anisotropy on the statistics of predictive near infrared–based models for wood density. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 26, n. 2, p. 106 -116, 2018.

DEFO, M.; TAYLOR, M.; BOND, B. Determination of moisture content and density of fresh-sawn red oak lumber by near-infrared spectroscopy. **Forest Products Journal**, v. 57, p. 68-72, 2007.

DINIZ, C. P. et al. Near infrared-based models for lignin syringyl/guaiacyl ratio of *Eucalyptus benthamii* and *E. pellita* using a streamlined thioacidolysis procedure as the reference method. **Wood Science and Technology**, v.53, p. 521–533, 2019.

DOS SANTOS, L. M. **Monitoramento da dessorção de água na madeira por espectroscopia no infravermelho próximo**. 2017. 56 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) -Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

DOS SANTOS, L. M. et al. Estimating Wood moisture by near infrared spectroscopy: Testing acquisition methods and wood surfaces qualities. **Wood Material Science and Engineering**, v. 16, n. 5, p. 1-8, 2020.

FUJIMOTO T. et al. Application of near infrared spectroscopy for estimating wood mechanical properties of small clear and full lengthlumber specimens. **Journal Near Infrared Spectrosc**, v. 16, p. 529-537, 2008. <https://doi.org/10.1255/jnirs.818>

FUJIMOTO, T. et al. Visualisation of spatial distribution of moisture content and basic density usingnear-infrared hyperspectral imaging method in sugi (*Cryptomeria japonica*). **Journal of Wood and Wood Products**, v. 6, n. 2, p. 46–48, 2015.

GOMES, D. F. F. et al. Avaliação da estabilidade dimensional da madeira acetilada de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 70, p. 125 - 130, 2006.

HADDADI, A. et al. Determination of optical parameters and moisture content of wood with visible- near infrared spectroscopy. **Journal Near Infrared Spectrosc**, v. 24, n. 6, p. 571-585, 2016.

HAIN, R.; KÄHLER, C. J. Fundamentals of multiframe particle image velocimetry (PIV). **Experiments in Fluids**, v. 42, n. 4. p. 575-587, 2007.

HANNICKEL, A. et al. ImageJ como ferramenta para medida da área de partículas de magnetita em três escalas nanométricas. **Congresso de Engenharia Mecânica e de Materiais** - Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro, 2012.

HANS, G. et al. Monitoring of moisture content and basic specific gravity in black spruce logs using a handheld MEMS-based near-infrared spectrometer. **The Forestry Chronicle**, v. 89, n. 5, p. 605-618, 2012.

HEIN, P. R. G. et al. Age trends of microfibril angle inheritance and their genetic and environmental correlations with growth density and chemical properties in *Eucalyptus urophylla* ST Blake wood. **Annals of Forest Science**, v. 69, n. 6, p. 681-691, 2012.

HEIN, P. R. G.; LIMA, J.T.; CHAIX, G. Robustness of models based on near infrared spectra to predict the basic density in *Eucalyptus urophylla* wood. **Journal Near Infrared Spectroscopy**, v. 17, n. 3, p. 141-150. 2009.

HEIN, P. R. G.; PAKKANEN, H. K.; DOS SANTOS, A. A. Challenges in the use of Near Infrared Spectroscopy for improving wood quality: A review. **Forest Systems**, v. 26, n. 3, 10p, 2017.

INAGAKI, T. et al. *Eucalyptus camaldulensis* density and fiber length estimated by near-infrared spectroscopy. **Wood Science Technology**, v.46, n. 1, p. 143–155, 2012.

ISAKSSON, T.; THELANDERSSON, S. Experimental investigation on the effect of detail design on wood moisture content in outdoor above ground applications. **Build. Environ.** v. 59, p. 239-249, 2013.

KITAMURA R, INAGAKI T, TSUCHIKAWA S. Determination of true optical absorption and scattering coefficient of wooden cell wall substance by time-of-flight near infrared spectroscopy. **Optics Express**, v. 24. n.4, p. 3999-4009, 2016.

KLITZKE, R.J. **Manual de secagem de madeira**. Apostila técnica. Curitiba, 119p. 2005

KOBORI, H. et al. Applicability of Vis-NIR hyperspectral imaging for monitoring wood moisture content (MC). **Holzforsch.** v. 67, n. 3, 2013.

LEBLON, B. et al. A review of near-infrared spectroscopy for monitoring moisture content and density of solid wood. **The Forestry Chronicle**, v. 89, n. 5, p. 595-606, 2013.

LI, W. et al. Combining electrical resistance and 3-D X-ray computed tomography for moisture distribution measurements in wood products exposed in dynamic moisture conditions. **Build Environ**, v. 67, p. 250–259, 2013.

LOGSDON, N. B.; FINGER, Z.; BORGES, C. G. A. Caracterização físico-mecânica da madeira de peroba-mica, *Aspidosperma populifolium* A. DC. (Apocynaceae). **Floresta**, v. 38, n. 1, 2008.

LOGSDON, N. B.; FINGER, Z.; PENNA, E. S. Caracterização físico-mecânica da madeira de Cedro-marinheiro, *Guarea trichilioides* L. (Meliaceae). **Scientia Forestalis**, v. 36, n. 77, p. 43-51, 2008.

MARTENS, H. E.; TORMOD, N. **Multivariate calibration**. New York: J. Wiley, 1989. 428 p.

MASCARENHAS, N. D. A.; VELASCO, F. D. R. **Processamento Digital de Imagens**. 2ª edição. IV Escola Brasileiro-Argentina de Informática, Termas de Rio Hondo, Argentina, 1989.

MATTOS, B. D. et al. Variação axial da densidade básica da madeira de três espécies de gimnospermas. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, Viçosa, v.6, n.1, p.121-126, 2011.

MELO, R. R. et al. Estudo da Variação da Densidade Básica de Sete Madeiras do Semi-Árido. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, Garça, v. 4, n. 7, 2006.

MENDES, M. L. et al. Variação da densidade da madeira de *Pinus*. **Revista da Madeira**, Caxias do Sul, n. 83, ago. 2004.

MORA, C. R. et al. Determination of basic density and moisture content of merchantable loblolly pine logs by near-infrared spectroscopy. **Journal Near Infrared Spectroscopy**, v. 19, n. 5, p. 391- 399, 2011.

MORA, C. R.; SCHIMLECK, L. R.; ISIK, F. Near infrared calibration models for the estimation of wood density in *Pinus taeda* using repeated sample measurement. **Journal Near Infrared Spectroscopy**, v. 16, n. 6, p. 517-528. 2008.

MORESCHI, J. C. **Propriedades Tecnológicas da Madeira** – Manual Didático. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UFPR, 168p. 2005.

NAES, T. et al. User-Friendly Guide to Multivariate Calibration and classification. **Journal of Chemometrics**, v. 17, n. 10, p. 571-572, 2002.

NASCIMENTO, T. M. et al. Drying influence on the development of cracks in Eucalyptus logs. **Bioresources**, v.14, n.1, p. 220-233, 2019.

OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA, J. C. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm. **Revista Árvore**, v. 27, n. 3, p. 381-385, 2003.

OSAWA, T.; MAEDA, K.; SHIDA, S. Effect of water absorption from surface checks on the moisture retention in wood deck exposed outdoor. **Mokuzaihozon (Wood Protection)**, v. 44, p. 67–80, 2018.

OTTEN K.A.; BRISCHKE C.; MEYER C. Material moisture content of wood and cement mortars - Electrical resistance-based measurements in the high ohmic range. **Construction and Building Materials**, v. 153, p. 640–646, 2017.

PASQUINI, C. Near infrared spectroscopy - A mature analytical technique with new perspectives - A review. **Analytica Chimica Acta**, v.1026, p. 8–36, 2018.

PECORARO, E. et al. Measuring the Chemical composition of waterlogged decayed wood by near infrared spectroscopy. **Microchemical Journal**, v. 122, p. 176 – 188, 2015.

PIRES, P. S. M. Introdução ao Scilab: versão 3.0. Disponível em: <http://www.dca.ufrn.br/~pmotta>. Acesso em: 10 jun. 2021.

RAYMOND, C. A. Genetics of *Eucalyptus* wood properties. **Annals of Forest Science**, v. 59, p. 525-53, 2002.

ROSSO, S. et al. Estimate of the density of *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden using near infrared spectroscopy. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 4, p. 647-652. 2013.

SANDBERG, K.; SALIN, J. G. Liquid water absorption in dried Norway spruce timber measured with CT scanning and viewed as a percolation process. **Wood Sci Technol**, v. 46, p. 207–219, 2012.

SCHWANNINGER, M., RODRIGUES, J. C.; FACKLER, K. A review of band assignments in near infrared spectra of wood and wood components. **Journal Near Infrared Spectroscopy**, v. 19, n. 5, p. 287–308, 2011.

SHARMA, V. et al. On the Rapid and Non-destructive Approach for Wood Identification Using ATR-FTIR Spectroscopy and Chemometric Methods. **Vib. Spectrosc**, v. 110, 103097, 2020.

SILVA, J. C.; CASTRO, V. R.; EVANGELISTA, W. V. Influência da idade na usinabilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden, visando uso na indústria moveleira. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 105, p. 117-125, 2015.

SO, C. L. et al. Near-infrared spectroscopy in the forest products industry. **Forest Products Journal**, v. 54, n. 3, p. 6-16, 2004.

SOFIANTO, I. A., INAGAKI, T., ITOH, M., TSUCHIKAWA, S. Stiffness and moisture content prediction model of wooden veneer using fast online near-infrared (NIR) spectroscopic system. **Forestry Research and Engineering: International Journal**, v. 1, n. 2, p. 1-5, 2017.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

TANAKA, T.; AVRAMIDIS, S.; SHIDA, S. Evaluation of moisture content distribution in wood by soft X-ray imaging. **Journal of Wood Science**, v. 55, p. 69–73, 2009.

TSUCHIKAWA, S.; SCHWANNINGER, M. A review of recente near-infrared research for wood and paper (Part 2). **Applied Spectroscopy Reviews**, v. 48, p. 560-587, 2013.

TSUCHIKAWA, S.; KOBORI, H. A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology. **Journal of Wood Science**, v. 61, p. 213-220, 2015.

- VAN DEN BULCKE, J.; VAN ACKER, J.; DE SMET, J. An experimental set-up for real-time continuous moisture measurements of plywood exposed to outdoor climate. **Build Environ.** v. 44, p. 2368–2377, 2009.
- VIA, B. K.; SO. et al. Ability of near infrared spectroscopy to monitor air-dry density distribution and variation of wood. *Wood and Fiber Science*, v. 37 p. 394- 402, 2005
- VIANA, L. C. et al. Predicting the morphological characteristics and basic density of *Eucalyptus* wood using the NIRS technique. **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 4, p. 421-429, 2009.
- WANG, Y. et al. A review of the application of near-infrared spectroscopy (NIRS) in forestry. **Applied Spectroscopy Reviews**, 2021.
- WATANABE, K.; LAZARESCU, C.; SHIDA, S.; AVRAMIDIS, S. A novel method of measuring moisture content distribution in timber during drying using CT scanning and image processing techniques. **Dry Technol.** v. 30, p. 256–262, 2012.
- WATANABE, K.; MANSFIELD, S. D.; AVRAMIDIS. Application of near-infrared spectroscopy for moisture-based sorting of green, hem-fi timber. **Journal Wood of Science**, v. 77, n. 1, p. 288-294, 2011.
- WATANABE, K. et al. Non-destructive measurement of moisture distribution in wood during drying using digital X-ray microscopy. **Dry Technol**, v. 26, p. 590–595, 2008.
- WILLIAMS, P. C.; SOBERING, D. C. Comparison of commercial near infrared transmittance and reflectance instruments for analysis of whole grains and seeds. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 1, n. 1, p. 25-33, 1993.
- ZANUNCIO, A. J. V. et al. Neuro-fuzzy Hybrid System for Monitoring Wood Moisture Content During Drying. **Floresta e Ambiente**, v.26, n.2, 2019.
- ZEN, L.R. **Métodos combinados para secagem da madeira de *Eucalyptus*: pré-secagem ao ar livre com secagem em estufa convencional.** 2016. 106p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.
- ZHANG, H. et al. Application of Near Infrared Spectroscopy in Wood Water Content Prediction. **Advance Materials Research**, v. 187, n. 1, p. 434-438, 2011.