

UFRRJ
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E
FLORESTAIS

TESE

AVALIAÇÃO DE PROCESSOS VISANDO QUALIDADE NA SECAGEM DE
MADEIRAS

Poliane Pereira de Souza

2022



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E
FLORESTAIS

AVALIAÇÃO DE PROCESSOS VISANDO QUALIDADE NA SECAGEM DE
MADEIRAS

POLIANE PEREIRA DE SOUZA

Sob a Orientação do Professor
João Vicente de Figueiredo Latorraca

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Doutora, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Ciência e Tecnologia de Produtos Florestais.

Seropédica, RJ

Agosto de 2022

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pela autora

S719a Souza, Poliane Pereira de , 1992-
AVALIAÇÃO DE PROCESSOS VISANDO QUALIDADE NA
SECAGEM DE MADEIRAS / Poliane Pereira de Souza. -
Feira de Santana, 2026.
91 f.: il.

Orientador: João Vicente de Figueiredo Latorraca.
Tese(Doutorado). -- Universidade Federal Rural do
Rio de Janeiro, PPGCAF, 2026.

1. Secagem da madeira. 2. Programa de secagem. 3.
Adubação. 4. Procedência genética. 5. defeitos de
secagem. I. de Figueiredo Latorraca, João Vicente,
1961-, orient. II Universidade Federal Rural do Rio
de Janeiro. PPGCAF III. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E FLORESTAIS

POLIANE PEREIRA DE SOUZA

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutora em Ciências Ambientais e Florestais**, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Ciência e Tecnologia de Produtos Florestais.

TESE APROVADA EM: 31/08/2022.

(Assinado digitalmente em 09/10/2022 08:11)

EDVA OLIVEIRA BRITO
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptPF (12.28.01.00.00.00.00.30)
Matrícula: ###72#7

(Assinado digitalmente em 07/10/2022 09:30)

JOAO VICENTE DE FIGUEIREDO
LATORRACA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptPF (12.28.01.00.00.00.00.30)
Matrícula: ###169#3

(Assinado digitalmente em 07/10/2022 09:36)

ANNA CAROLINA DE ALMEIDA ANDRADE
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.186-##

(Assinado digitalmente em 07/10/2022 09:48)

JUAREZ BENIGNO PAES
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.627-##

(Assinado digitalmente em 07/10/2022 11:21)

JONNYS PAZ CASTRO
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.122-##

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrrj.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: 266, ano: 2022, tipo: ATA DE DEFESA DE TESE, data de emissão: 07/10/2022 e o código de verificação: a85de8a8c6

*“Mas é preciso ter manha
é preciso ter graça
É preciso ter sonho, sempre
Quem traz na pele essa marca
Possui a estranha mania
De ter fé na vida...”.*

(Milton Nascimento e Fernando Brant)

AGRADECIMENTOS

Foram muitos os dias de luta até chegar aqui! Tenho a certeza de que caminhei, nessa estrada tão minha, tendo apoio de tantos que se fizeram casa, abraço, mão, coração!

Agradeço à Deus, por ser meu mestre na busca pelo bem e por uma vida que valha a pena!

Agradeço a CAPES pela concessão de bolsa e apoio ao desenvolvimento do meu projeto.

Aos meus pais e a minha irmã, que mesmo distantes geograficamente, sempre torceram pelos meus sonhos e me deram apoio!

Agradeço à UFRRJ, PPGCAF e todos os professores, grandes mestres que passaram pela minha jornada, e me ajudam a entender a difícil missão de quem segue esse caminho, em especial agradeço ao meu orientador, professor João Vicente de Figueiredo Latorraca!

Agradeço imensamente aos meus amigos, por tornarem mais leve e divertida a minha passagem, em cada lugar por onde estive, me colocaram em suas casas e me fizeram família! E é claro, sou grata a mim mesma, por não ter desistido diante das dificuldades encontradas no caminho! Cada pessoa que somou esforços e me fez chegar onde eu estou é especial, sigo em fim, com o coração cheio de gratidão!!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO GERAL

SOUZA, Poliane Pereira de. **Avaliação de processos visando qualidade na secagem de madeiras**. 2022. 91 p. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, RJ, 2022.

A secagem é uma etapa fundamental na obtenção de madeira serrada de qualidade para diversas finalidades. Este processo garante melhoria na trabalhabilidade da peça, porém demanda cuidados durante a sua execução para que ocorra com qualidade e se possa obter um produto livre de defeitos. O objetivo deste trabalho é avaliar processos de secagem a fim de contribuir com avanços metodológicos para a qualidade da secagem de madeiras. O trabalho está dividido em capítulos, visando explorar o máximo de informações sobre o tema. O Capítulo I aborda a importância de realizar estudos prévios para encontrar o programa adequado de secagem, inclusive para madeiras de mesma espécie, variando sua procedência genética e adubação, o objetivo do capítulo é estimar e avaliar os parâmetros obtidos para realização de programas de secagem para a madeira de *Tectona grandis* de diferentes materiais genéticos, com e sem adubação. Avaliar a qualidade dos programas de secagem executados, em relação à ocorrência de defeitos, e indicar o programa mais adequado para a madeira jovem de *Tectona grandis* Linn f. Foi utilizada a metodologia de secagem drástica, os resultados mostraram que a procedência e a adubação não afetaram os parâmetros temperaturas inicial e final. Observou-se que os potenciais de secagem da madeira de alguns materiais genéticos foram afetados positivamente pela adubação. Os materiais provenientes de áreas adubadas apresentaram as menores densidades básicas, maiores teores de umidade inicial e maiores taxas de secagem. O programa com os parâmetros; $T_i=51^{\circ}\text{C}$, $T_f=76^{\circ}\text{C}$ e $PS=3,0$ é o programa mais indicado para a madeira em estudo. O Capítulo II apresenta a utilização da extração de água da madeira com CO_2 supercrítico. Uma metodologia ainda pouco utilizada para madeiras, porém com grande potencial futuro, tem como objetivo avaliar a eficiência da utilização do CO_2 supercrítico na extração de água, determinar as condições (tempo, temperatura e pressão) mais adequadas para a efetiva extração de água na madeira e avaliar o efeito da utilização de pré-tratamento com CO_2 supercrítico na secagem de madeiras predispostas à ocorrência de defeitos de secagem. Foi utilizado Delineamento Composto Central Rotacional, avaliou-se a faixa de pressão entre 80 e 200 bar, temperatura entre 40 e 90°C e tempo de 10 a 30 minutos. O planejamento experimental mostrou que o dióxido de carbono supercrítico pode ser utilizado para a extração de água, sendo

a condição ótima $T=80^{\circ}\text{C}$, $P=175,7$ bar e $t=26$ min. O capítulo III aborda a utilização de nanopartículas como uma possibilidade de acelerar o processo de secagem de lâminas de madeira. O objetivo foi avaliar o efeito da ressonância plasmônica da nanopartícula de prata para a secagem de lâminas, foi avaliada a utilização da nanopartícula e a distância da incidência de luz nas amostras (6 cm e 13 cm). De modo geral, para as duas espécies avaliadas, a imersão potencializou o efeito da Lâmpada de LED na secagem da madeira para a distância de 13 cm.

Palavras-chave: Adubação, procedência genética, CO_2 supercrítico.

GENERAL ABSTRACT

SOUZE, Poliane Pereira de. **Evaluation of processes aiming at quality in the drying of woods**. 2022. 91p. Thesis (Doctorate in Environmental and Forestry Science). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, RJ, 2022.

Drying is a fundamental step in obtaining quality lumber for various purposes. This process guarantees improvement in the workability of the part, but it demands care during its execution so that it occurs with quality and a defect-free product can be obtained. The objective of this work is to evaluate drying processes in order to contribute to methodological advances for the quality of wood drying. The work is divided into chapters, aiming to explore as much information on the topic as possible. Chapter I addresses the importance of carrying out previous studies to find the appropriate drying program, including for wood of the same species, varying its genetic origin and fertilization. *Tectona grandis* wood from different genetic materials, with and without fertilization. To evaluate the quality of the drying programs performed, in relation to the occurrence of defects, and to indicate the most suitable program for the young wood of *Tectona grandis* Linn f. Drastic drying methodology was used, the results showed that the origin and fertilization did not affect the parameters initial and final temperatures. It was observed that the wood drying potentials of some genetic materials were positively affected by fertilization. Materials from fertilized areas had the lowest basic densities, highest initial moisture content and highest drying rates. The program with the parameters; $T_i=51^{\circ}\text{C}$, $T_f=76^{\circ}\text{C}$ and $PS= 3.0$ is the most suitable program for the wood under study. Chapter II presents the use of water extraction from wood with supercritical CO_2 . A methodology that is still little used for wood, but with great future potential, aims to evaluate the efficiency of the use of supercritical CO_2 in the extraction of water, to determine the most appropriate conditions (time, temperature and pressure) for the effective extraction of water in the wood. and to evaluate the effect of the use of pre-treatment with supercritical CO_2 in the drying of wood predisposed to the occurrence of drying defects. Central Composite Rotational Design was used, the pressure range between 80 and 200 bar, temperature between 40 and 90°C and time from 10 to 30 minutes were evaluated. The experimental design showed that supercritical carbon dioxide can be used for water extraction, with the optimal condition being $T=80^{\circ}\text{C}$, $P=175.7$ bar and $t=26$ min. Chapter III addresses the use of nanoparticles as a possibility to speed up the drying process of wood blades. The objective of this study was to evaluate the effect of the use of the silver nanoparticle for drying slides, the use of the nanoparticle and the

distance of the incidence of light in the samples (6 cm and 13 cm) were evaluated. In general, for the two species evaluated, immersion enhanced the effect of the LED Lamp on wood drying for the distance of 13 cm.

Keywords: Fertilization, genetic origin, supercritical CO₂.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Condição dos tratamentos avaliados.....	25
Tabela 2. Programa de secagem Brando para a madeira jovem de <i>Tectona grandis</i>	29
Tabela 3. Programa de secagem Rigoroso para a madeira jovem de <i>Tectona grandis</i> ...	30
Tabela 4. Critérios utilizados para a classificação da incidência de defeitos de secagem de acordo com Martins (1984).	31
Tabela 5. Critérios utilizados para avaliação da intensidade dos defeitos de acordo com Severo (2000).	31
Tabela 6. ANOVA para dados de potencial de secagem.....	32
Tabela 7. Parâmetros de secagem por tratamento.	32
Tabela 8. Taxa de secagem para cada tratamento distribuído nas fases características da secagem.	35
Tabela 9. Escore de defeitos por tratamento.....	35
Tabela 10. Propriedades físicas da madeira.....	36
Tabela 11. Classificação dos defeitos por programa de secagem para a madeira jovem de <i>Tectona grandis</i> L.	37
Tabela 12. Tabela de fatores e níveis correspondentes ao experimento.....	55
Tabela 13. Matriz de Planejamento Fatorial Composto Rotacional aplicada à secagem de <i>Eucalyptus pellita</i>	55
Tabela 14. Umidade inicial, umidade final e variação de umidade para cada condição experimental.	57
Tabela 15. ANOVA das variáveis analisadas e suas interações.....	57
Tabela 16. Coeficientes do modelo de regressão, erro padrão e p-valor obtidos a partir dos resultados experimentais.....	58
Tabela 17. Condição de secagem em cada tratamento avaliado para <i>Pterocarpus rohrii</i> e <i>Basiloxylon brasiliensis</i>	76
Tabela 18. Taxa de secagem para a madeira de <i>Pterocarpus rohrii</i>	83
Tabela 19. Taxas de secagem para a espécie <i>Basiloxylon brasiliensis</i>	83
Tabela 20. Programa de secagem para o tratamento 1.	88
Tabela 21. Programa de secagem para o tratamento 2.	88
Tabela 22. Programa de secagem para o tratamento 3	89
Tabela 23. Programa de secagem para o tratamento 4	89
Tabela 24. Programa de secagem para o tratamento 5	90

Tabela 25. Programa de secagem para o tratamento 6	90
Tabela 26. Programa de secagem para o tratamento 7	91
Tabela 27. Programa de secagem para o tratamento 8	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de amostragem dos corpos de prova secagem drástica. A= Amostra para a secagem em estufa a 100°C (100 × 50 × 10 mm); B= Amostra para determinação da densidade básica e C= Amostra para determinação do teor de umidade inicial (50 × 50 × 10)	26
Figura 2. Esquemas para realização de desdobro – 1 Modelo de desdobro considerando dois tombos da tora. 2 – Modelo de desdobro considerando um tombo na tora.	29
Figura 3. Curvas dos tratamentos onde a adubação não interferiu no potencial de secagem.	33
Figura 4. Representação das curvas de secagem dos tratamentos onde a adubação influenciou no potencial de secagem.	34
Figura 5.. Projeção das inter-relações dos defeitos de secagem com os programas de secagem da madeira jovem de <i>Tecnotna grandis</i> L.. Sendo: Programa 1= ● e Programa 2 = □. .	37
Figura 6. Esquema ilustrativo do processo de extração usando CO ₂ supercrítico (BESSA, 2018).	54
Figura 7. Gráfico de Pareto para a análise do ΔU obtido com CO ₂ supercrítico.	58
Figura 8. Distribuição dos resíduos: valores preditos pelo modelo e valores observados no experimento para secagem de <i>Eucalyptus pellita</i>	59
Figura 9. Superfície de resposta para a interação: Pressão x Temperatura	60
Figura 10. Resposta da interação: Pressão x Temperatura	60
Figura 11. Superfície de resposta para a interação: Tempo x Pressão	61
Figura 12. Destaque da região de interação: Tempo x Pressão	61
Figura 13. Superfície de resposta para a interação: Temperatura x Tempo	62
Figura 14. Destaque da região de interação: Temperatura x Tempo	62
Figura 15. Amostras antes da secagem (A). Amostras após o processo de secagem (B).	63
Figura 16. Amostras de madeira de <i>Eucalyptus pellita</i> com colapso após secagem a 80°C.	64
Figura 17. Aparato experimental para secagem de lâminas de madeira.	77
Figura 18. A- Amostras fixadas a distância D1: 6cm; B- Amostras fixadas a uma distância D2: 13cm.	78
Figura 19. Dissolução de AgNO ₃ e dissolução de Citrato de sódio em banho ultrassônico.	78
Figura 20. Obtenção da nanopartícula em placa aquecedora com agitador magnético, coloração ideal para encerramento da titulação.	79
Figura 21. Amostra imersa em 20ml de solução de nanopartículas de prata (100ppm).	80

Figura 22. Nanopartículas obtidas: 1- Nanopartícula executada no tempo correto de titulação, coloração mais adequada. 2, 3 e 4- Tempo de titulação excessivo.	82
Figura 23. Curvas de secagem para a espécie <i>Pterocarpus rohrii</i>	82
Figura 24. Curva de secagem para a espécie <i>Basiloxyton brasiliensis</i>	83

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	17
2. OBJETIVO GERAL.....	18
2.1. Objetivos específicos.....	18
CAPÍTULO I.....	19
ESTUDO DA SECAGEM CONVENCIONAL PARA MADEIRA JOVEM DE <i>Tectona grandis</i> Linn F.	19
RESUMO	20
ABSTRACT	21
1. INTRODUÇÃO.....	22
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	24
3. RESULTADOS	32
4. DISCUSSÃO.....	37
5. CONCLUSÕES.....	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
CAPÍTULO II.....	48
EFICIÊNCIA DO USO DE CO ₂ SUPERCRÍTICO PARA SECAGEM DE MADEIRAS	48
RESUMO	49
ABSTRACT	50
1. INTRODUÇÃO.....	51
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	53
3. RESULTADOS	56
4. DISCUSSÃO.....	64
5. CONCLUSÃO.....	67
SUGESTÕES	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
CAPÍTULO III	71

EFICIÊNCIA DA RESSONÂNCIA PLASMÔNICA PARA SECAGEM DE LÂMINAS DE MADEIRA	71
RESUMO	72
ABSTRACT	73
1. INTRODUÇÃO.....	74
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	75
3. RESULTADOS	81
4. DISCUSSÃO	84
5. CONCLUSÃO.....	85
SUGESTÕES	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
ANEXOS.....	88

1. INTRODUÇÃO GERAL

A madeira é um material amplamente utilizado e apresenta larga variação em sua estrutura interna, seja entre árvores de espécies distintas, dentro de mesma espécie ou mesmo considerando a estrutura interna de uma única árvore (PANSIN; ZEEUW, 1980). Por ser anisotrópica, são observadas na madeira mudanças dimensionais, de maneira diferente em cada direção estrutural: radial, transversal ou tangencial (OLIVEIRA; SILVA, 2003). Como consequência de mudanças do teor de umidade, os materiais higroscópicos como a madeira, apresentam contração ou expansão.

A alta demanda de produtos madeireiros levou a uma exploração florestal em larga escala, acarretando supressão de vegetação nativa. O investimento em florestas plantadas tem a finalidade de reduzir este problema e garantir produção madeireira de alta qualidade. Dentre as espécies que se destacam na produção madeireira, está a *Tectona grandis*, além muitas espécies pertencentes ao gênero *Eucalyptus*, que possui uma alta plasticidade, adaptabilidade, rápido crescimento e é alvo de muitas pesquisas visando melhoramento genético.

Investimentos em pesquisas acerca da secagem da madeira são necessários para minimizar os defeitos por meio da realização de técnicas corretas em condições adequadas para cada espécie. A utilização de pré-tratamentos para a secagem é uma alternativa para melhorar o desempenho. Técnicas como o tratamento supercrítico de CO₂ para amostras de madeira são alternativas que veem sendo pesquisadas e metodologias desenvolvidas para esse suporte ao processo de secagem. As nanopartículas apresentam potencial para diversas aplicações tecnológicas, em especial as nanopartículas de prata, podendo ser considerada nas pesquisas para avanços no processo de secagem de madeiras.

A principal razão para realizar a secagem da madeira é assegurar-se de que a madeira esteja, dimensionalmente mais estável antes da sua utilização final (SEVERO, 2000). A escolha do método de secagem influenciará no tempo de duração, na qualidade do material seco e na obtenção do teor de umidade desejado para determinada finalidade. Portanto, quando o processo é conduzido de modo adequado, é possível reduzir o tempo de secagem e a incidência de defeitos (SUSIN *et al.* 2014).

O processo de secagem ideal é aquele que promove a melhor combinação entre rapidez e qualidade, e deverá ser ajustado pelo operador de acordo com os equipamentos disponíveis (secador e sistema de controle) e com as práticas operacionais adequadas (GALVÃO E JANKOWSKY, 1985). No entanto, um único programa não atende às necessidades de todas as espécies de madeira (BRANDÃO, 1989), sendo necessária a elaboração de programas

(específicos) para uma espécie ou grupo de espécies com características semelhantes durante o processo de secagem. Segundo Barbosa *et al.* (2005) embora diferentes clones de uma espécie possam estar juntos no mesmo grupo de secagem, não significa que suas madeiras apresentarão exatamente o mesmo comportamento durante o processo. Por isso, se o programa de secagem for executado sem atender às especificidades da espécie, pode ocasionar defeitos na madeira, como rachaduras superficiais e internas (favo de mel), colapso e empenamentos (TENORIO, MOYA E QUESADA-PINEDA, 2012; LOIOLA, 2015).

Na secagem o controle na ocorrência de defeitos está quase sempre ligado à adequação do programa utilizado. As análises são importantes no que diz respeito a qualidade que se busca ao final da secagem. O resultados destas análises pode indicar a necessidade de ajustes importantes no processo, que deve ser realizado visando a menor ocorrência possível de defeitos.

2. OBJETIVO GERAL

Avaliar processos de secagem a fim de contribuir com avanços metodológicos para a qualidade da secagem de madeiras.

2.1. Objetivos específicos

- Estimar e avaliar parâmetros obtidos para realização de programas de secagem para a madeira de *Tectona grandis* de diferentes materiais genéticos, com e sem adubação.
- Avaliar o desempenho secagem convencional para madeira jovem de *Tectona grandis* Linn F.
- Avaliar a eficiência da utilização do CO₂ supercrítico na extração de água.
- Avaliar a eficiência da ressonância plasmônica para secagem de lâminas de madeira.

CAPÍTULO I

ESTUDO DA SECAGEM CONVENCIONAL PARA MADEIRA JOVEM DE *Tectona grandis* Linn F.

RESUMO

A secagem é uma etapa fundamental no processo de produção da madeira serrada. A definição de variáveis que afetam a qualidade desse processo como temperaturas inicial e final e potencial de secagem depende do conhecimento tecnológico da madeira, bem como da experiência sobre o processo desenvolvido para determinada espécie. Pensando nisso, desenvolvemos um experimento com a madeira de quatro materiais genéticos/procedências (3 clones e 1 seminal) da espécie *Tectona grandis* cultivadas com e sem adubação, a fim de estimar e avaliar esses parâmetros utilizados na elaboração de programas. Os valores das temperaturas inicial e final e o potencial de secagem foram estimados a partir da metodologia da secagem drástica, onde se avaliou a taxa e escore de defeitos (rachaduras e colapso). Além dos parâmetros da secagem, as propriedades físicas da madeira também foram avaliadas. Os resultados mostraram que a procedência e a adubação não afetaram os parâmetros temperaturas inicial e final. Contudo, o potencial de secagem foi afetado significativamente pela associação dos tratamentos. Observou-se que os potenciais de secagem da madeira de alguns materiais genéticos foram afetados positivamente pela adubação. Os materiais provenientes de áreas adubadas apresentaram as menores densidades básicas, maiores teores de umidade inicial e maiores taxas de secagem.

ABSTRACT

Drying is a fundamental step in the lumber production process. The definition of the initial process foreseen for the quality and the final quality of the process depends on the technological knowledge designed for a certain species. With this in mind, we developed an experiment with the wood of four genetic materials/sources (3 clones and 1 seminal) species of *Tectona grandis* cultivated with and without fertilization, in order to estimate and evaluate these parameters used in the elaboration of programs. The values of the initial and final temperatures and the drying potential were estimated from the drastic drying methodology, where an operation rate (cracks and recovery) was evaluated. In addition to the wood parameters, the physical properties were also made. The initial dubbing results and the high values were not run. However, the treatment potential was significantly activated by the combination of treatments. To observe the wood choice potentials of some genetic materials. Materials from fertilized areas presented as basic densities, higher initial moisture contents and higher drying rates.

1. INTRODUÇÃO

A *Tectona grandis* Linn F. (teca), pertencente à família Lamiaceae, é uma das espécies de madeira tropical mais conhecida e valorizada. A madeira é considerada moderadamente dura e apresenta boas propriedades de usinagem (MIRANDA *et al.*, 2011). É empregada em uma variedade de usos, com destaque no mobiliário de luxo e construção naval. Além disso, há a possibilidade de comercialização da produção desde os primeiros desbastes (PELISSARI *et al.*, 2014). A madeira apresenta bons desempenhos em secagem (BRAZ *et al.*, 2015; MIRANDA *et al.*, 2011). É uma espécie com amplo interesse para exportação, pois, garante altos retornos financeiros. Entretanto, este retorno está associado à qualidade final da madeira. Fatores como material genético e adubação do solo influenciam no desenvolvimento da madeira, afetando a qualidade para seu uso (VIEIRA *et al.*, 2018).

A secagem pode ser definida como um balanço dinâmico entre a transferência de calor do fluxo de ar para a madeira, superfície de evaporação da madeira, difusão da umidade através da madeira e a vazão de massa da água livre. A secagem reduz o teor de umidade da madeira verde e, se continuada, as paredes celulares alcançarão estados insaturados (ENGELUND *et al.*, 2013). O objetivo principal da secagem é promover o equilíbrio entre a velocidade de evaporação da água na superfície da madeira, a taxa de movimentação interna (tanto de calor como de umidade) e as reações da madeira durante o processo; de forma a promover a secagem o mais rapidamente possível e com um nível de perdas ou um padrão de qualidade aceitável para o produto que se pretende (JANKOWSKY, 2011). Todavia, quando a secagem é realizada de forma inadequada são ocasionados defeitos gerados pelo movimento de fluidos na madeira, concomitantemente, há redução do valor do produto.

A temperatura reduz o tempo de secagem, proporcionando aumento da taxa de secagem, principalmente, para a remoção da água de difusão. Já a velocidade de circulação do ar, exerce influência significativa na transferência de calor à superfície da madeira, assim como, na transferência da massa de vapor d'água da superfície para o meio, aumentando a taxa de remoção da água capilar. A secagem realizada em altas temperaturas iniciais de forma rápida e sem uniformidade, pode resultar em defeitos na madeira (YANG E LIU, 2018; NASCIMENTO *et al.*, 2019) A escolha dos parâmetros de secagem influencia no tempo de secagem e na

qualidade do material seco. É possível reduzir o tempo de secagem e a incidência de defeitos quando o processo é conduzido com os parâmetros corretos. Segundo Bonduelle *et al.* (2015) as propriedades físicas da madeira também influenciam o seu comportamento tecnológico, quando estas refletem diretamente no processo de industrialização, como destaque a densidade e a retratibilidade, características que apresentam variações no sentido radial e longitudinal do tronco das árvores. Amer *et al.* (2020) afirma que a resistência à transferência de água na madeira depende da densidade e da direção anatômica. Segundo Monteiro e Lima (2020) os elementos anatômicos influenciam no fluxo de água durante a secagem, eles afirmam que comprimento e diâmetro do vaso possuem efeito positivo no fluxo de água por capilaridade.

A metodologia de secagem drástica é utilizada como uma ferramenta para obtenção de parâmetros para a realização de programas de secagem mais adequados para a madeira em estudo (JANKOWSKY, 2011). A definição de um programa de secagem para madeira é realizada ajustando-o às características da madeira estudada, sua massa específica, propensão a ocorrência de defeitos e o padrão de qualidade desejado para esse material após o procedimento. A qualidade da madeira está relacionada à sua capacidade para atender aos requisitos necessários para a fabricação de um produto, ou ainda, sua qualidade pode ser avaliada como a combinação de propriedades físicas, químicas, anatômicas e estruturais da árvore ou de suas partes que levam a um máximo aproveitamento e uma melhor aplicabilidade para um fim específico (MEDEIROS *et al.*, 2016).

Durante o processo de secagem, abaixo do PSF, a madeira começa a sofrer variações dimensionais tanto por contração, ao perder água, quanto por inchamento, ao ganhar umidade. Em cada direção estrutural da peça (tangencial, radial e longitudinal) as variações dimensionais ocorrem de forma diferente, favorecendo a ocorrência de defeitos como abaulamentos, arqueamentos, empenamentos (BRAZ *et al.*, 2015) e rachaduras, decorrentes da diferença de retração nas direções radial e tangencial (GALVÃO E JANKOWSKY, 1985). A secagem quando conduzida incorretamente pode gerar perdas elevadas, madeiras com propriedades físicas inadequadas para utilização e prejuízos financeiros. Para garantir qualidade no processo de secagem é necessário o emprego de valores corretos dessas variáveis, de forma a conduzir a secagem para o melhor resultado possível. O emprego de modelos para prever com precisão e rapidez os valores dessas variáveis são essencialmente importantes.

A ocorrência de defeitos diminui o estímulo para a utilização de determinadas espécies susceptíveis, pois geram prejuízos financeiros para quem pretende secar madeira (MARTINS, 1988). Por isso, o conhecimento sobre técnicas que possibilitem diminuir o tempo de secagem

e melhorar a qualidade da madeira são importantes para reduzir o consumo de energia no processo, e assim diminuir custos, alavancando os lucros (TALGATTI et al., 2016).

Nesse contexto, a teca é uma espécie que apresenta uma madeira de alto valor comercial, consegue alcançar bons preços e compete com madeiras consideradas nobres mundialmente. Trata-se de uma das espécies mais procuradas e valorizadas no mercado internacional de madeiras por sua alta durabilidade, boa estabilidade dimensional, resistência, peso e pelas qualidades estéticas de sua madeira (MIRANDA, SOUSA E PEREIRA, 2011). Braz et al. (2015), Trujillo et al. (2021) consideraram a teca uma espécie com bom desempenho para secagem, esta característica foi evidenciada também em outras pesquisas, Phonetip et al. (2021) ao utilizarem árvore de *Tectona grandis* na avaliação de nova técnica, secagem de árvores em pé.

O Brasil oferece condições climáticas que promovem taxas de crescimento superiores às dos plantios da maioria dos países produtores, obtendo madeira com dimensões comerciais em ciclos de 20 a 25 anos, estimulando a implantação de plantios comerciais no país (FLÓREZ, 2012). A madeira em estudo é proveniente de desbaste, geralmente este material é convertido em produtos de menor valor agregado pela maior proporção de lenho juvenil na árvore jovem. Encontrar alternativas para a melhorar a qualidade do produto, pode tornar o aproveitamento de lenho juvenil da teca um investimento mais rentável.

O objetivo deste trabalho foi estimar e avaliar os parâmetros obtidos para realização de programas de secagem para a madeira de *Tectona grandis* de diferentes materiais genéticos, com e sem adubação. Avaliar também a qualidade dos programas de secagem executados, em relação à ocorrência de defeitos, e indicar o programa mais adequado para a madeira jovem de *Tectona grandis* Linn f.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O material utilizado é proveniente de plantio homogêneo localizado nos municípios de Redenção (PA) e Santa Maria das Barreiras (PA), região sudeste do estado do Pará. De acordo com a classificação de Köppen, o clima do local é Tropical Aw. Apresenta menor volume de precipitação entre os meses de junho a agosto (LOPES et al. 2013), e o tipo de solo é o PVAd - Argissolos Vermelho-Amarelos Distroficos (EMBRAPA 2020).

Foram analisados indivíduos de 12 anos de idade, plantados sob diferentes condições de espaçamento, procedência genética (clonal e seminal), uma parte do material foi submetido a

adubação de cobertura realizada com NPK 6-42-00 B+Zn, outros tratamentos não foram adubados, foram utilizadas cinco árvores de cada tratamento (Tabela 1).

Tabela 1. Condição dos tratamentos avaliados.

Tratamento	Adubação	Procedência	Diâmetro (cm)	Altura comercial (m)
T1	A1	Clone 1 (C1)	29,37 (8,47)	11,00 (14,37)
T2	A1	Clone 2 (C2)	31,88 (9,19)	10,50 (10,66)
T3	A1	Clone 3 (C3)	30,50 (7,53)	10,80 (10,14)
T4	A1	Semente (Se)	30,44 (10,78)	9,29 (26,94)
T5	A2	Clone 1 (C1)	29,72 (11,00)	9,75 (6,63)
T6	A2	Clone 2 (C2)	29,65 (4,68)	8,16 (9,41)
T7	A2	Clone 3 (C3)	29,72 (13,59)	9,91 (8,43)
T8	A2	Semente (Se)	26,02 (15,64)	7,37 (22,24)

Sendo A1: Com adubação; A2: Sem adubação. Valores entre parêntesis se referem ao coeficiente de variação (%).

Para a secagem da madeira foi utilizada a metodologia de secagem drástica (JANKOWSKY, 2009). Esta metodologia é uma ferramenta para obtenção de parâmetros para a realização de programas de secagem. Baseia-se na teoria que a utilização de amostras de pequenas dimensões, submetidas a uma secagem a uma alta temperatura (100°C), possui comportamento proporcional ao observado na secagem convencional. Foram confeccionados ao todo 60 corpos de prova por tratamento para o ensaio de secagem. Cada árvore foi representada por quatro amostras tangenciais da região de cerne, retiradas de toretes da base, de onde foram obtidos os corpos de prova (Figura 1). Para evitar a perda de umidade, os corpos de prova destinados a secagem drástica, densidade e umidade, devidamente identificados, foram mantidos submersos em água, até o início dos ensaios.

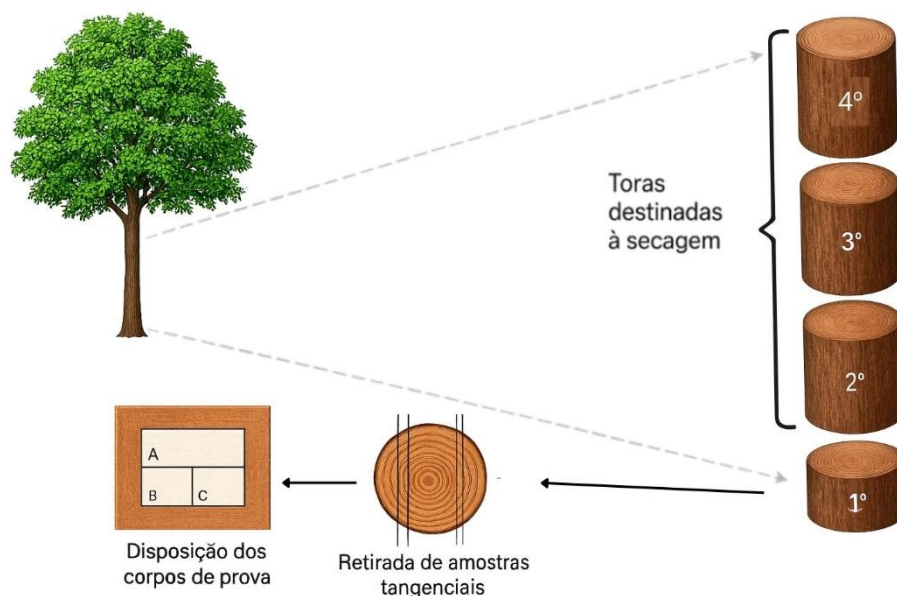


Figura 1. Esquema de amostragem dos corpos de prova secagem drástica. A= Amostra para a secagem em estufa a 100°C (100 × 50 × 10 mm); B= Amostra para determinação da densidade básica e C= Amostra para determinação do teor de umidade inicial (50 × 50 × 10 mm)

Utilizando a metodologia de secagem drástica foram obtidos os parâmetros de secagem temperatura inicial (Ti), temperatura final (Tf) e potencial de secagem (Ps), que são necessários para elaboração de um programa de secagem.

As variáveis consideradas no ensaio foram: Tempo de secagem, a velocidade em que a secagem ocorreu, ou seja, a sua taxa de secagem, rachaduras de topo, e o índice de ocorrência de colapso.

Para o cálculo dos parâmetros Ti, Tf e PS, foram utilizadas as equações 1,2 e 3, extraídas de Jankowsky (2009).

$$Ti = 27,9049 + 0,7881T2 + 419,0254V1 + 1,9483R2 \quad (1)$$

$$Tf = 49,2292 + 1,1834T2 + 273,8685V2 + 1,0754R1 \quad (2)$$

$$PS = 1,4586 - 30,4418V3 + 42,9653V1 + 0,1424R3 \quad (3)$$

Sendo: T2 = tempo de secagem da umidade inicial até 30% (h); V1 = taxa de secagem da umidade inicial até 5% (g/cm².h); V2 = taxa de secagem da umidade inicial até 30% (g/cm².h); V3 = taxa de secagem de 30 a 5% de umidade (g/cm².h); R1 = intensidade das rachaduras da umidade inicial até 5%; R2 = intensidade das rachaduras da umidade inicial até 30%; R3 = intensidade das rachaduras de 30% a 5%.

Curva de secagem

As curvas foram obtidas desde o teor de umidade inicial, a cada intervalo de pesagem do material, até a estabilização da massa das amostras. A periodicidade das pesagens para cada amostra foi de 30 minutos. A partir da massa obtida a cada pesagem foi calculado o teor de umidade, na base seca. A determinação da umidade da madeira foi realizada de acordo com a Norma NBR 7190 (ABNT, 1997).

Taxa de secagem (Capilaridade, difusão e total)

Os dados referentes à velocidade de secagem e o tempo decorrido para a secagem até 0% de umidade das madeiras de *Tectona grandis*, foram utilizados para cálculo da taxa de secagem com base na perda de massa de água obtida a cada 30 minutos durante o processo (Equação 4).

$$Ts = \frac{M_{\text{água}}}{(t.A)} \quad (4)$$

Em que: Ts = taxa de secagem para um determinado intervalo de umidade (kg/cm².h), M_{água} = massa d'água removida da madeira (kg), t = tempo de secagem (h), A = área de evaporação (cm²).

A área de evaporação foi determinada considerando cada corpo de prova como um prisma retangular (Equação 5). A taxa de secagem da madeira em cada tratamento foi calculada para os intervalos de umidade variando de umidade verde até o PSF e do PSF até a madeira seca.

$$AT = 2(a.b + a.c + b.c) \quad (5)$$

Em que: AT = área total (cm²); a, b e c = medida das faces do corpo de prova prismático (cm).

Defeitos de secagem drástica

A avaliação do defeito de rachadura durante a secagem drástica foi feita com a análise periódica da sua ocorrência e intensidade, utilizando lâminas de calibração e paquímetro para obtenção das dimensões (comprimento e largura) do defeito na amostra. Estes valores foram utilizados para definir o escore de defeitos na peça.

Os escore atribuídos para o defeito de secagem rachadura de topo, variam entre a Nota 1 (ausência do defeito); Nota 2 (CR < 5,0 e LR < 0,5); Nota 3 (CR > 5,0 e LR < 0,5); Nota 4 (CR < 5,0 e 0,5 < LR < 1,0); Nota 5 (CR > 5,0 e 0,5 < LR < 1,0) e Nota 6 (CR > 5,0 e LR > 1,0), sendo CR= Comprimento da rachadura (mm) e LR = Largura da rachadura (mm). Quanto maior a nota significa uma maior intensidade na ocorrência deste defeito. Esta análise foi

realizada durante toda a secagem, nos intervalos onde foram realizadas as pesagens periódicas e avaliação da presença de rachaduras.

A avaliação de colapso foi realizada medindo a variação da espessura da amostra, as medidas foram tomadas com paquímetro no início da secagem, considerando a amostra um prisma perfeitamente retangular. Ao final do processo, foi observado o ponto de maior deformação por colapso para obter as medidas finais. Para isso, a amostra foi seccionada ao meio garantindo que a área mais afetada pelo defeito fosse identificada e mensurada corretamente.

A intensidade do defeito de colapso foi distribuída em quatro notas, classificada em Nota 1 (ausência do defeito); Nota 2 ($De < 0,25$); Nota 3 ($0,25 < De < 0,5$); Nota 4 ($0,5 < De < 1,0$) ou Nota 5 ($De > 1,0$), sendo De = Variação da espessura da amostra (mm). Assim como para as rachaduras, quanto maior a nota, maior a intensidade na ocorrência deste defeito.

Propriedades físicas

Para estimar os parâmetros fundamentais dos programas de secagem, não foram utilizadas diretamente análises de propriedades físicas da madeira, entretanto, foi realizado adicionalmente uma análise dos resultados destas sob a mesma condição climática do processo de secagem drástica.

A determinação da densidade básica e da contração volumétrica foi realizada conforme a norma NBR 11.941 (ABNT, 2003).

O cálculo do coeficiente de anisotropia foi obtido de acordo com a equação 6:

$$CA = CT/CR \quad (6)$$

Em que: CA = Coeficiente de anisotropia, CT= Contração tangencial, CR= Contração radial.

Os critérios de classificação da madeira quanto ao coeficiente de anisotropia foram considerados de acordo com Durlo e Marchiori (1992), para valores entre 1,2 e 1,5, a madeira é considerada excelente; valores entre 1,5 e 2,0, a madeira é considerada normal; e, acima de 2,0, a madeira é considerada ruim.

Desdobro e programa de secagem

O material direcionado para secagem foi retirado do fuste de cada árvore. O fuste foi fracionado em toras de 3m e estas desdobradas visando máximo aproveitamento de madeira,

em sistema denominado “bica corrida”, sendo largura mínima de 5,0 cm e espessura fixada em 2,5 cm, considerando sobremedida de 0,3 cm no desdobro primário. Foram realizados cortes paralelos ao eixo longitudinal em dois esquemas de acordo com o diâmetro da tora (Figura 2), utilizando uma serra de fita vertical para retirada das tábuas e, posteriormente alinhadas em serra circular simples.

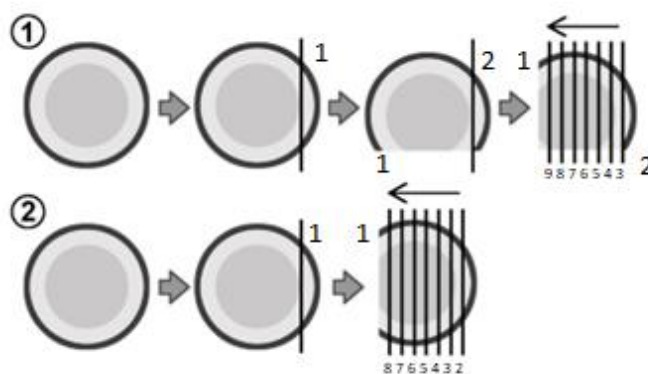


Figura 2. Esquemas para realização de desdobro – 1 Modelo de desdobro considerando dois tombos da tora. 2 – Modelo de desdobro considerando um tombo na tora.

Programas de secagem

Foi desenvolvido um programa para cada tratamento (Anexo-Tabelas 20 a 27), utilizando a metodologia de secagem drástica de acordo com Jankowsky (2009). Diante dos parâmetros obtidos, foram selecionados os dois programas mais extremos. O primeiro teste foi realizado com o programa que apresentava os menores valores de temperatura inicial, temperatura final e potencial de secagem, chamado de programa brando (Tabela 2).

Tabela 2. Programa de secagem Brando para a madeira jovem de *Tectona grandis*

UMIDADE (%)	Ts (°C)	Tu (°C)	UR (%)	UE (%)	PS
Aquecimento	45.0	44.0	94	21.2	**
50	45.0	41.5	81	15.00	3.3
45	45.0	41.0	79	14.25	3.2
40	45.0	40.5	76	13.50	3.0
35	45.0	40.0	73	12.75	2.7
30	45.0	39.5	71	12.00	2.5
25	51.3	43.6	60	10.0	2.5
20	57.5	47.8	56	8.0	2.5
15	63.8	45.4	36	6.0	2.5
10	70.0	46.0	27	4.0	2.5

5	70.0	40.0	16	2.0	2.5
Uniformização	70.00	59.00	59	8.00	**
Condicionamento	70.00	66.50	83	14.00	**

Em que: Ts = temperatura de bulbo seco; Tu = temperatura de bulbo úmido; UR=umidade relativa; UE= Umidade de equilíbrio; PS= potencial de secagem; **=Etapas do programa de secagem onde o PS não é considerado.

Posteriormente, foi realizado o programa de secagem com os maiores valores de temperatura inicial, temperatura final e potencial de secagem, chamado de programa rigoroso (Tabela 3).

Tabela 3. Programa de secagem Rigoroso para a madeira jovem de *Tectona grandis*.

UMIDADE (%)	Ts (°C)	Tu (°C)	UR (%)	UE (%)	PS
Aquecimento	51.0	50.0	95	21.4	**
50	51.0	47.7	81	15.0	3.3
45	51.0	46.8	80	13.8	3.3
40	51.0	46.0	74	12.5	3.2
35	51.0	44.8	70	11.3	3.1
30	51.0	44.5	71	10.0	3.0
25	57.3	47.3	55	8.3	3.0
20	63.5	50.0	47	6.7	3.0
15	69.8	49.8	35	5.0	3.0
10	76.0	48.0	22	3.3	3.0
5	76.0	46.0	20	1.7	3.0
Uniformização	76.00	66.00	82	8.00	**
Condicionamento	76.00	72.70	85	14.00	**

Sendo: Ts =temperatura de bulbo seco; Tu = temperatura de bulbo úmido; UR =umidade relativa; UE= Umidade de equilíbrio; PS= potencial de secagem; **=Etapas do programa de secagem onde o PS não é considerado.

Secagem convencional

A secagem foi realizada numa estufa de secagem convencional, com capacidade para 4m³ de madeira, ventiladores superiores axiais e sistema de umidificação por vaporizadores e aspersores. Todas as fases do programa foram controladas por meio de controlador lógico programável (CLP) e executadas a partir dos programas definidos previamente. Para ambos os programas foram utilizadas amostras de madeira de todos os tratamentos.

Avaliação de defeitos de secagem

Os defeitos de secagem foram avaliados seguindo os critérios descritos na Norma Técnica NBR- 9487(ABNT, 1986). Após a execução dos programas, todas as tábuas foram avaliadas e os defeitos foram classificados segundo a porcentagem de ocorrência, seguindo os critérios apresentados por Martins (1984), Tabela 4.

Tabela 4. Critérios utilizados para a classificação da incidência de defeitos de secagem de acordo com Martins (1984).

Amostras que apresentaram defeitos (%)	Classificação
0-10	Ausente
11-30	Pequena
31-50	Moderada
51-100	Grande

A avaliação da intensidade dos defeitos que ocorreram durante a secagem foi realizada de acordo com os critérios descritos por Severo (2000), Tabela 5.

Tabela 5. Critérios utilizados para avaliação da intensidade dos defeitos de acordo com Severo (2000).

Intensidade	Rachaduras (IR%)	Encurvamento (mm.m ⁻¹)	Arqueamento (mm.m ⁻¹)
Leve	≤ 10	≤ 5	≤ 5
Forte	> 10	> 5	> 5

Análise estatística

Os dados foram submetidos previamente à análise de verificação da normalidade dos resíduos e homoscedasticidade da variância. Os parâmetros temperatura inicial e temperatura final não cumpriram os pressupostos básicos para ANOVA, portanto, foi realizado o teste não paramétrico de Kruskal Wallis. A avaliação do parâmetro PS e das propriedades físicas da madeira foi realizada num delineamento em esquema fatorial, com dois fatores (procedência e adubação), sendo considerados quatro níveis de procedências (C1, C2, C3 e Se) e dois níveis de adubação (A1- com adubação e A2- sem adubação) e a interação entre eles, por meio da análise de variância e teste de médias Tukey significativo 5 % de probabilidade de erro, no programa estatístico R.

Após a execução dos programas de secagem, a influência dos tratamentos na ocorrência dos defeitos de secagem foi analisada, para cada programa, com o teste não paramétrico de

Kruskal al-Wallis. Para averiguar a influência do programa de secagem na ocorrência dos defeitos, foi realizada uma análise de componentes principais (PCA).

3. RESULTADOS

De acordo com o teste de Kruskal Wallis, a Ti e Tf obtidas pela secagem drástica não diferiram entre os tratamentos. Já o parâmetro PS apresentou diferenças significativas entre os tratamentos, e interação significativa dos fatores avaliados (Tabela 6). Diante da interação significativa, o desdobramento de procedência:adubação e vice-versa, foi realizado. Para o desdobramento de procedência nos níveis de adubação, ambos (A1 e A2) apresentaram diferença estatística significativa. Para o desdobramento da interação adubação:procedência foram significativos os níveis C1, C2 e Se.

Tabela 6. ANOVA para dados de potencial de secagem.

	GL	SQ	QM	Fc	Pr.Fc
Procedência	3	0,323	0,1077	6,677	0,00125*
Adubação	1	0,484	0,484	30,016	0,00000493*
Procedência:Adubacao	3	0,296	0,0987	6,119	0,00207*
Residuals	32	0,516	0,0161		

É possível observar que nos pares de tratamentos T1-T5, T2-T6 e T4-T8, de mesmo material genético, o efeito da adubação foi benéfico. Os tratamentos T2 e T4, que foram submetidos a adubação, apresentaram aumento significativo no PS da madeira. Para o tratamento T3-T7, a adubação não influenciou no desempenho da secagem (Tabela 7).

Tabela 7. Parâmetros de secagem por tratamento.

Tratamento	Ti	Tf	PS*
T4 (Se-C)	51,5	75,7	2,98 a
T2 (C2-C)	50,2	74,4	2,88 ab
T7 (C3-S)	49,4	74,1	2,78 abc
T3 (C3-C)	48,6	74,0	2,76 abc
T1 (C1-C)	47,3	72,3	2,64 bcd
T6 (C2-S)	47,3	72,4	2,62 bcd
T8 (Se-S)	46,4	70,8	2,52 cd
T5 (C1-S)	45,5	70,3	2,46 d

Sendo: Ti= Temperatura inicial; Tf: temperatura final; PS= Potencial de secagem. *: Médias seguidas de uma mesma letra na coluna não diferem entre si de acordo com o teste de Tukey significativo 5 % de probabilidade de erro.

Apesar de todas as curvas apresentarem comportamento condizente com o esperado nas fases da secagem, o comportamento variou entre os tratamentos, principalmente no que diz respeito à fase um, de saída de água livre, entre o teor de umidade inicial da madeira até o seu ponto de saturação das fibras (PSF), em média 30% (Figura 3 e 4).

A curva de secagem se apresentou de maneira diferenciada quanto a velocidade de saída de água nos primeiros minutos da secagem entre os tratamentos. Destaque para as curvas de secagem dos tratamentos 2-6 e 4-8, de mesma procedência, porém, diferem em presença de adubação, sendo que o material com adubação apresentou inclinação inicial maior na curva, garantindo um ritmo de secagem mais rápido até o PSF (Figura 4).

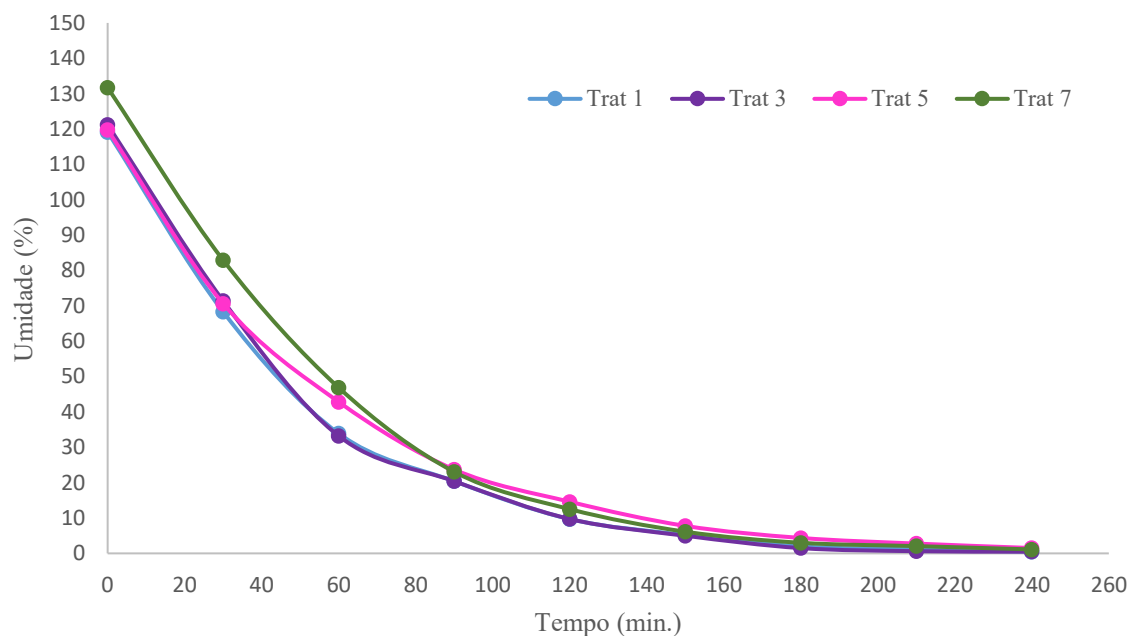


Figura 3. Curvas dos tratamentos onde a adubação não interferiu no potencial de secagem.

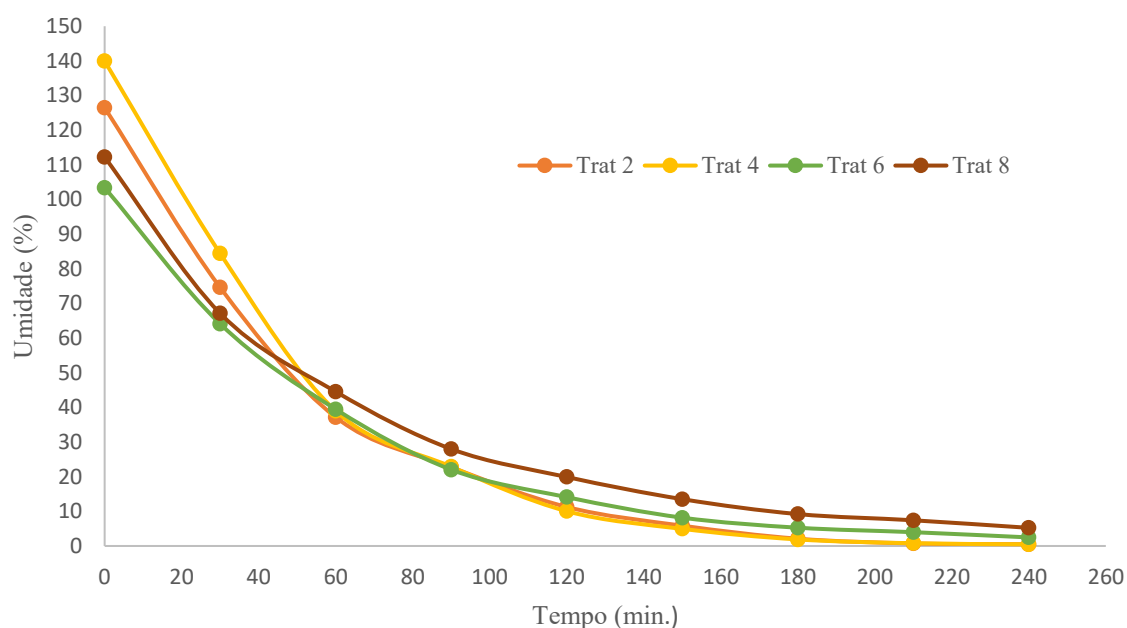


Figura 4. Representação das curvas de secagem dos tratamentos onde a adubação influenciou no potencial de secagem.

A taxa de secagem apresentou-se de forma decrescente a cada intervalo de pesagem para controle da secagem, à medida que o teor de umidade vai diminuindo a taxa de secagem tende a reduzir. Percebe-se que as fases da secagem são bem definidas quanto às taxas de saída de água. Na etapa onde o transporte de massa ocorre por capilaridade, partindo do teor de umidade inicial até o ponto de saturação das fibras, em torno de 30% de umidade, a taxa de secagem é muito maior que aquela encontrada abaixo deste ponto, quando o transporte de massa é realizado por difusão (Tabela 8).

As inclinações iniciais para as curvas de secagem apresentadas na figura 4, apresentaram-se maiores para os tratamentos 2 e 4 (com adubação), o que indica uma maior taxa inicial de secagem, esta informação pode ser confirmada na Tabela 8. Os tratamentos de mesma procedência, onde a adubação influenciou significativamente, apresentaram diferença na taxa de secagem inicial.

Tabela 8. Taxa de secagem para cada tratamento distribuído nas fases características da secagem.

Tratamentos	Taxa de secagem (Kg/cm².h.(10⁻³))		
	Madeira verde – 30%	Madeira verde – 10%	30% - 10%
1	0,373	0,443	0,070
2	0,382	0,459	0,077
3	0,377	0,448	0,071
4	0,399	0,470	0,071
5	0,359	0,431	0,072
6	0,333	0,402	0,069
7	0,391	0,464	0,073
8	0,329	0,402	0,063

Os defeitos foram mensurados durante a secagem, e os resultados obtidos classificados de acordo com os escores da metodologia utilizada. Os escores de defeitos médios, obtidos por tratamento, estão dispostos na tabela 9.

Tabela 9. Escore de defeitos por tratamento.

Tratamento	Escore de defeitos médio	
	Rachadura	Colapso
1	Ausente	1,84
2	1,25	Ausente
3	Ausente	1,40
4	1,20	1,15
5	Ausente	2,40
6	1,20	1,65
7	1,30	Ausente
8	1,10	Ausente

Os dados de densidade da madeira apresentaram diferenças significativas quando submetidos a uma análise de variância em esquema fatorial, apresentando influência da adubação, bem como da interação entre a adubação e a procedência. Interação significativa indica a dependência entre os fatores e o seu desdobramento e avaliação são necessários. Desta forma, avaliou-se a procedência dentro da adubação e vice-versa. O desdobramento da interação

procedência:adubação mostrou-se significativo para no nível A2, que se refere aos tratamentos sem adubação. Houve interação significativa para adubação:procedência, nas procedências C₂ e Se.

Os dados de densidade básica e teor de umidade inicial apresentaram diferenças entre alguns dos tratamentos avaliados. As demais propriedades físicas avaliadas não diferiram entre si, de acordo com a análise estatística utilizada. Há tendência de que os tratamentos com as menores densidades apresentem maiores teores de umidade inicial (Tabela 10). Estes tratamentos também se destacaram no desempenho da secagem, podendo ser observada uma curva de secagem com decréscimo mais veloz, consequentemente, atingindo o teor de umidade final mais rapidamente (Figura 3). O teor de umidade inicial das madeiras seguiu comportamento contrastado com os valores de densidade. Os resultados para o coeficiente de anisotropia foram entre 1,67 e 2,06. A contração volumétrica total da madeira esteve entre 8,33% e 9,47% (Tabela 10).

Tabela 10. Propriedades físicas da madeira.

Tratamentos	Densidade (g/cm³)	Teor de umidade inicial (%)	Coeficiente de anisotropia	Contração volumétrica (%)
T1 (C1-C)	0,540 (6,8) ab	119,14 (11,3) ab	1,67 (19,86)	8,34 (12,36)
T5 (C1-S)	0,537 (5,2) ab	119,75 (8,1) ab	1,95 (6,13)	9,47 (10,58)
T2 (C2-C)	0,520 (6,9) ab	126,49 (11,5) ab	2,00 (8,74)	8,33 (9,04)
T6 (C2-S)	0,587 (9,9) a	103,40 (16,9) b	1,97 (13,52)	9,26 (8,09)
T3 (C3-C)	0,530 (5,6) ab	121,23 (19,2) ab	2,06 (16,00)	9,41 (17,52)
T7 (C3-S)	0,506 (3,6) b	131,69 (5,5) ab	1,98 (5,01)	8,50 (5,01)
T4 (S-C)	0,488 (9,6) b	139,95 (16,1) a	2,03 (9,84)	9,07 (8,92)
T8 (S-S)	0,554 (8,8) ab	112,23 (14,3) ab	1,75 (13,39)	9,36 (13,39)

Legenda: Valores entre parênteses correspondem ao coeficiente de variação (%) para os valores de média obtidos nos tratamentos. Médias seguidas de uma mesma letra na coluna não diferem entre si de acordo com o teste tukey significativo 5 % de probabilidade de erro.

Após análise dos dados de cada tratamento dentro dos programas de secagem, observou-se que a ocorrência de defeitos não apresentou diferença estatísticas entre os tratamentos, tanto para o programa considerado brando, quanto para o programa mais rigoroso.

Seguindo os critérios de classificação adotados (Tabela 4), o programa brando apresentou incidência de rachadura, encurvamento e arqueamento classificadas como pequena. Quanto ao programa de secagem rigoroso, encurvamento e arqueamento foram classificados como moderados e a ocorrência de rachaduras como pequena. Embora os programas tenham apresentado em geral porcentagens pequenas à moderadas de defeito, estes foram avaliados

também quanto a sua intensidade, segundo os critérios da tabela 5, enfatizando os defeitos fortes que poderiam reduzir o potencial de utilização destas peças (Tabela 11).

Tabela 11. Classificação dos defeitos por programa de secagem para a madeira jovem de *Tecnotna grandis* L.

Programa de secagem	Defeito geral (% tábuas)		Defeitos fortes (% tábuas)	
	Brando	Rigorouso	Brando	Rigorouso
Rachadura	29,94	25,51	3,6	7,14
Encurvamento	30,54	44,90	1,8	1,02
Arqueamento	28,14	33,67	7,2	3,06

Os defeitos oriundos de cada programa de secagem foram submetidos a uma análise de componentes principais (PCA). A PCA realizada apresentou uma boa explicação das variáveis, sendo a PC1 responsável por explicar 78,09%, entretanto, os dados não apresentaram padrões de distribuição dos defeitos em função dos programas de secagem executados (Fig. 5).

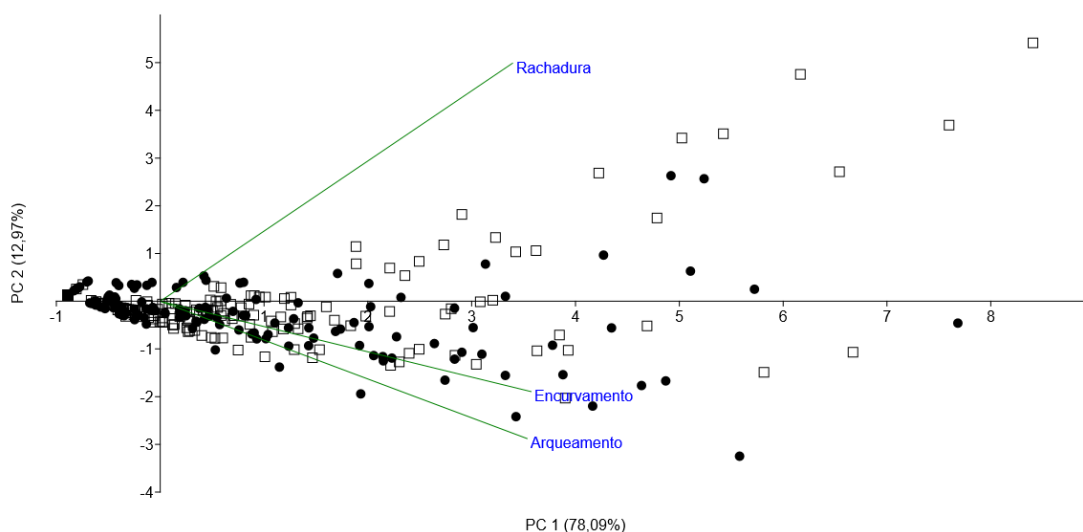


Figura 5.. Projeção das inter-relações dos defeitos de secagem com os programas de secagem da madeira jovem de *Tecnotna grandis* L.. Sendo: Programa 1= ● e Programa 2 = □.

4. DISCUSSÃO

Analisando os valores de T_i , T_f e PS, é possível perceber que apesar das temperaturas não diferirem estatisticamente, elas acompanharam o desempenho do PS, onde os tratamentos que apresentaram os maiores PS, também apresentaram as maiores T_i e T_f . Segundo Jankowsky (2009), o PS é o parâmetro que enfatiza a facilidade com que a secagem poderá ocorrer durante a execução de um programa, e está diretamente associado à sua velocidade. Dentro do

programa, o PS é a relação entre a umidade da madeira e a umidade de equilíbrio (UE). A UE é obtida de acordo com a temperatura e a umidade relativa (UR), portanto o processo de secagem acontece dependendo destes fatores interligados. Quanto maiores as temperaturas e o PS, mais rápida será a secagem.

Diante dos resultados obtidos para PS, é notório que a procedência, a adubação e a interação procedência:adubação, mostraram-se significativas (Tabela 6), o que significa dizer que houve influência destas variáveis nos programas de secagem. Observa-se que alguns tratamentos diferiram estatisticamente dos demais, sendo que os menores potenciais de secagem foram observados em tratamentos sem adubação (Tabela 7). Portanto, o material proveniente de áreas sem adubação necessita de uma secagem mais lenta para obtenção de peças com o mínimo de defeitos possíveis, quando comparados ao material adubado. Segundo Brito *et al.* (1986) a fertilização pode influenciar em aspectos da qualidade da madeira. Lima e Gracia (2011) observaram influência da adubação em propriedades mecânicas para a espécie *Eucalyptus grandis*. Sette Jr. *et al* (2014) encontraram efeito da adubação em características anatômicas do lenho de árvores de eucalipto.

Os tratamentos apresentaram curvas de secagem com as características padrão para secagem de madeiras, onde nos primeiros minutos de secagem é possível observar a tendência linear própria da fase inicial, isso ocorre pelos diferentes níveis de dificuldade de retirada da água no decorrer do processo de secagem da madeira. Assim como os resultados obtidos por Santos; Jankowsky e Andrade (2003), avaliando curva de secagem para madeira de *Eucalyptus grandis*, o comportamento inicial se deu pelo processo de transporte de massa por capilaridade, envolvido na saída da água livre da madeira. À medida que o teor de umidade da madeira foi diminuindo, o fluxo de movimentação por capilaridade reduziu, ocorrendo de forma mais expressiva a movimentação de fluidos por difusão e no gráfico isso se reflete na tendência parabólica (Figura 3). A *Tectona grandis* de maneira geral apresenta um bom desempenho na secagem. Braz *et al.* (2015) consideraram bom o comportamento da secagem da espécie trabalhando com secagem ao ar livre.

Na fase inicial, houve alta queda das taxas de secagem nos tratamentos com adubação, isso se justifica pelo resultado da movimentação da água livre presente na madeira sem impedimento. Esta fase se refere à saída predominantemente de água livre e avalia a taxa de secagem no intervalo entre a madeira verde, no seu teor de umidade inicial, até quando ela se aproxima do PSF, aproximadamente aos 30% de umidade. Esses tratamentos (T2 e T4) foram os mesmos que apresentaram menores densidade e maiores teores de umidade iniciais, estas

informações facilitam a compreensão do desempenho inicial das curvas de secagem (Figura 3B) e das taxas iniciais (Tabela 8), pois se trata do movimento de água livre. Braz et al. (2015) afirmam que de maneira geral, o movimento da água livre presente nas cavidades celulares dos elementos vasculares da madeira acontece facilmente através da evaporação, uma vez que a água livre se mantém na madeira por forças capilares, perdendo-se esse tipo de água com maior facilidade, o que garante maiores taxas de secagem iniciais.

Os defeitos de secagem apresentaram, em geral, baixos índices, com destaque para os tratamentos da procedência C1, com e sem adubação, apresentaram ausência do defeito de rachadura. Segundo Damayanti et al. (2020) um fator que está relacionado à qualidade da secagem é a permeabilidade da madeira, e a espécie apresenta boa permeabilidade, sendo o cerne da madeira jovem de teca menos permeável que o alburno.

Os tratamentos em que a adubação demonstrou efeito positivo apresentaram indivíduos de maiores diâmetros quando comparados aos que não foram adubados. As árvores de mesma procedência que receberam a adubação investiram mais em incremento radial e altura (Tabela 1). Em contrapartida, as suas densidades foram menores (Tabela 10).

O T4 foi o único tratamento que apresentou uma densidade que se configura como madeira leve, enquanto os demais tratamentos foram classificados como madeiras de densidade média, de acordo com a classificação utilizada por Florez *et al.* (2014). Os valores de densidade que foram obtidos neste trabalho estão de acordo com trabalhos já disponíveis na literatura sobre a espécie. Dias *et al.* (2018) encontraram densidade básica de $0,51 \text{ g.cm}^{-3}$ ao avaliarem indivíduos aos 13 anos de idade no estado de Minas Gerais. Flórez *et al.* (2014), avaliando a densidade básica em 9 árvores de *Tectona grandis* também aos 13 anos de idade, encontraram valor médio de $0,53 \text{ g.cm}^{-3}$. Chagas *et al.* (2014) encontraram $0,518 \text{ g.cm}^{-3}$ de densidade básica para a espécie aos 12 anos.

Para a densidade da madeira, a adubação, bem como a interação procedência:adubação, mostraram-se significativas, portanto, houve influência destas variáveis na densidade da madeira de teca. As áreas que foram adubadas, independente da procedência, não diferiram quanto à densidade do material coletado. Em contrapartida nas áreas onde não houve adubação, algumas procedências deferiram, revelando o clone C2, com a maior densidade dentre todos. A procedência C2 sem adubação apresentou além da maior densidade a menor umidade inicial dentre os demais materiais genéticos avaliados (Tabela 10), e esteve entre as menores Ts iniciais (Tabela 6). Soares *et al.* (2016) encontraram relação semelhante, comparando o processo de secagem de regiões de lenho juvenil e lenho adulto em espécies de Eucalipto. Segundo os

autores, as amostras com menor densidade básica foram aquelas que apresentaram maior teor de umidade inicial, e atingiram o teor de umidade final mais rapidamente, apresentando taxas de secagem maiores. Outros autores também encontraram esta relação, e a importância da densidade básica da madeira na predição do comportamento desta durante a etapa de secagem é bem difundida, sendo possível fazer inferências de que quanto maior a densidade básica, menores serão as taxas de secagem da madeira (BRAZ et al, 2015; OLIVEIRA et al., 2010). Sobre os resultados para o teor de umidade, Favalessa *et al.* (2012) afirmam que o teor de umidade é inversamente proporcional à densidade da madeira. Corroborando o que foi constatado na madeira em estudo.

O coeficiente de anisotropia encontrado (Tabela 10) classifica a madeira na maioria dos tratamentos como normal, sendo ela considerada estável quanto a variação dimensional, fator que favorece o desempenho da secagem, com reduzida propensão à ocorrência de defeitos durante o processo. Apenas os tratamentos T3 e T4 estiveram acima do limite para considerar a madeira como normal, pela classificação adotada. Para Logsdon et al. (2008) o coeficiente de anisotropia é o principal índice para avaliar a estabilidade dimensional da madeira. Segundo Gonçalves et al. (2009) este parâmetro é importante, pois prevê o comportamento da madeira em relação à secagem, podendo indicar maior ou menor propensão a defeitos de empenamentos, rachaduras e colapso. Motta *et al.* (2014) afirmam que um baixo fator anisotrópico indica que a madeira é menos propensa a fendilhamento e empenamentos durante as alterações dimensionais, provocadas pela variação dimensional durante o processo de secagem, sendo, conseqüentemente, mais estáveis.

A contração volumétrica (β_v) encontrada neste trabalho é considerada acima dos dados dispostos na literatura para a espécie (MIRANDA *et al.* 2011; WANNENG *et al.*, 2014). A contração volumétrica é um fator que representa a estabilidade da madeira. Embora os valores encontrados neste trabalho sejam elevados, se comparado à contração volumétrica de outras espécies, com finalidades compatíveis às da *Tectona grandis* e que competem em rápido crescimento e potencial para aplicações em produtos de alto valor agregado, o percentual de contração da *Tectona grandis* é, em geral, mais baixo: Mogno africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.) $\beta_v = 10,60\%$ (REZENDE et al., 2012); Cedro australiano (*Toona ciliata*) $\beta_v = 14,73\%$ (BRAZ et al., 2013). Portanto, com os valores encontrados para a contração volumétrica, a madeira de *Tectona grandis* ainda se destaca por sua estabilidade dimensional.

Visto que as condições do plantio influenciaram nos parâmetros de secagem para madeiras de uma mesma espécie, a execução dos programas de secagem se mostrou ainda mais

indispensável. Os defeitos para os tratamentos não diferiram dentro de cada programa avaliado, foi realizada a comparação percentual de defeitos por programa e uma classificação de intensidade dos mesmos, utilizando o total geral de tábuas (Tabela 11). Segundo Gonçalves et al. (2007) a madeira com maior proporção de lenho juvenil, apresenta maiores variações nas características físicas e anatômicas, que são fatores que influenciam na secagem. Entretanto, Paes et al (2015) consideraram o lenho juvenil da madeira de teca com potencial para movelaria, pois apresenta fácil usinagem, trabalhabilidade, colagem e acabamento. Outro fator que está relacionado à qualidade da secagem é a permeabilidade da madeira, segundo Damayanti et al. (2020) o cerne da madeira jovem de teca é menos permeável que o alburno.

Apesar dos programas utilizados apresentarem parâmetros de secagem diferentes, os defeitos não diferiram dentre as 8 condições avaliadas, mantendo semelhante a qualidade final da madeira serrada. Trujillo et.al. (2021) afirmam que fatores como da velocidade do ar, posição da madeira no fuste ou da umidade inicial não afetaram a qualidade da secagem de *Tectona grandis*. A pequena porcentagem de defeitos fortes apresentada nos dois programas executados (Tabela 11), confirma que além de ser uma espécie com um bom desempenho em secagem ao ar livre, como foi observado por Braz et al. (2015) e Trujillo et al. (2021), a teca também se destaca com bons resultados na secagem convencional.

O programa brando, apesar de se tratar de um programa de secagem com parâmetros mais suaves, apresentou uma porcentagem maior de tábuas com o defeito forte de arqueamento. Segundo Martins (1988), o defeito de arqueamento é causado pela diferença na contração longitudinal entre laterais da mesma peça de madeira. Sendo que a parte mais central da tora se contrai mais longitudinalmente do que a madeira da parte externa. Portanto, a posição de retirada das peças no desdobro exerce influência no desempenho do produto e o resultado observado nesse estudo pode ter ocorrido por conta da posição das peças.

Segundo Barbosa et al. (2005) a secagem conjunta de diferentes clones, mesmo sendo de um mesmo grupo, deve ser controlada em função do clone que apresenta maior tendência a defeitos e menor velocidade de secagem. Entretanto, os resultados apresentados na tabela 7, bem como na figura 2, contribuem para afirmar que a secagem com o programa rigoroso é a mais adequada para as madeiras nas condições estudadas, pois, a secagem rigorosa demanda um menor tempo no processo, as temperaturas maiores vão garantir uma secagem mais rápida e quanto menor o tempo gasto na execução do programa, há uma redução nos custos do processo. Segundo Loiola (2019) a indústria de transformação tem dedicado esforços para otimizar o processo de secagem com métodos que proporcione redução no tempo sem provocar

defeitos. A decisão quanto ao método de secagem afeta diretamente os custos do processo produtivo, em relação ao tempo de secagem, nível de especificidade do processo, a qualidade esperada para o material seco e a possibilidade de obtenção do teor de umidade nos padrões adequados para a manufatura do produto.

5.CONCLUSÕES

As análises realizadas permitem concluir que os diferentes materiais genéticos de teca não influenciam nas temperaturas inicial e final do programa de secagem.

A adubação é benéfica para o potencial de secagem em C1, C2 e SE, aumentando este parâmetro em materiais genéticos adubados. O material proveniente de áreas adubadas apresenta menores densidade da madeira, e maiores taxas de secagem o que favorece uma secagem mais veloz, e conseqüentemente, maiores potenciais de secagem quando comparados aos indivíduos que não foram adubados.

Os programas de secagem avaliados apresentam qualidade final da madeira serrada semelhante, e ocorrência moderada de defeitos. O programa rigoroso ($T_i=51^{\circ}\text{C}$, $T_f=76^{\circ}\text{C}$ e $PS=3,0$) é o programa mais indicado para a madeira em estudo, pois espera-se que uma secagem mais veloz reduza os custos do processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, S.A.; CHUN, S. K. Permeability of *Tactona grandis* L. as affected by wood structure. **Wood Science and Tecnology**, Zurich, v.45, n.3, p. 487-500, Aug. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: projetos de estruturas de madeira – Rio de Janeiro, 107p, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: Madeira: Determinação da massa específica básica. Rio de Janeiro, 2003.

BARAUNA, Edy Eime Pereira et al . Effect of anatomical and chemical structure in the permeability of "Amapá" wood. **CERNE**, Lavras, v. 20, n. 4, p. 529-534, dic. 2014.

BONDUELLE, G.M.; IWAKIRI, S.; TRIANOSKI, R.; PRATA, J.G.; DA ROCHA, V.Y. Análise da massa específica e da retratibilidade da madeira de *Tectona grandis* nos sentidos axial e radial do tronco. **Revista Floresta**, Curitiba, vol. 45, n. 4, p. 671-680, 2015.

BRAZ, R. L.; OLIVEIRA, J. T. S.; RODRIGUES, B. P.; ARANTES, M. D. C. Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Toona ciliata* em diferentes idades. **Floresta**, Curitiba, v. 43, p. 663-670, 2013.

BRAZ, R. L.; DUARTE, A. P. C.; OLIVEIRA, J. T. S.; MOTTA, J. P.; ROSADO, A. M. Curva característica de secagem da madeira de *Tectona grandis* e *Acacia mangium* ao ar livre. **Floresta e Ambiente**, v. 22, p. 117-123, 2015.

BRITO, J.O.; FERRAZ, E. S. B.; BARRICHELLO, L.E. G. A adubação mineral e seus efeitos sobre os anéis de crescimento da madeira de *Pinus caribaea* var. *bahamensis*. **IPEF**, v.32, p.5-17, 1986.

BURGER, L. M.; RICHTER, H.G. **Anatomia da Madeira**. Nobel, p. 153, v.1, 1991.

CHAGAS, S. F.; EVANGELISTA, W. V.; SILVA, J. C.; MACEDO, A. M.; CARVALHO, L. Propriedades da madeira de teca de diferentes idades e oriundas de desbaste. **Ciência da Madeira**, v. 5, n. 2, p. 138-150, 2014.

DAMAYANTI, R., KRISDIANTO, ILIC, J., PARI, G., VINDEN, P. E OZARSKA, B. Wood Permeability Assessment of Young Teak (*Tectona grandis* L.f.). **Wood Research Journal**. 11(2), 2020.

DIAS, A. C. C.; MARCHESAN, R.; ALMEIDA, V. C.; MONTEIRO, T. C.; MORAES, C. B. Relação entre a densidade básica e as retrações em madeira de teca. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**. V.9, p. 37-44, 2018.

DURLO, M. A.; MARCHIORI, J. N. C. **Tecnologia da madeira: Retratabilidade**. Santa Maria: CEPEF/FATEC, 1992, 33p.

ENGELUND, E. T. et al. A critical discussion of the physics of wood-water interactions. **Wood Science and Technology**, New York, v. 47, p. 141-161, 2013.

FAVALESSA, C. M. C.; UBIALLI, J. A.; CALDEIRA, S. F.; DRESCHER, R.; ACOSTA, F. C. Equações de sortimentos para *Tectona grandis* na região centro-sul de Mato Grosso. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 72, p. 389-399, 2012.

FLORÉZ, J. B.; TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; HEIN, P. R. G.; SILVA, J. R. M. Caracterización de la madera joven de *Tectona grandis* L.f plantada en Brasil. **Madera y Bosques**, Xalapa, v. 20, n.1 p. 11-20, 2014.

FRANÇA, T. S. F. A.; ARANTES, M. D. C.; PAES, J. B.; VIDAURRE, G. B.; OLIVEIRA, J. T. S.; BARAÚNA, E. E. P. Características anatômicas e propriedades físico-mecânicas das madeiras de duas espécies de mogno africano. **Cerne**, Lavras, v. 21, n. 4, p. 633-640, 2015.

GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel, 111 p. 1985.

GONÇALVES, F. G.; OLIVEIRA, J. T. S.; DELLA LUCIA, R.M.; NAPPO, M.E.; SARTÓRIO, R.C. Densidade e variação dimensional de um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. **Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 2, p. 277-288, 2009.

JANKOWSKY, I. P. Metodologia simplificada para a indicação de programas de secagem. 112f. **Tese** (Livre docência em Ciência e Tecnologia da Madeira), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2009.

JANKOWSKY, I. Secagem de madeira equipamento e processos. **Revista da madeira** - Nº128 – AGO. 2011.

LEPAGE, E. S. et al. **Manual de preservação de madeiras**. São Paulo, IPT. 2. Ed. 708p. 1986.

LIMA, I.L.; GARCIA, J.N. EFEITO DA FERTILIZAÇÃO EM PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA DE *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 3, p. 601-608, 2011.

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

MEDEIROS, B. L. M. A.; GUIMARÃES JUNIOR, J. B.; RIBEIRO, M. X.; LISBOA, F. J. N.; GUIMARÃES, I. L., T. P. PROTÁSIO. Avaliação das propriedades físicas e químicas da madeira de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* cultivadas no Piauí. **Nativa**, Sinop, v.4, n.6, p.403-407, 2016.

MIRANDA, I.; SOUSA, V.; PEREIRA, H. Wood properties of teak (*Tectona grandis*) from a mature unmanaged stand in East Timor. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 57, n. 3, p. 171-178, 2011.

MONTEIRO, T.C. et al. Efeito dos elementos anatômicos da madeira na secagem das toras de *Eucalyptus* e *Corymbia*. **Scientia Forestalis**., Piracicaba, v. 45, n. 115, p. 493-505, set. 2017.

MONTEIRO, T. C.; LIMA, J. T. Water Flow Through the Pits in *Eucalyptus urophylla* Wood. **Floresta e Ambiente**. V. 27, p. e20190092, 2020.

MOTTA, J. P.; OLIVEIRA, J. T. S.; BRAZ, R. L.; DUARTE, A. P. C.; ALVES, R. C. Caracterização da madeira de quatro espécies florestais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.44 n.12, p.2186-2192, 2014.

NASCIMENTO, T. M.; MONTEIRO, T.C.; BARAUNA, E. E. P.; MOULIN, J. C.; AZEVEDO, A. M. Drying influence on the development of cracks in *Eucalyptus* logs. **BioResources**, v. 14, p. 220-233, 2019.

OLIVEIRA, J. T. S.; TOMAZELLO FILHO, M; FIEDLER, N. C. Avaliação da retratibilidade da madeira de sete espécies de *Eucalyptus*. **Árvore**, Viçosa, v.34, n.5, p.929-936. 2010.

PANSHIN, A. J.; ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 4 ed. New York: McGraw Hill, 1980. 722 p.

PELISSARI, A. L.; GUIMARÃES, P. P.; BEHLING, A.; EBLING, A. A. Cultivo da teca: características da espécie para implantação e condução de povoamentos florestais. *Agrarian academy*, Goiânia, v.1, n.1; p.127-145, 2014.

PERRÉ, P. Experimental device for the accurate determination of Wood-water relations on micro-samples. **Holzforshung**. Berlin, v.61, p. 419-429, 2007.

REZENDE, R. N.; LIMA, J. T.; PAULA, L. E. R.; HEIN, P. R. G.; SILVA, J. R. M. Wood Permeability in *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus dunnii*. **Floresta e Ambiente**, seropédica, v.25, n1. 2018.

SANTOS, GRV; JANKOWSKY, IP; ANDRADE, A. CURVA CARACTERÍSTICA DE SECAGEM PARA MADEIRA DE *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, 2003.

SETTE JR., C.R.; DEUS JR, J.C.; TOMAZELLO FILHO, M.; PÁDUA, F.A., CALIL, F.N.; LACLAU, J.P. Alterações na qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis* causadas pela adubação mineral. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 2, p. 251-258. 2014.

SIAU, J. F. **Flow in wood**. Syracuse: Syracuse University, 1971. 131 p.

SKAAR, C. J. **Water in wood**. Syracuse: Syracuse University, 1972. 218 p.

SOARES, B. C. D.; LIMA, J. T.; SILVA, J. R. M. Analysing the drying behavior of juvenile and mature *Eucalyptus saligna* wood in drastic drying test for optimal drying schedule. **Maderas-Ciencia y Tecnologia**, v. 18, n.1, p. 543-554, 2016.

SUSIN, F.; SANTINI, E.J.; STANGERLIN, D.M.; MORAIS, W.W.C.; MELO, R.R. Taxa de Secagem e Qualidade da Madeira Serrada de *Hovenia dulcis* Submetida a Dois Métodos de Secagem. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v.21, n. 2, p. 243-250, 2014.

TARMIAN, A.; PERRÉ, P. Air permeability in longitudinal and radial directions of compression wood of *Picea abies* L. and tension wood of *Fagus sylvatica* L. **Holzforschung**. v.63, n.3, pg.352-356 · May 2009.

TRUJILLO, F. T.; KLITZKE, R. J.; ROCHA, M. P.; MORA, H. E. G.; SEGURA, C. E. C. THE EFFECT OF AIR VELOCITY ON THE CHARACTERISTICS PRODUCED BY CONVENTIONAL DRYING OF *Tectona grandis* L.f. WOOD. **FLORESTA**, CURITIBA, v. 51, p. 1019-1028, 2021.

VIEIRA, C. R.; WEBER, O. L. S.; SCARAMUZZ, J. F. Adubação nos Teores de Cinzas, Carbono e Relação C/N de Teca. **UNICIÊNCIAS**, v. 22, n. 2, p. 124-130, 2018.

WANNENG, P. X.; OZARSKA, B.; DAIAN, M. S. Physical properties of *Tectona grandis* grown in Laos. **Journal of Tropical Forest Science**, Malaysia, v. 26, n. 3, p. 389 –396, 2014.

YANG, L.; LIU, H. A Review of Eucalyptus Wood Collapse and its Control during Drying. **BioResources**, v.13, n.1, p. 2171-2181, 2018.

CAPÍTULO II

EFICIÊNCIA DO USO DE CO₂ SUPERCRÍTICO PARA SECAGEM DE MADEIRAS

RESUMO

A secagem com o CO₂ supercrítico é uma metodologia ainda pouco difundida, porém confirmando sua eficácia e aplicabilidade é uma técnica que se destaca como uma possibilidade futura de aplicação, pois o contato do CO₂ no seu estado supercrítico com a madeira pode reduzir significativamente o tempo do processo convencional. O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência da utilização do CO₂ supercrítico na extração de água, determinar as condições (tempo, temperatura e pressão) mais adequadas para a efetiva extração de água na madeira e avaliar o efeito da utilização de pré-tratamento com CO₂ supercrítico na secagem de madeiras predispostas à ocorrência de defeitos de secagem. Foi utilizado Delineamento Composto Central Rotacional, avaliou-se a faixa de pressão entre 80 e 200 bar, temperatura entre 40 e 90°C e tempo de 10 a 30 minutos. O planejamento experimental mostrou que o dióxido de carbono supercrítico pode ser utilizado para a extração de água, sendo a condição ótima T=80°C, P=175,7 bar e t=26 min. A pressão linear foi a variável que mais influenciou no desempenho da secagem, entretanto, foram observadas algumas limitações que sugerem a necessidade de estudos futuros mais detalhados sobre esta metodologia.

ABSTRACT

Drying with supercritical CO₂ is a methodology that is still not widespread, but confirming its effectiveness and applicability, it is a technique that stands out as a future possibility of application, since the contact of CO₂ in its supercritical state with the wood can significantly reduce the drying time. conventional process. The objective of this work was to evaluate the efficiency of the use of supercritical CO₂ in the extraction of water, to determine the most suitable conditions (time, temperature and pressure) for the effective extraction of water in the wood and to evaluate the effect of the use of pre-treatment with CO₂ supercritical in the drying of wood predisposed to the occurrence of drying defects. Central Composite Rotational Design was used, the pressure range between 80 and 200 bar, temperature between 40 and 90°C and time from 10 to 30 minutes were evaluated. The experimental design showed that supercritical carbon dioxide can be used for water extraction, with the optimal condition being T=80°C, P=175.7 bar and t=26 min. Linear pressure was the variable that most influenced drying performance, however, some limitations were observed that suggest the need for more detailed future studies on this methodology.

1. INTRODUÇÃO

O *Eucalyptus pellita* é uma espécie do gênero *Eucalyptus*, pertence à família myrtaceae e apresenta, em geral, crescimento inferior à demais espécies de *Eucalyptus* que são mais comercializadas no Brasil (ZANATA Et al., 2010). Entretanto, ela possui tolerância à seca (MULLER et al., 2015), adaptando-se bem ao clima do país, de acordo com suas exigências climáticas. Pode ser cultivada do Sudeste ao Norte, também em algumas regiões no litoral do Nordeste (FLORES et al., 2016).

Segundo Clarke et al. (2009) o *Eucalyptus pellita* apresenta bom crescimento, é resistente à pragas, se adapta a uma variedade de condições ambientais e possui madeira multiuso. A espécie exerce também um papel importante no reflorestamento comercial em países como Indonésia, Malásia, Filipinas e Austrália (AMEZQUITA et al., 2018). No Brasil, as florestas de *E. pellita* têm sido implantadas com objetivo principal para a produção de carvão vegetal, devido às características de densidade desta espécie (OLIVEIRA et al., 2010), ela apresenta também propriedades químicas interessantes para a produção de celulose e papel (ARISANDI et al., 2019).

A predisposição da madeira do gênero *Eucalyptus* quanto à ocorrência de defeitos durante a secagem é amplamente discutida (SEVERO, 2000; KLITZKE e BATISTA, 2010; BATISTA et al., 2015; ZEN et al., 2019; SILVA et al., 2021). A dificuldade de se obter madeira seca com qualidade é um dos maiores obstáculos quando se trata da secagem da madeira do gênero (ZEN et al, 2019). De acordo com Santini (1992), é fundamental adotar os processos adequados na secagem, para obtenção de um produto com maior qualidade, como baixas temperaturas e alta umidade relativa nas etapas iniciais, visando minimizar a ocorrência de defeitos.

É importante investir na utilização de técnicas associadas para a realização de pré secagem, muitos estudiosos também usam métodos especiais de secagem para secar o eucalipto, como secagem a vácuo, secagem por micro-ondas (TALGATTI et al., 2020), liofilização e secagem solar (SHEN, 2020) pré-tratamento com vaporização (REZENDE et al., 2015; PACE et al., 2019). A utilização do CO₂ supercrítico é uma das alternativas, segundo Zhang (2020) a secagem com CO₂ supercrítico tem as vantagens de taxa de secagem rápida, proteção ambiental e operação simples.

O fluido quando submetido à pressão e temperatura acima do seu ponto crítico, torna-se supercrítico. Várias propriedades dos fluidos são alteradas sob essas condições, tornando-se parecidas com as de alguns gases e líquidos. A densidade do fluido supercrítico é similar à dos

líquidos, sua viscosidade assemelha-se à dos gases e sua capacidade de difusão é intermediária entre os dois estados (CARRILHO et al. 2001).

O dióxido de carbono é o solvente supercrítico mais popularizado, porque ele é seguro e facilmente disponível. É o solvente ideal para extração de produtos naturais, pois é de baixa toxicidade, não explosivo, prontamente disponível e fácil de remover a partir de produtos extraídos (REVERCHON; DE MARCO, 2006). Contudo, a sua utilização não está ainda mais difundida devido ao custo inerente da tecnologia a alta pressão. Na área da conservação e restauro de patrimônio histórico e cultural, a aplicação desta tecnologia torna-se mais atrativa dado o elevado valor dos artefatos em causa (AGUIAR et al. 2007).

O CO₂ supercrítico provou ser uma alternativa interessante aos solventes orgânicos convencionais na extração de produtos naturais, em reações químicas envolvendo reagentes gasosos, na produção de polímeros e na formação de partículas. Foi demonstrado que a remoção da água do lume usando o ciclo de pressão supercrítico de CO₂ reduz a ação do menisco (PEARSON et. al, 2019).

O CO₂ supercrítico apresenta um poder solvente apreciável com capacidade de dissolução de alguns sólidos. Característica que desperta o interesse na utilização do CO₂ é que no estado supercrítico o seu poder solvente pode ser controlado por pequenas variações de pressão, conseguindo-se assim controlar a sua ação com seletividade (CARRILHO et al. 2001). Obras de arte em madeira, devido à sua elevada higroscopicidade, quando expostas às flutuações de umidade e temperatura ao longo do tempo, podem sofrer danos e alterações das suas superfícies. No campo da conservação e restauro de madeira, a aplicação de fluidos supercríticos à secagem de material arqueológico que esteve submerso, tem-se mostrado muito promissora como alternativa aos métodos convencionais de secagem (AGUIAR et al. 2007). Pode ser usado, também, para secar materiais delicados de origem arqueológica tais como madeira em diversos estágios de decomposição, cortiça, ossos e outros materiais sem ser preciso adicionar um consolidante.

Os tratamentos correntes que utilizam consolidantes, tais como o polietilenoglicol (PEG), são usados para suportar as paredes das células e evitar o seu colapso. É por esta razão que a maioria dos métodos de secagem podem levar meses, não só para minimizarem o encolhimento dos artefatos, mas também porque a difusão do agente consolidante no interior da madeira é o passo limitante do processo. A secagem supercrítica reduz significativamente o tempo do processo convencional de meses para alguns dias e os objetos mantêm o seu tamanho e a sua forma estrutural, sem apresentarem modificações químicas (AGUIAR et al. 2007).

Pearson et al. (2019) desenvolveram um modelo computacional da dinâmica de fluidos durante a desidratação de um tubo capilar simples para prever e otimizar a desidratação de dois materiais porosos, a cerâmica e a madeira. Os autores perceberam que a pressão exerce o maior efeito sobre a desidratação, o modelo previu a desidratação adequadamente, fornecendo informações empíricas sobre tortuosidade e porosidade, incorporadas ao coeficiente de difusão como parâmetro agregado.

O tratamento supercrítico de CO₂ para amostras de madeira envolve o aumento da pressão de CO₂ ao redor das amostras, condição mantida por um período de incubação para que o CO₂ possa se difundir na seiva da amostra (água), enquanto a câmara de tratamento é mantida à temperatura pré-estabelecida. Então é realizada a despressurização, desativada a pressão atmosférica resultando em conversão do fluido supercrítico para a fase gasosa CO₂ dentro da amostra, o que força a água a sair das células (Dawson et al. 2015; Dawson e Pearson 2017). O dióxido de carbono (CO₂) se destaca por possuir baixo custo, estar prontamente disponível em alta pureza, ser seguro de manusear, inerte e por ser considerado ambientalmente correto, comparado com outros solventes. Além disso, sua alta volatilidade permite que seja completamente e facilmente removido do processo (BRUNNER, 2005; SANTOS et al., 2016).

O objetivo deste trabalho foi de avaliar a eficiência da utilização do CO₂ supercrítico na extração de água em madeiras. Determinando as condições (tempo, temperatura e pressão) mais adequadas para a efetiva extração de água na madeira e avaliar o efeito da utilização de pré-tratamento com CO₂ supercrítico na secagem de madeiras predispostas à ocorrência de colapso.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Obtenção do material

A espécie utilizada para as análises foi o *Eucalyptus pellita*, proveniente de plantio experimental da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. A cada extração foram utilizadas 16 amostras com dimensões unitárias de 8x8x8 mm, retiradas de região de cerne. A quantidade de amostras por extração foi definida de acordo com a capacidade do extrator. As amostras foram colocadas de forma aleatória quanto a sua direção estrutural, para evitar direcionar o comportamento do CO₂ no extrator, contribuindo para que a dispersão do CO₂ durante a extração não apresentasse um caminho preferencial.

Extração com fluido supercrítico: aparato experimental

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Termodinâmica Aplicada e Biocombustíveis (LTAB), localizado no Departamento de Engenharia Química do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. O tratamento supercrítico de CO₂ nas amostras de madeira foi realizado em câmara de tratamento, como apresentado na figura 6, com as condições de temperatura, pressão e tempo definidas pelo planejamento de experimentos.

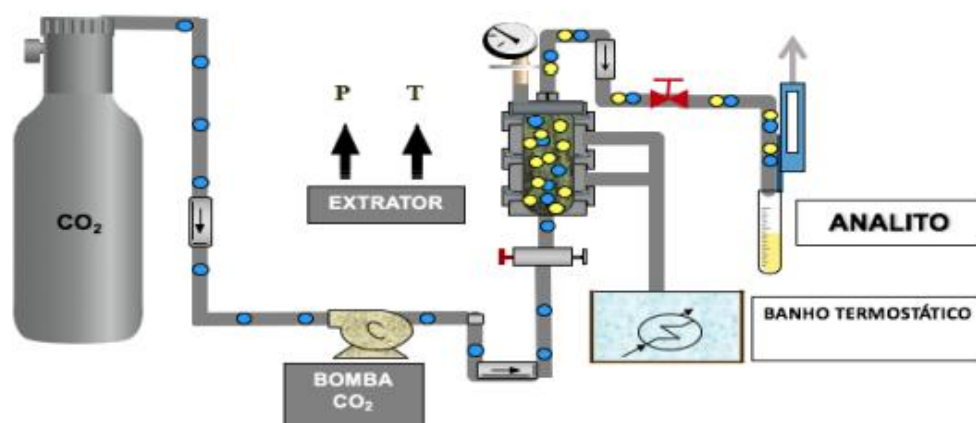


Figura 6. Esquema ilustrativo do processo de extração usando CO₂ supercrítico (BESSA, 2018).

Planejamento de Experimentos

Os experimentos de extração de água da madeira com fluido supercrítico foram realizados segundo um Delineamento Composto Central Rotacional (DDCR), sendo esse delineamento de segunda ordem. O planejamento tem como objetivo avaliar diferentes condições de temperatura, pressão e tempo que interferem na secagem utilizando fluido supercrítico, buscando uma condição experimental ótima. De acordo com informações dispostas na literatura sobre o método (Dawson et al., 2015; Pearson et al., 2019), escolheu-se a faixa de pressão entre 80 e 200 bar, temperatura entre 40 e 90°C e tempo de 10 a 30 minutos. A correspondência entre as variáveis reais e codificadas de temperatura, pressão e tempo estão apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12. Tabela de fatores e níveis correspondentes ao experimento.

	Correspondência entre as variáveis				
	-1,68179	-1	0	+1	+1,68179
Temperatura [°C]	40	50,0	65	80,0	90
Pressão [bar]	80	104,3	140	175,7	200
tempo [min]	10	14,0	20	26,0	30

Com isso, utilizando o DDCR de segunda ordem, geraram-se 17 experimentos, sendo o ponto central realizado em triplicata. Todas as condições experimentais, explicitando os valores das variáveis, temperatura, pressão e tempo, podem ser visualizadas na Tabela 13.

Tabela 13. Matriz de Planejamento Fatorial Composto Rotacional aplicada à secagem de *Eucalyptus pellita*.

Experimentos	Variáveis codificadas			Variáveis independentes		
	T	P	T	T	P	T
1	-1	+1	+1	50,0	175,7	26,0
2	+1	-1	+1	80,0	104,3	26,0
3	+1	+1	+1	80,0	175,7	26,0
4	0	0	0	65	140	20
5	1,68179	0	0	90	140	20
6	+1	-1	-1	80,0	104,3	14,0
7	+1	+1	-1	80,0	175,7	14,0
8	0	0	0	65	140	20
9	0	1,68179	0	65	200	20
10	0	0	0	65	140	20
11	0	-1,68179	0	65	80	20
12	0	0	1,68179	65	140	30
13	-1,68179	0	0	40	140	20
14	-1	+1	-1	50,0	175,7	14,0
15	0	0	-1,68179	65	140	10
16	-1	-1	-1	50,0	104,3	14,0
17	-1	-1	+1	50,0	104,3	26,0

Em que: T= Temperatura (°C), P= Pressão (bar) e t= Tempo (minutos).

Determinação do teor de umidade da amostra

Teor de umidade foi determinado utilizando balança de precisão, para obtenção da massa das amostras antes de serem inseridas no extrator, após a extração e a massa seca. Para determinar a massa seca, após cada extração, as amostras eram submetidas à estufa com aproximadamente 100°C, por 24h.

Assim que a massa inicial era obtida as amostras eram direcionadas ao equipamento para o ensaio. Teor de umidade inicial foi definido pela equação (7).

Teor de umidade inicial (U_i):

$$U_i (\%) = [(m_i - m_s) \div m_s] \times 100 \quad (7)$$

Em que: U_i = Teor de umidade inicial; m_i = massa inicial; m_s = massa seca.

O teor de água presente na amostra após a extração realizada, foi medido usando a massa de cada amostra ao final do ensaio. Com isso, determina-se o teor de umidade da amostra a partir da equação 8.

Teor de umidade final (U_f):

$$U_f = (m_f - m_s) \div m_s \quad (8)$$

Em que: U_f = Teor de umidade final; m_f = massa ao final da extração; m_s = massa seca.

Avaliação do tratamento com CO₂ supercrítico

Para avaliar o efeito da utilização do supercrítico foram utilizados dois tratamentos:

- 1- Secagem da madeira com tratamento em CO₂ supercrítico na condição experimental de melhor desempenho;
- 2- Secagem da madeira em estufa com a temperatura definida pelo planejamento de experimentos.

As amostras foram mantidas submersas em água para garantir a saturação no momento da secagem, minutos antes da pesagem inicial elas foram retiradas da água para evitar equívocos na obtenção massa inicial. O material foi submetido à secagem na mesma temperatura, condição definida pelo planejamento de experimentos, e foi avaliada a qualidade desse material após a secagem em relação a presença de colapso.

3. RESULTADOS

As extrações com fluido supercrítico foram realizadas para diferentes condições de temperatura, pressão e tempo, determinadas a partir do planejamento de experimentos mostrado na Tabela 13. Dessa maneira, a Tabela 14 apresenta as condições experimentais de temperatura, pressão e tempo, o teor de umidade inicial, final e a porcentagem de umidade extraída, para os tratamentos realizados.

Tabela 14. Umidade inicial, umidade final e variação de umidade para cada condição experimental.

Condição do experimento	Ui (%)	Uf (%)	ΔU (%)
T= 50°C/ P=104,3 bar / t= 26 min.	96,82	84,03	12,79
T=65°C / P=140 bar / t=10 min.	112,32	85,72	26,60
T= 65°C / P= 80 bar / t= 20 min.	107,05	86,95	20,10
T= 80°C / P= 175,7 bar /t= 14 min.	104,76	70,26	34,50
T= 80°C/ P= 104,3 bar/ t= 26 min.	111,08	85,4	25,68
T= 80°C / P=104,3bar / t=14 min.	101,86	77,38	24,48
T=50°C/ P=104,3bar t=14 min.	104,14	81,93	22,21
T=50°C P=175,7 bar t=14 min.	104,81	79,79	25,02
T=50 °C P=175,7 bar t=26 min.	122,47	86,63	35,84
T=65 °C e P=140 bar t=20 min.	124,67	92,1	32,57
T=65 °C P=140 bar t=20 min.	123,6	92,48	31,12
T=65 °C P=140 bar t=20 min.	121,33	87,79	33,54
T=40°C P=140 bar t=20 min.	111,48	88,01	23,47
T=80°C P=175,7 bar t=26 min.	120,69	82,01	38,68
T=65 °C P=140 bar t=30 min.	125,67	91,91	33,76
T=65°C P=200 bar t=20 min.	118,85	84,66	34,19
T=90°C P=140 bar t=20 min.	127,95	94,23	33,72

Sendo: Ui= Umidade inicial; Uf= Umidade final; ΔU = variação de umidade

Após a realização de cada condição experimental, os dados referentes à variação de umidade foram direcionados para a análise no software Statistica. A análise de variância dos dados está apresentada na tabela 15.

Tabela 15. ANOVA das variáveis analisadas e suas interações

Fatores	SQ	GL	MQ	F	P	
(1)T(°C)(L)	146,5001	1	146,5001	98,7664	0,0100	*
T(°C)(Q)	28,0279	1	28,0279	18,8957	0,0491	*
(2)P(bar)(L)	385,6924	1	385,6924	260,0232	0,0038	*
P(bar)(Q)	48,8946	1	48,8946	32,9634	0,0290	*
(3)t(min.)(L)	25,7417	1	25,7417	17,3543	0,0531	
t(min.)(Q)	11,6593	1	11,6593	7,8604	0,1072	
1L by 2L	1,0082	1	1,0082	0,6797	0,4964	
1L by 3L	1,9800	1	1,9800	1,3349	0,3673	

2L by 3L	67,3961	1	67,3961	45,4366	0,0213	*
Erro	2,9666	2	1,4833			
Total SQ	750,6561	16				

De acordo com o p-valor apresentado, foi possível observar que algumas variáveis foram significativas, ou seja, com p-valor < 0,05. Dentre todos os fatores analisados, a pressão linear mostrou-se mais significativa frente os demais fatores, apresentando um menor p-valor. Este resultado foi confirmado pelo t-valor, representado pelo gráfico de Pareto (Figura 7).

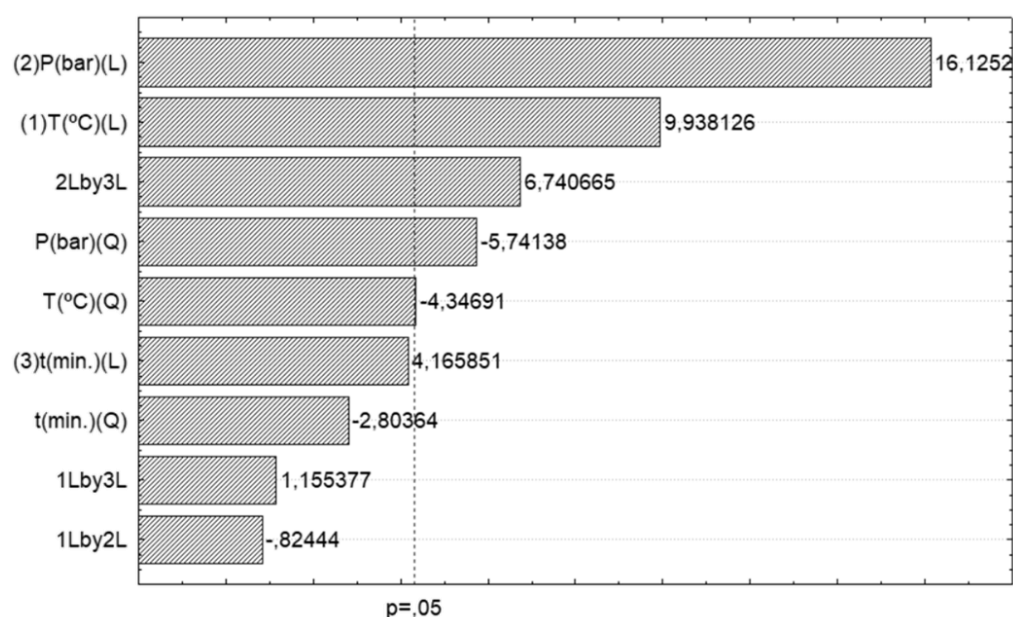


Figura 7. Gráfico de Pareto para a análise do ΔU obtido com CO_2 supercrítico.

A tabela 16 apresenta o coeficiente de regressão, erro padrão e p-valor, calculados a partir dos resultados experimentais e sugerem que o fator linear e quadrático da temperatura, o fator quadrático da pressão e a interação entre a pressão e o tempo foram os parâmetros considerados estatisticamente significativos para o modelo.

Tabela 16. Coeficientes do modelo de regressão, erro padrão e p-valor obtidos a partir dos resultados experimentais.

Fatores	Coeficiente de Regressão	Erro padrão	p-valor
1- Temperatura (L)	1,1242	0,25960	0,049404
Temperatura (Q)	-0,0071	0,00163	0,049060
2- Pressão (L)	0,3779	0,10381	0,067855

Pressão (Q)	-0,0016	0,00028	0,029022
3- Tempo (L)	-0,8834	0,58797	0,271814
Tempo (Q)	-0,0286	0,01021	0,107157
Interação 1(L)-2(L)	-0,0007	0,00080	0,496365
Interação 1(L)-3(L)	0,0055	0,00478	0,367322
Interação 2(L)-3(L)	0,0136	0,00201	0,021308

O coeficiente de determinação foi $R^2=0,9183$, ou seja, o modelo é viável para representar 91,83% da variação total dos parâmetros experimentais observados. Foi possível observar que o p-valor estava de acordo com o nível de confiança estabelecido ($p \leq 0,05$). Esses resultados indicam uma boa concordância entre os valores experimentais e previstos pelo modelo (Figura 8).

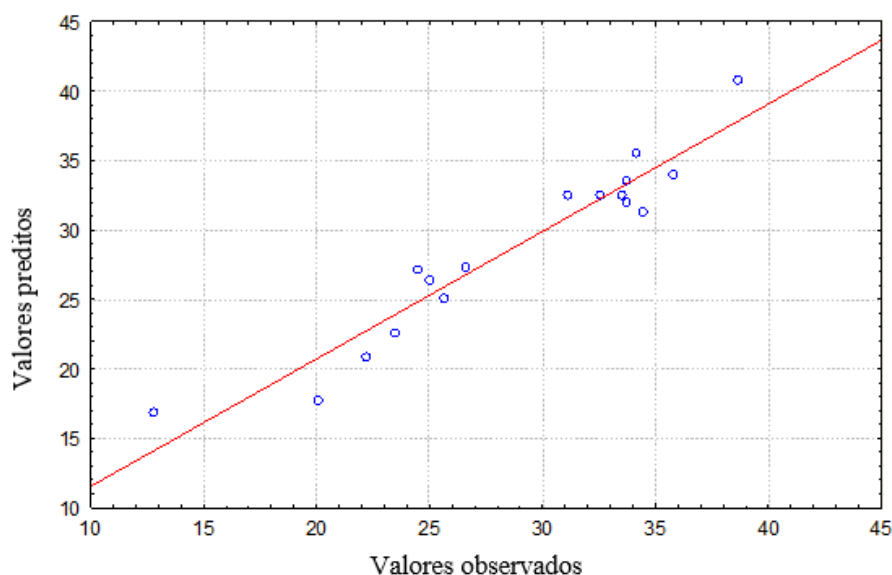


Figura 8. Distribuição dos resíduos: valores preditos pelo modelo e valores observados no experimento para secagem de *Eucalyptus pellita*.

Diante disso, foi possível construir as superfícies de respostas e definir regiões de interesse para análise. Essas superfícies foram geradas com o objetivo de verificar visualmente o comportamento do ΔU com as condições de temperatura, pressão e tempo. As figuras 9 e 10 indicam que com o aumento da pressão associado ao aumento da temperatura, houve a maior extração de água.

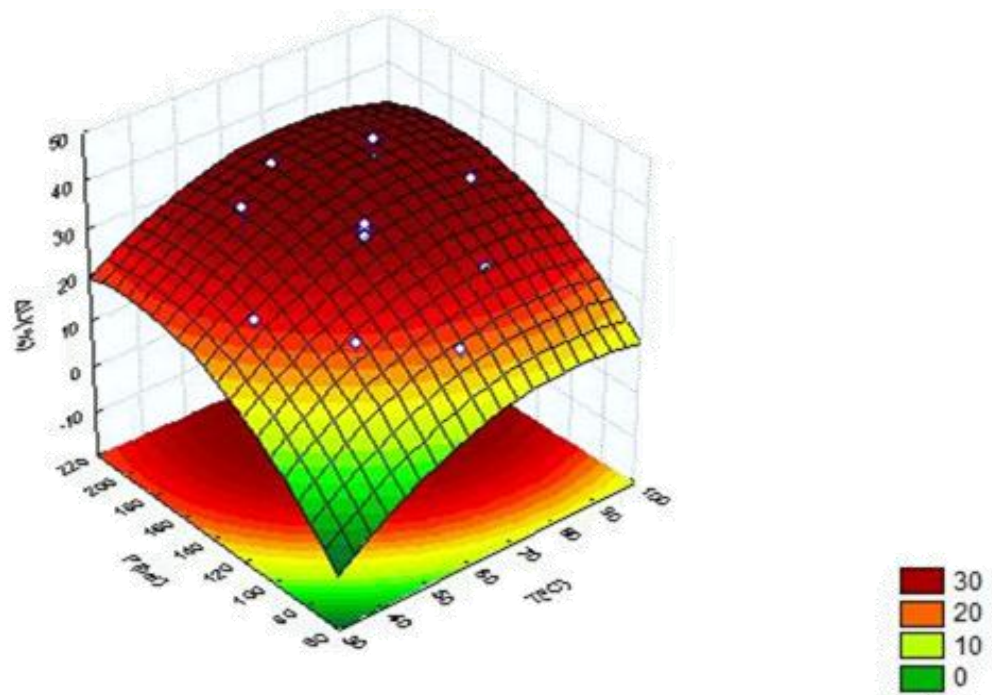


Figura 9. Superfície de resposta para a interação: Pressão x Temperatura

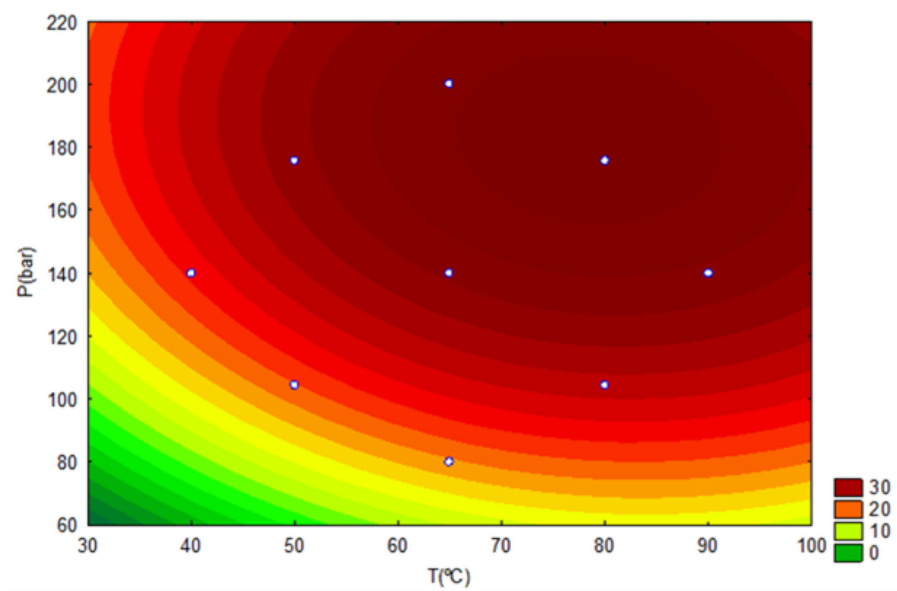


Figura 10. Resposta da interação: Pressão x Temperatura.

Para a interação Tempo x Pressão é possível observar, na superfície de resposta (Figura 11 e Figura 12), que ainda que o experimento tenha ocorrido com o mesmo tempo de contato,

quanto mais alta a pressão utilizada, maior foi a extração de água, ou seja, no gráfico (Figura 12), os pontos mais próximos das faixas em vermelho mais escuro

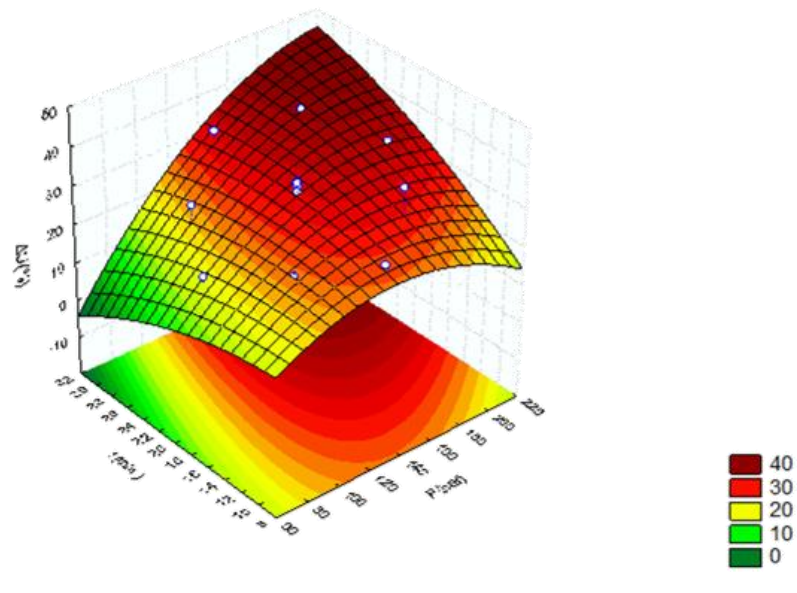


Figura 11. Superfície de resposta para a interação: Tempo x Pressão

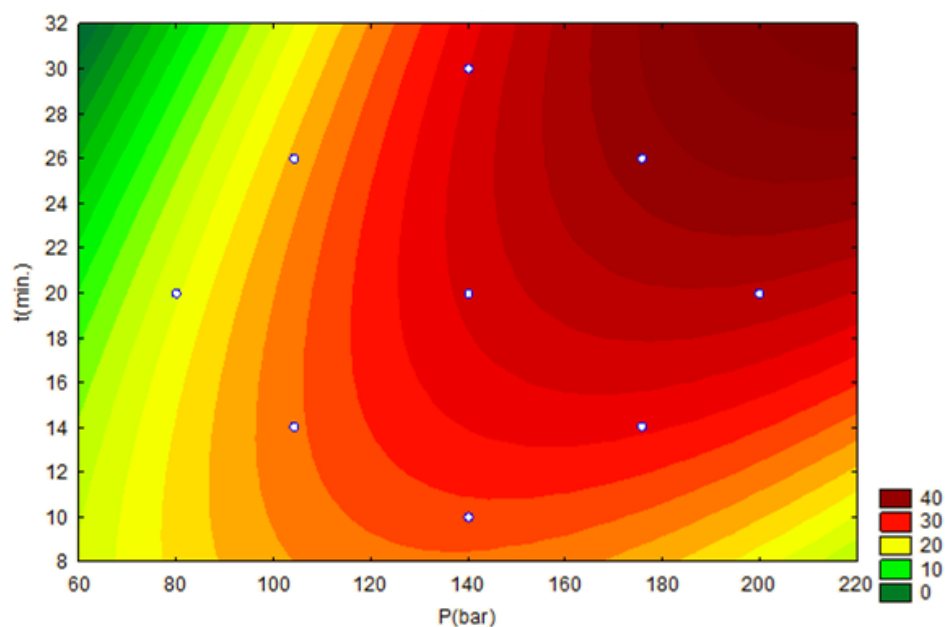


Figura 12. Destaque da região de interação: Tempo x Pressão

Analisando a interação Temperatura x Tempo é possível observar na superfície de resposta (Figura 13 e Figura 14), que a influência da temperatura se sobressai, em relação ao

tempo. Onde, quanto maior a temperatura, ainda que os tratamentos possuam o mesmo tempo de contato, a extração da água é mais efetiva.

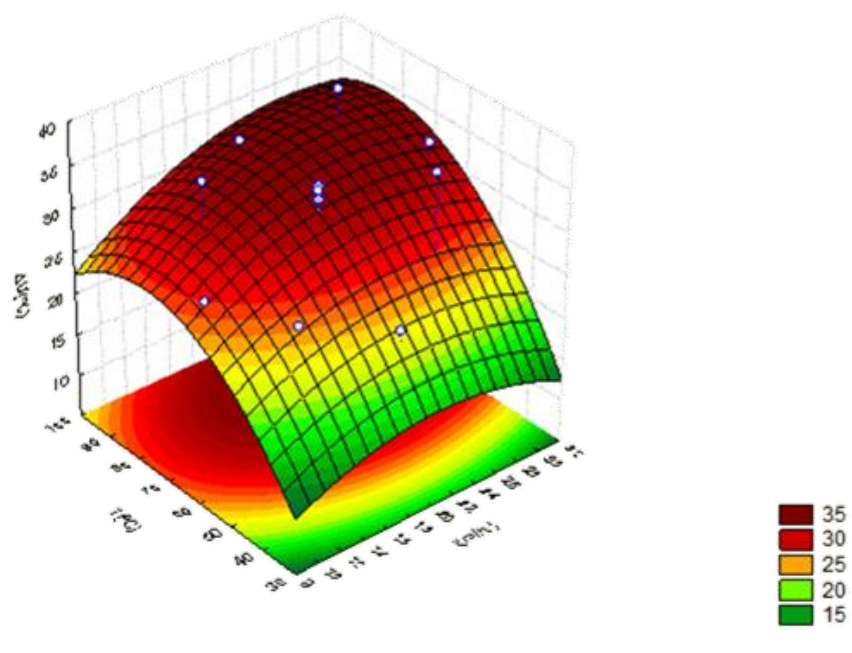


Figura 13. Superfície de resposta para a interação: Temperatura x Tempo

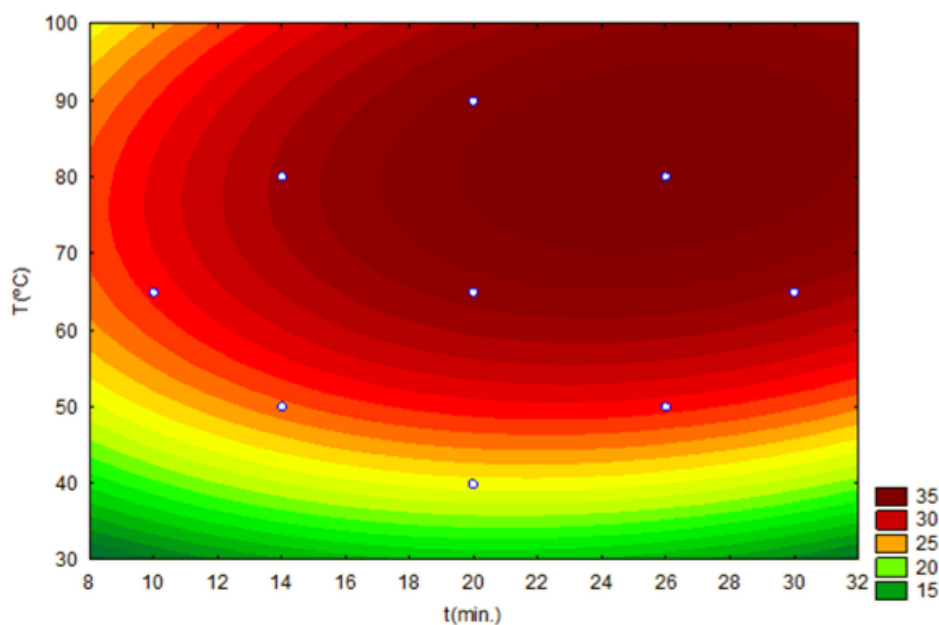


Figura 14. Destaque da região de interação: Temperatura x Tempo

Algumas limitações no equipamento foram percebidas ao iniciar as análises com o CO₂ supercrítico, a exemplo da posição da amostra no extrator, pois as amostras localizadas na

extremidade inferior saiam ainda umidas, enquanto aquelas da extremidade superior estavam, em geral, mais secas (Figura 15).

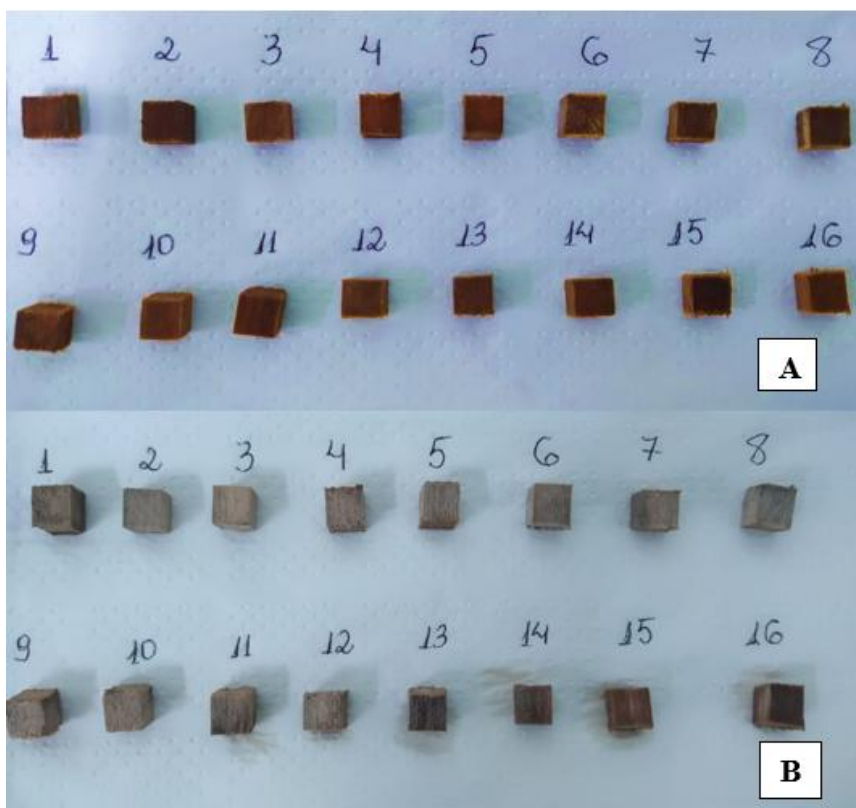


Figura 15. Amostras antes da secagem (A). Amostras após o processo de secagem (B).

A madeira que foi direcionada para secagem em estufa a 80°C apresentou amostras com presença de colapso e rachadura. (Figura 16)

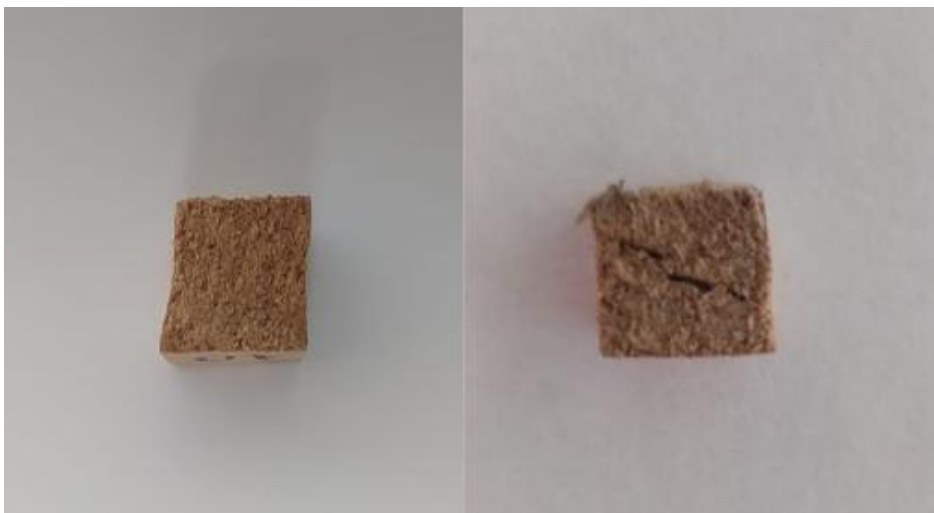


Figura 16. Amostras de madeira de *Eucalyptus pellita* com colapso após secagem a 80°C. A e B

4. DISCUSSÃO

A condição experimental que se destacou na extração de água da madeira de *Eucalyptus pellita* de acordo com a Tabela 14 foi; $T=80^{\circ}\text{C}$, $P=175,7$ bar e $t=26$ min., a pressão e a temperatura linear mostraram-se significativas e a melhor interação diante dos resultados obtidos nos experimentos realizados (Tabela 15) e nas superfícies de resposta obtidas (Figuras 9-14). Os melhores resultados da secagem com o CO_2 supercrítico foram nas maiores temperaturas e maiores pressões, isso pode ser explicado pela melhoria na permeabilidade da madeira, aumentando a capacidade de transporte do fluido, durante o contato do CO_2 supercrítico com a madeira. Segundo Penedo (2007) o aumento da pressão, sob temperaturas baixas, aumenta substancialmente a densidade do fluido aproximando-se das características de um líquido. De acordo com Moyler (1993) com o aumento da temperatura ocorre uma redução da viscosidade que, quando aliada às características de difusividade e de tensão superficial dos gases, garantem aos solventes uma alta capacidade de penetração, o que implica em um aumento expressivo nas taxas de transferências de massa.

Durante a etapa de despressurização o fluido supercrítico vai para a fase gasosa CO_2 dentro da amostra, o que facilita a saída da água das células (Dawson et al. 2015; Dawson e Pearson 2017). Sabe-se que a permeabilidade da madeira é a propriedade física que está associada à facilidade com que os fluidos são transportados através de meio poroso sob um gradiente de pressão. Segundo Siau (1970) o tipo de fluido é um dos fatores que influencia. Rezende (2014), afirma também que, não apenas fatores internos à madeira afetam o fluxo e a permeabilidade, sendo o tipo de fluido utilizado no ensaio um fator relevante. Segundo

Kollmann e Côté (1968) e Siau (1971), a permeabilidade gasosa é mais simples quando comparada a líquidos, devido a eliminação de problemas associados com forças capilares. Resende (2014) obteve permeabilidade ao gás 50 vezes maior que a permeabilidade ao líquido para as espécies de *Eucalyptus* analisadas. Silva et al. (2010) encontraram relação de 59 vezes, avaliando a espécie *Corymbia citriodora*.

As avaliações foram realizadas em madeira de cerne de *Eucalyptus pellita*, e o teor de umidade após a secagem, apesar de reduzir, não se aproximou do ponto de saturação das fibras (Tabela 14). Dawson et al. (2015) realizaram secagem com CO₂ supercrítico em madeira de alburno de *Pinus radiata*, utilizando pressões de 200 bar, e temperatura de 50°C, as amostras foram secas com sucesso, partindo de um teor de umidade inicial de 174%, para aproximadamente 39%. A madeira de cerne, em geral, possui menor permeabilidade quando comparada ao alburno, pois apresenta extrativos, além de obstruções por tilose. Pace (2016), trabalhando com permeabilidade ao ar da madeira de *E. pellita*, afirmou existir variação entre as posições radiais, sendo que o valor médio (473,50 cm³/cm.atm.s) de permeabilidade da madeira na região do alburno foi cerca de 15 vezes superior à do cerne. Resende et al. 2018 analisando a permeabilidade de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii*, afirmaram que a espécie *E. dunnii* apresentou menor permeabilidade tanto ao ar, quanto à água devido maior conteúdo de extrativos presentes no cerne desta madeira.

De acordo com a tabela 14, a condição de maior desempenho na secagem de *Eucalyptus pellita* apresentou um ΔU de 38,68%, valor abaixo daquele encontrado por Dawson et al. (2020) que observaram para madeira de cerne de *Eucalyptus nitens* ΔU de 44%. Os mesmos autores afirmam que a aplicação do processo de expulsão de água do lúmen ao cerne de madeiras do gênero *Eucalyptus*, propensos ao colapso, pode contornar esse problema e reduzir o teor de umidade verde, ainda que, para um nível bem acima do ponto de saturação da fibra. Dawson e Pearson (2017); Dawson et al. (2015) afirmam que esse processo pode diminuir os tempos de pré-secagem, enquanto reduz o colapso da madeira na secagem.

De acordo com o a Tabela 15, assim como demonstrado no gráfico de Pareto (figura 7), a pressão linear foi a variável que mais influenciou no desempenho da secagem. Corroborando com os resultados de Pearson et. al (2019) que afirmam que a pressão exerce o maior efeito sobre a desidratação de madeiras. Analisando figura 9 e figura 10 verifica-se que a região que pode ser considerada como ótima para a extração da água é aquela sob altas pressões associadas a altas temperaturas. O gráfico indica que, com a elevação da pressão, a porcentagem de umidade extraída aumenta. Esse fato é confirmado com os dados experimentais, em que se

verificou que as maiores pressões foram as que apresentaram o maior ΔU . Segundo Dawson et al. (2020) a pressão até 200 bar é adequada pois não há evidência de que essa pressão danifique a estrutura do tecido e não afete a permeabilidade, exceto através da remoção de água. Os mesmos autores afirmam que na fase de alta pressão do ciclo de expulsão de água do lúmen de CO_2 supercrítico, a possibilidade de surgimento de tensão negativa da água é contornada.

Na figura 15B é possível observar a ocorrência da secagem mais evidente nas amostras que ficaram na parte superior do extrator (amostras 1-12) e as amostras que ficaram na parte inferior do extrator (amostras 13-16) apresentaram uma secagem comprometida, saindo muitas vezes úmidas ao final do processo de extração.

A secagem da madeira realizada em estufa com a mesma temperatura definida pelo planejamento de experimentos (80°C), apresentou amostras com presença de colapso (Figura 16), o colapso é um defeito que está relacionado às primeiras etapas da secagem da madeira. Este resultado indica que a pré-secagem pode ter favorecido o processo de transporte de massa por capilaridade.

A secagem promove uma alta tensão hidrostática no lume da célula e, quando esta tensão excede o limite de proporcionalidade em contração perpendicular, ocorre uma contração abrupta nas paredes celulares gerando o colapso (YANG et al., 2014). É causado por tensões capilares no decorrer da saída de água livre da madeira (SIAU, 1971). Segundo Zhang (2020) devido à sua forte solubilidade e capacidade de transferência, o CO_2 supercrítico pode reduzir a tensão capilar, inibindo a ocorrência o colapso da madeira.

O colapso, geralmente, ocorre em madeiras pouco permeáveis como é o caso do gênero *Eucalyptus*. Segundo Yang e Liu (2018), além da baixa permeabilidade da madeira, outros dois requisitos favorecem a ocorrência do colapso: um deles é que o lume da célula esteja saturado; o outro está relacionado à anatomia da madeira, seria uma espessura fina da parede celular.

5. CONCLUSÃO

O planejamento experimental mostra que o dióxido de carbono supercrítico pode ser utilizado para a extração de água, tendo em vista os resultados de considerável redução da umidade obtidos nas amostras submetidas às diferentes condições de temperatura, pressão e tempo.

A condição mais adequada para a secagem da madeira de cerne de *Eucalyptus pellita* é $T=80^{\circ}\text{C}$, $P=175,7$ bar e $t=26$ min.

A Pressão linear é a variável que apresenta maior influência no desempenho da secagem.

SUGESTÕES

Como sugestão para trabalhos futuros; análise de permeabilidade da madeira poderá garantir conclusões ainda melhores sobre os resultados obtidos; padronização da umidade inicial nas amostras. Realizar para mais testes na condição considerada ótima; além de adaptações no equipamento a fim de reduzir a variação de umidade entre as amostras no interior do extrator.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR-RICARDO, A.; CASIMIRO, T.; SOUSA, M.; MELO, M.; TOMAZ, P. Supercritical carbono dioxide: the art of technology in art conservation. **Conservar Patrimônio**. 6, 3-9, 2007.

AMEZQUITA, S. P. M.; RUBIANO, J. A. M.; BARROS FILHO, N. F.; CIPRIANI, H. N. FERTILIZATION EFFECTS ON *Eucalyptus pellita* F. MUELL PRODUCTIVITY IN THE COLOMBIAN ORINOCO REGION. **Revista Árvore**. 2018;42(5):e420502.

ARISANDI, R.; MARSOEM, S. N.; LUKMANDARU, G. The contents of phenolics and cell wall component of *Eucalyptus pellita* F. Muell stemwood and bark. **Wood Research**, v. 64, n. 3, p. 411-422, 2019.

BATISTA, D.C.; KLITZKE, R.J.; ROCHA, M. P. Quality of grouped conventional kiln drying of three species of *Eucalyptus* sp. Wood. **Ciênc. Florest**. 25 (3), 2015.

CARRILHO, E; TAVARES, M. C. H.; LANÇAS, FM. Fluidos supercríticos em química analítica. I. Cromatografia com fluido supercrítico: Conceitos termodinâmicos. **Quím. Nova** vol.24 no.4 São Paulo July/Aug. 2001.

CLARKE B, MCLEOD I, VERCOE T, editors. Trees for farm forestry: 22 promising species. Canberra: RIRDC Press; 2009. p.132-34.

DAWSON B, PEARSON H, KIMBERLEY M, DAVY B. Effect of supercritical CO₂ treatment and kiln drying on collapse in *Eucalyptus nitens* wood. **European Journal of Wood and Wood Products**. 78:209–217, 2020.

DAWSON BSW, PEARSON H. Effect of supercritical CO₂ dewatering followed by oven-drying of softwood and hardwood timbers. **Wood Sci Technol** 51(4):771–784, 2017.

DAWSON BS, PEARSON H, KROESE HW, SARGENT R Effect of specimen dimension and pre-heating temperature on supercritical CO₂ dewatering of radiata pine sapwood. **Holzforschung** 69(4):421–430, 2015.

FLORES, T. B.; ALVARES, C. A.; SOUZA, V. C.; STAPE, J. L. Eucalyptus no Brasil: zoneamento climático e guia para identificação. Piracicaba: IPEF, 2016.

HANSMANN, C.; STINGL, R.; PRIETO, O.G.; LOPEZ, C.B.; RESCH, H. High-frequency energy–assisted vacuum drying of fresh eucalyptus globulus. **Dry. Technol.** 2008, 26, 611–616.

KLITZKE, R.J.; BATISTA, D.C. Ensaio de taxa de secagem e escore de defeitos para a predição da qualidade de secagem convencional da madeira de Eucalyptus. **Scientia Forestalis**. v.38, n.85, p.97-105, 2010.

OLIVEIRA, A. C. CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; ALMEIDA, W.; PEREIRA, B. L. C.; CARDOSO, M. T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de Eucalyptus pellita F. Muell. **Scientia Forestalis**, v.38, p.431-439, 2010.

PEARSON H, DAWSON B, KIMBERLEY M, DAVY B, Predictive modelling of supercritical CO₂ dewatering of capillary tubes. **The Journal of Supercritical Fluids**, 2018.

PEARSON, H., DAWSON, B., KIMBERLEY, M., & DAVY, B. Modelling and optimisation of ceramic and wood dewatering using supercritical CO₂. **The Journal of Supercritical Fluids**, 146, 15–22, 2019.

REVERCHON, E.; DE MARCO, I. Supercritical fluid extraction and fractionation of natural matter. **The Journal of Supercritical Fluids**, New York, v. 38, p. 146-166, 2006;

SHEN, Y.H.; GAO, Z.Z.; HOU, X.F.; CHEN, Z.Y.; JIANG, J.Y.; SUN, J. Spectral and thermal analysis of Eucalyptus wood drying at different temperature and methods. **Dry. Technol.**, 38, 313–320, 2020.

SILVA, M. A. J. DA, BRITO, D. Y. O. DE, SOUZA, J. B. DE, GOMES, J. P. S., NUNES, L. J., UCELLA-FILHO, J. G. M., & AZEVÊDO, T. K. B. de. Secagem de toras de clones de

Eucalyptus urograndis em estufa solar. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, 9(4), 377-383. 2021.

TALGATTI, M.; BALDIN, T.; SANTINI, E. J.; ROSSO, S.; OLIVEIRA, L. H.; VALCORTE, G. Secagem da madeira de *Hovenia dulcis* e *Eucalyptus tereticornis* em forno micro-ondas com diferentes potências de temperatura. **Advances in Forestry Science**. Vol. 7 No. 3. 2020.

ZANATA, M.; FREITAS, M. L. M.; SILVA, T. M.; MORAIS, E.; ZANATTO, A. C. S.; SEBBENN, A. M. Parâmetros genéticos e ganhos na seleção em teste de progênies de polinização aberta de *Eucalyptus pellita*, Batatais–SP. **Revista do Instituto Florestal**, v. 22, n. 2, p. 233-242, 2010.

ZEN, L. R., MONTEIRO, T. C., SCHAEFFER, W., KAMINSKI, J. M., & KLITZKE, R. J. Secagem ao ar livre da madeira serrada de eucalipto. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, 7(2), 291-298, 2019.

ZHANG, J. W.; LIU, H.H; YANG, H.; YANG, L. Drying Characteristics of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* with Supercritical CO₂ (2020). **Materials**, 13, 3989. 2020.

CAPÍTULO III

EFICIÊNCIA DA RESSONÂNCIA PLASMÔNICA PARA SECAGEM DE LÂMINAS DE MADEIRA

RESUMO

As nanopartículas apresentam potencial para diversas aplicações tecnológicas, além de poder melhorar as propriedades físicas, mecânicas e biológicas. Uma das utilizações do tratamento da madeira com nanopartículas de prata é catalisar o processo de secagem por causa da ressonância plasmônica. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da ressonância plasmônica para a secagem de lâminas de madeira de *Pterocarpus rohrii* e *Basiloxyton brasiliensis*. As espécies foram selecionadas pela densidade, sendo *Pterocarpus rohrii* espécie de baixa densidade (0,391 g/cm³) e *Basiloxyton brasiliensis* espécie de média densidade (0,553 g/cm³). As amostras foram confeccionadas com dimensões 1,5 x 1,5 x 0,2 cm. Foram utilizadas 30 amostras por espécie, sendo estas, distribuídas em cinco tratamentos, foi avaliada a utilização da nanopartícula e a distância da incidência de luz nas amostras (6 cm e 13 cm). As curvas de secagem obtidas apresentaram característica esperadas para madeiras, com redução da taxa de secagem à medida que o processo de perda de umidade acontecia, porém os tratamentos com incidência de luz de LED, e com imersão das amostras em nanopartícula de prata se destacaram. As maiores taxas de secagem também foram observadas nas amostras que foram imersas, e naquelas mais próximas das lâmpadas. De modo geral, para as duas espécies avaliadas, a imersão potencializou o efeito da Lâmpada de LED na secagem da madeira para a distância de 13 cm.

ABSTRACT

Nanoparticles have potential for various technological applications, besides being able to improve physical, mechanical, and biological properties. One of the uses of wood treatment with silver nanoparticles to catalyze the drying process. Thus, the objective of this work was to evaluate the effect of plasmonic resonance for drying wood veneers of *Pterocarpus rohrii* and *Basiloxylon brasiliensis*. The species were selected by density, being *Pterocarpus rohrii* a species of low density (0.391 g/cm³) and *Basiloxylon brasiliensis* medium density species (0.553 g/cm³). The samples were made with dimensions 1.5 x 1.5 x 0.2 cm. Thirty samples per species were used, distributed in five treatments, the use of the nanoparticle and the distance of the incidence of light in the samples (6 cm and 13 cm) were evaluated. The drying curves obtained presented characteristic for woods, with reduction of the drying rate as the moisture loss process occurred, but the treatments with incidence of LED light, and with immersion of the samples in silver nanoparticle stood out. The highest drying rates were also observed in the samples that were immersed, and in those closest to the lamps. In general, for the two species evaluated, immersion enhanced the effect of the LED Lamp on wood drying for the distance of 13 cm.

1. INTRODUÇÃO

Pterocarpus rohrii Vahl. é uma espécie da família Fabaceae, popularmente conhecida como Pau sangue. Está distribuída desde o sul do estado da Bahia e Minas Gerais até o estado do Paraná. Esta árvore atinge entre 8 e 14 metros de altura, apresenta folhas complexas, com 5 a 7 folíolos glabros (LORENZI, 2002). *Pterocarpus rohrii* é usada em cercas e apresenta um potencial para caixotaria (FARRAPO, 2013) e usos decorativos. Segundo Rolin; Pioto, (2018) a espécie é indicada para embalagens e usos para madeiras leves como caixotaria, laminação, painéis e produção de artefatos e utensílios. Embora o principal uso desta espécie está associado à arborização urbana (LORENZI, 2002). O pau sangue apresenta madeira de densidade média a baixa com pouca tendência a empenamentos e torcimentos (ROLIN; PIOTO, 2018).

Basilloxylon brasiliensis (All.) K. Schum., espécie da família Malvaceae, popularmente conhecida como Farinha seca, tem distribuição conhecida em florestas ombrófilas e estacionais no Rio de Janeiro, Minas Gerais e Pernambuco (ESTEVES, 2015). Madeira de densidade e dureza média, média anisotropia. Pouca tendência a empenamentos e torcimentos. Indicada para estruturas leves, movelaria, construções, carpintaria, revestimentos, embalagens e utensílios. (ROLIN; PIOTO, 2018).

Ambas as espécies são consideradas com potencial para laminação (ROLIN; PIOTO, 2018). Dentro do processo da produção de compensado, a secagem de lâminas, se destaca como uma das etapas de maior importância. Esta fase afeta diretamente a produtividade e a qualidade do produto. Iwakiri (2005) afirma que o teor de umidade das lâminas está relacionado com a quantidade de adesivo e o seu ritmo de absorção pela madeira. Segundo Silva; tomaseli; iwakiri (1998) é importante reduzir o teor de umidade das lâminas para obter uma boa colagem de painéis. Vários métodos podem ser empregados para secagem. A alternativa mais apropriada, entretanto, precisa considerar o tipo de material a ser seco, infra-estrutura e os custos de secagem.

As nanopartículas possuem propriedades físico-químicas muito características, incluindo a sua flexibilidade, maleabilidade e uma condutividade térmica e elétrica elevada, além da sua estabilidade química, atividade catalítica e aplicabilidade biológica (MELO Jr. et al, 2012; MA et al., 2016). As nanopartículas, em especial as nanopartículas de prata NPs-Ag, apresentam potencial para diversas aplicações tecnológicas, essa potencialidade tornou a técnica objeto de estudo para pesquisas na secagem de madeira (PACE et al., 2019; ALMEIDA

et al., 2021). O método mais utilizado para síntese de NPs-Ag é o de redução química obtendo uma solução coloidal estável em água ou solventes orgânicos (WANG et al., 2005).

A ressonância plasmônica é uma alternativa para aumentar a eficiência da captação de energia. (BERTIN, PEROTTONI, 2020). De acordo com Netto (2015) a absorção de radiação eletromagnética por nanopartículas metálicas, na região do ultravioleta e na do visível, é denominada de banda de ressonância plasmônica superficial ou banda plasmônica na região do visível. Diversas aplicações da plasmônica que têm surgido, utilizam da capacidade das nanopartículas metálicas atuarem em processos fototérmicos, ou seja, na geração de calor induzida por absorção de luz, nano aquecedores. (PLECH et al., 2004). Segundo Netto (2015) a geração de calor por nano aquecedores envolve, não somente a absorção de fótons incidentes, como também a conversão da energia do fóton em energia calorífica, seguida da transferência de calor da nanopartícula à matriz que a contém.

O LED (*light emitting diode*) é um diodo emissor de luz, um semicondutor que, quando energizado, emite luz. Diodos são os mais simples dispositivos semicondutores (VELOSO, 2010). A luz produzida pelo LED é um tipo de luz divergente, não é monocromática como um laser, mas consiste em uma banda espectral relativamente estreita (KURACHI, 2000).

A utilização de nanopartícula mostra-se como uma possibilidade de acelerar a secagem de lâminas, mantendo a qualidade do produto. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da ressonância plasmônica da nanopartícula de prata para a secagem de lâminas de madeira.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Obtenção do material

As espécies utilizadas nesse trabalho foram *Pterocarpus rohrii* Vahl (Pau sangue), e *Basiloxylon brasiliensis* (All.) K. Schum. (Farinha seca) árvores provenientes de plantios experimentais de manejo e silvicultura tropical, talhões homogêneos. O pau sangue foi obtido em plantio com espaçamento 2x2 m, aos 23 anos. A farinha seca num plantio com espaçamento de 3x2m, aos 27 anos.

As espécies foram selecionadas pela densidade, sendo o Pau sangue espécie de baixa densidade (0,391 g/cm³) e a farinha seca de média densidade (0,553 g/cm³) (ROLIN; PIOTO, 2018). As amostras foram confeccionadas com dimensões 1,5 x 1,5 x 0,2 cm, sendo a espessura definida (0,2cm) para simular a espessura de lâmina. Foram utilizadas 30 amostras por espécie, sendo estas, distribuídas em cinco tratamentos (Tabela 17).

Tabela 17. Condições de secagem em cada tratamento avaliado para análise de ressonância plasmônica em madeira de *Pterocarpus rohrii* e *Basiloxylon brasiliensis*.

Tratamentos	Condição de secagem
1	Sem aplicação de luz LED (Controle)
2	LED distância D1
3	LED distância D2
4	Imersão em nanopartícula Ag + LED distância D1
5	Imersão em nanopartícula Ag + LED distância D2

Em que: D1= 6,0 cm e D2=13,0 cm

Sendo o tratamento 1 o controle, tratamentos 2 e 3 avaliando o efeito fototérmico da utilização apenas das lâmpadas de LED, e tratamentos 4 e 5 avaliando a ressonância plasmônica de nanopartículas de prata.

Aparato experimental

O equipamento utilizado para realizar os experimentos é composto por um irradiador personalizado, projetado usando quatro diodos emissores de luz (LED) de ~ 435 nm, operado durante as análises a 1,0 A, ligado a um dissipador de calor de alumínio e a um sistema de resfriamento (*coolers*) para garantir a ventilação e evitar o superaquecimento (Figura 17).



Figura 17. Aparato experimental para secagem de lâminas de madeira.

O sistema para a aplicação de luz nas amostras foi montado de acordo com o tratamento a ser realizado. A cada secagem duas lâmpadas eram direcionadas para a amostra. A distância da lâmpada foi definida pela capacidade da base do equipamento, local onde as lâmpadas estavam fixadas. Sendo que, a distância 1, utilizada nos tratamentos 2 e 4, tratou-se de uma distância de 6cm entre a lâmpada e a amostra (Figura 18A). Já a distância 2, se refere à uma distância de 13 cm entre as lâmpadas e a amostra, e foi utilizada para avaliação nos tratamentos 3 e 5. (Figura 18B)

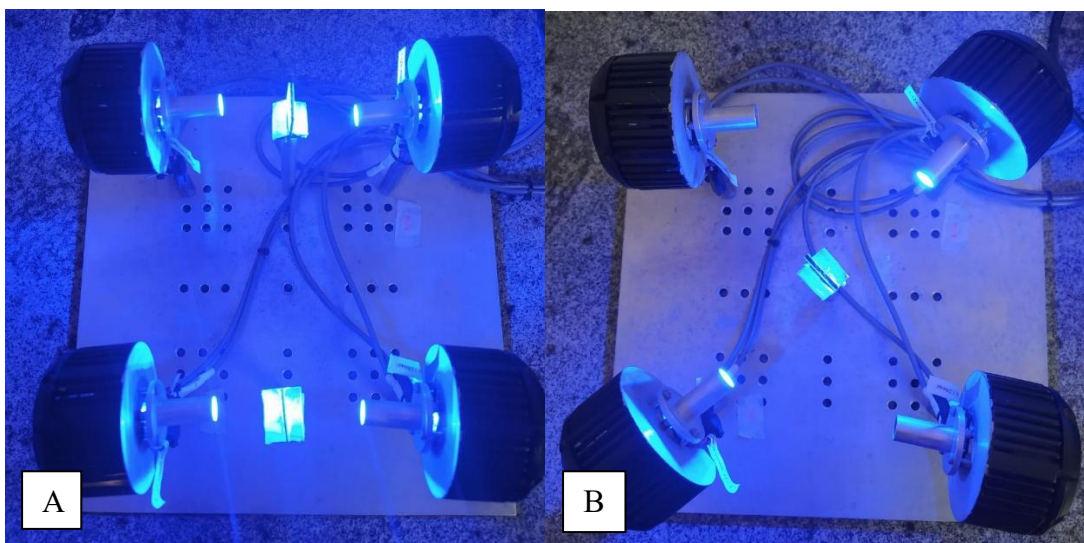


Figura 18. Aplicação de LED. A- Amostras fixadas a distância D1: 6cm; B- Amostras fixadas a uma distância D2: 13cm.

Obtenção da nanopartícula de Prata

A síntese de nanopartículas de prata foi realizada por redução química de sais, para obter prata coloidal metálica. A metodologia usada foi baseada na síntese realizada por Lee e Meisel (1982). Nesse método, o citrato de sódio é utilizado como agente redutor e como estabilizador do coloide, para reduzir a tendência à agregação.

A preparação do redutor citrato de sódio a 1% foi realizada dissolvendo-se 0,50 g de citrato de sódio em 50 ml de água destilada. A preparação da solução de nitrato de prata se deu com a dissolução de 0,0425 g de AgNO_3 em 50 ml de água destilada (5,0 mM). Posteriormente, 25 ml desta solução foi acrescida com água destilada até 125 ml, obtendo-se uma solução 1 mM de AgNO_3 . Foi utilizado um equipamento de banho ultrassônico para acelerar a solubilização (Figura 19).



Figura 19. Dissolução de AgNO_3 e dissolução de Citrato de sódio em banho ultrassônico.

Para o procedimento de síntese de nanopartículas de prata, 125 ml da solução 1,0 mM de AgNO_3 foram colocados em erlenmeyer com 250 ml de capacidade, sendo este colocado sobre a placa aquecedora com agitador magnético. A solução foi levada à ebulição sob uma bureta de 25 ml contendo a solução de redutor citrato de sódio a 1%. Ao iniciar a ebulição, foi gotejada a solução de citrato de sódio, aproximadamente 1 gota por segundo, mantendo-se a solução de AgNO_3 sob ebulição e agitação. A titulação foi realizada até que a solução apresentasse uma coloração levemente dourada (Figura 20).

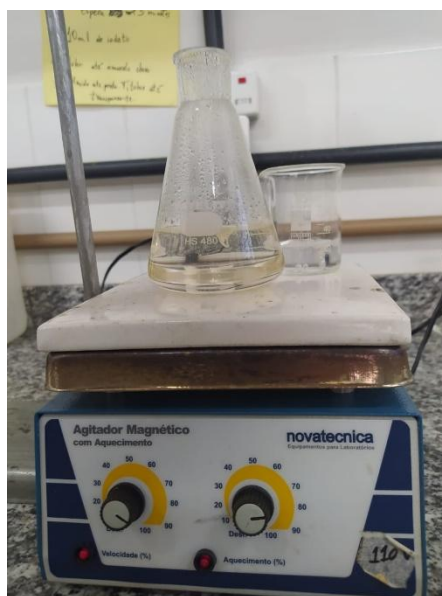


Figura 20. Obtenção da nanopartícula em placa aquecedora com agitador magnético, coloração ideal para encerramento da titulação.

As amostras de madeira que foram utilizadas nos tratamentos 4 e 5, foram imersas na solução de Nanopartícula de prata durante 1 hora, para isso, foi utilizado becker contendo aproximadamente 20ml da solução (Figura 21).



Figura 21. Amostra imersa em 20ml de solução de nanopartículas de prata (100ppm).

Curva de secagem

As amostras foram submetidas às condições apresentada na tabela 17, e a secagem foi monitorada com pesagens a cada 10 minutos. A perda de massa foi acompanhada por estas pesagens periódicas até que a massa estabilizasse, então a amostra foi levada para estufa por um período de 24 horas à uma temperatura de 103°C, e posteriormente pesadas novamente para obtenção da massa seca. O teor de umidade para cada ponto da curva foi calculado de acordo com a equação 9.

$$U = (Mu - Ms) / Ms * 100 \quad (9)$$

Em que: U= Umidade (%); Mu = Massa úmida (g); Ms= Massa seca (g)

Taxa de secagem (Capilaridade, difusão e total)

Os dados referentes à velocidade de secagem e o tempo decorrido para a secagem até 0% de umidade das madeiras avaliadas, foram utilizados para cálculo da taxa de secagem com base na perda de massa de água obtida a cada 10 minutos durante o processo, de acordo com a Equação de Taxa de secagem (equação 10), e seus desdobramentos para taxa de secagem total (equação 11), taxa de secagem de capilaridade (equação 12) e a taxa de secagem de difusão (equação 13).

$$T_s = \frac{T_{ui} - T_u}{t} \quad (10)$$

Em que: T_s = Taxa de secagem (kg); t = tempo de secagem (min).

- Taxa de secagem total (T_{st}):

$$T_{st} = (T_{Ui} - T_{U15})/t \quad (11)$$

- Taxa de secagem- Capilaridade (T_{sc}):

$$T_{sc} = (T_{Ui} - T_{U30})/t \quad (12)$$

- Taxa de secagem- Difusão (T_{sd}):

$$T_{sd} = (T_{U30} - T_{U15})/t \quad (13)$$

Em que: T_{Ui} = Teor de umidade inicial (%); T_{U15} = Teor de umidade 15%; T_{U30} = Teor de umidade 30%; t = tempo (h).

Análise de dados

Para avaliação do experimento, para cada espécie, foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado (DIC), com 6 repetições. Foi realizada análise de variância (ANOVA), a 5% de significância, para os valores de Taxa de secagem total, taxa de secagem de capilaridade e taxa de secagem de difusão. Havendo diferença significativa foi realizado, para as comparações múltiplas, o teste de Tukey, a 5% de significância.

3. RESULTADOS

A titulação executada possibilitou a obtenção de uma solução coloidal de nanopartículas de prata, de coloração dourada. Entretanto, as primeiras tentativas foram executadas num tempo de titulação excessivo. É possível perceber o equívoco pela coloração e aspecto das soluções obtidas (Figura22). Segundo Pinto (2008) uma característica importante dos coloides metálicos são as propriedades ópticas, que depende do formato da partícula e do tamanho. Durante o processo de obtenção, à medida que se modifica as dimensões da nanopartícula, há uma mudança na coloração de gradativa a drástica, dependendo da ocasião.

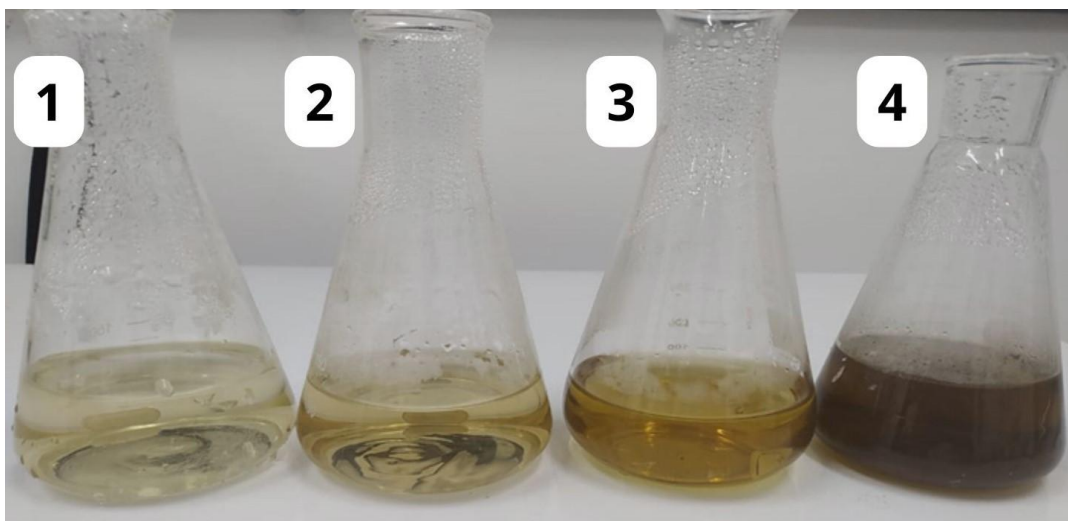


Figura 22. Nanopartículas obtidas: 1- Nanopartícula executada no tempo correto de titulação, coloração mais adequada. 2, 3 e 4- Tempo de titulação excessivo.

A espécie pau sangue, apresentou a curva de secagem característica para madeiras, com redução da taxa de secagem à medida que o processo de perda de umidade acontecia. O T1 apresentou a curva de secagem mais longa, alcançando 15% de umidade após 240min. de secagem, seguido pelo T3 que, alcançou 15% umidade aos 90 min. Os tratamentos T2, T4 e T5 apresentaram curvas de secagem similares (Figura 23).

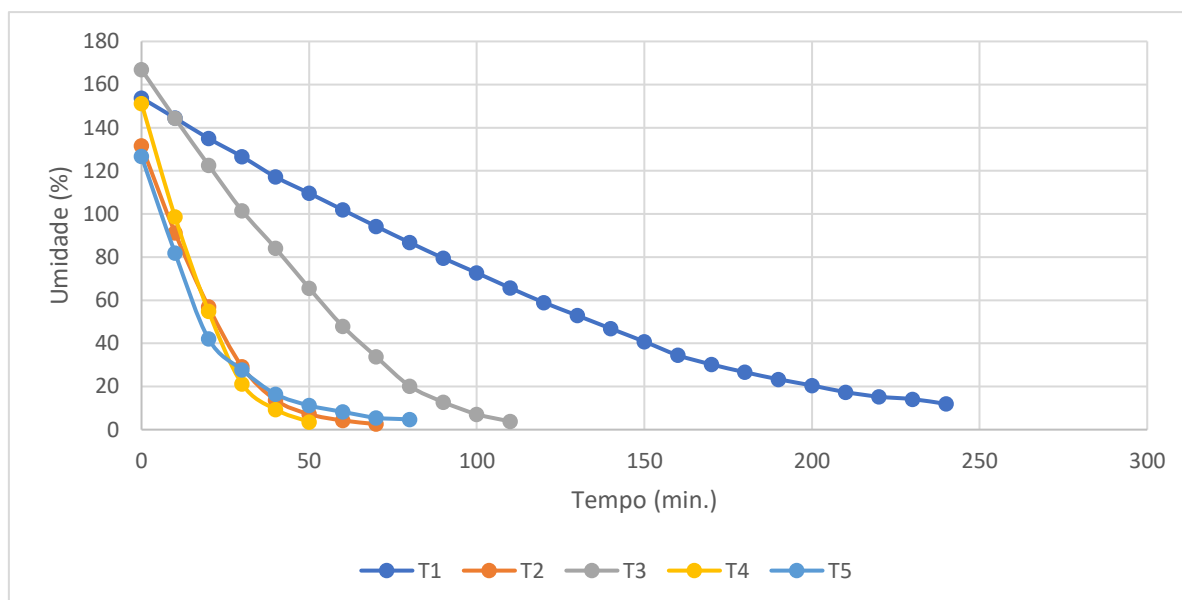


Figura 23. Curvas de secagem para os diferentes tratamentos..

A secagem apresentou fases bem definidas quanto às taxas de saída de água. No início da secagem, onde o transporte de massa ocorre por capilaridade (Tsc), a taxa de secagem é muito maior que aquela encontrada abaixo deste ponto (Tsd), quando o transporte de massa é realizado por difusão. O tratamento T4, teve um desempenho de destaque em relação aos

demais. Os tratamentos T4, T2 e T3 não diferiram quanto à taxa de secagem de capilaridade (Tabela 18).

Tabela 18. Taxa de secagem para a madeira de *Pterocarpus rohrii*.

Tratamento	Tst (%/min.)	Tsc(%/min.)	Tsd(%/min.)
4	3,935 a	4,480 a	1,976 a
2	3,398 ab	3,755 a	1,713 ab
5	2,600 b	3,547 a	1,123 b
3	1,787 c	1,924 b	1,059 b
1	0,644 d	0,731 c	0,338 c

Letras diferentes na coluna acusam diferença significativa no teste Tukey a 5% de significância.

A espécie farinha seca apresentou a curva de secagem mais longa para T1, seguida de T3 e T5, com comportamento das curvas mais próximo, seguidas de T2 e T4, que apresentaram curvas similares e a secagem mais veloz (Figura 24).

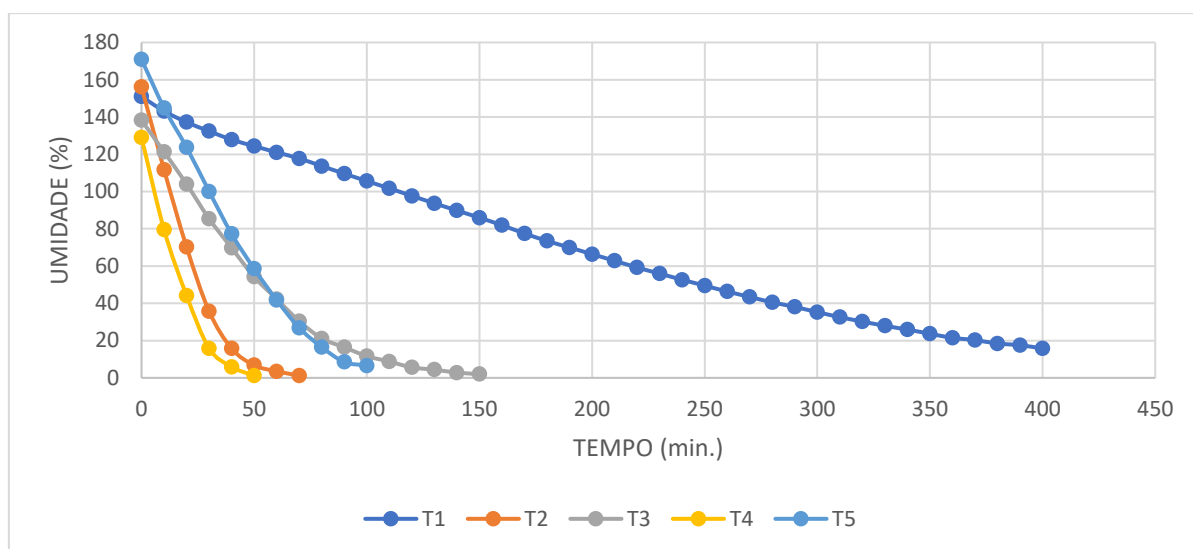


Figura 24. Curva de secagem para a espécie *Basiloxyton brasiliensis*.

A espécie farinha seca apresentou maiores taxas de secagem partindo do teor de umidade inicial até o ponto de saturação das fibras (30% de umidade), do que aquelas abaixo do PSF. Os tratamentos T4 e T2 se destacaram com as maiores taxas e não diferiram entre si (Tabela 19).

Tabela 19. Taxas de secagem para a espécie *Basiloxyton brasiliensis*.

Tratamentos	Tst (%/min.)	Tsc(%/min.)	Tsd(%/min.)
4	3,616 a	4,026 a	2,112 a
2	3,568 a	4,005 a	2,256 a
5	1,937 b	2,126 b	1,167 b
3	1,432 c	1,542 c	0,791 c
1	0,340 d	0,378 d	0,186 d

Letras diferentes na coluna acusam diferença significativa no teste Tukey a 5% de significância

4. DISCUSSÃO

A secagem para as duas espécies apresentou a curva com desempenho esperado para o material madeira (Figura 23 e 24). Durante o processo de secagem ocorrem três estágios distintos, caracterizados pela variação na taxa da perda de umidade e que determinam a curva característica de secagem do material (KOLLMANN E COTÊ, 1968; ROSEN, 1983; JANKOWSKY, 1995). Comparando as curvas das duas espécies, levando em conta que o preparo do material e condições dos tratamentos foram os mesmos. Acredita-se que o comportamento da secagem foi influenciado pela densidade. A densidade da madeira é um forte indicador de qualidade e está associada à proporção de vasos, às dimensões das células, comprimento, largura e diâmetro de lume, e, principalmente, a espessura de parede das fibras (PANSI; DE ZEEUW, 1980).

Ao observar as curvas de secagem (Figura 23 e 24), os intervalos entre os primeiros pontos da curva são maiores pois na primeira etapa do processo a taxa de secagem é alta e constante, ocorre a movimentação da água livre até a superfície, pela superfície ocorre o deslocamento de corrente de ar, o que caracteriza uma secagem por convecção. (SANTOS, JANKOWSKY E ANDRADE 2003).

É perceptível que, ao final da curva de secagem a distância entre os pontos diminui, em alguns casos drasticamente como é o caso de T2 e T4 para ambas as espécies. Segundo Rosen (1983) o último estágio da secagem tem início quando, na movimentação interna, passa a predominar o processo de difusão. É quando praticamente não há mais água livre na madeira e há redução nas taxas de secagem. Segundo Santos, Jankowsky e Andrade (2003), a densidade é a principal característica do material que controla o processo de secagem nesta etapa.

Ao observar as taxas de secagem para a madeira de *Pterocarpus rohrii*. (Tabela 18), é notório que o tratamento T4, material que recebeu o tratamento com nanopartícula e a luz aplicada à distância 6cm, se destaca dos demais. Entretanto, estatisticamente, ele não difere do T2, onde o material foi seco a mesma distância e não foi imerso em nanopartícula. Porém, vale ressaltar o comportamento de T5, pois ele esteve em contato com a nanopartícula e apresentou valores de Tst e Tsc muito superior ao do tratamento T3.

O tratamento T5 não diferiu estatisticamente do T4, no que se refere à taxa de secagem de capilaridade, mesmo a madeira estando a uma distância de 13cm dos LED's, ou seja, em T5 a presença da nanopartícula potencializou o processo de secagem nas amostras. Esse efeito pode ter acontecido pela capacidade das nanopartículas de facilitar a transferência do calor na superfície da madeira (TAGUIYARI, 2013).

Para a espécie Farinha seca, os tratamentos T4 e T2 diferiram dos demais, apresentando as taxas de secagem mais altas. Nesta espécie houve um comportamento distinto, onde T2 apresentou valor de taxa de secagem de difusão maior que o T4, indicando que com a incidência de luz na distância D1, não houve o efeito da nanopartícula. Diferente do resultado encontrado por Almeida et al. (2020) trabalhando com a mesma técnica, na secagem de *Hevea brasiliensis*, observaram que a impregnação de nanopartículas de prata exerceu maior influência nas taxas de secagem total e de difusão. Pace et al. (2019) afirmam que a deposição de nanopartículas na superfície das paredes do elemento de vaso e na ultraestrutura da parede da fibra pode promover um aumento na taxa de secagem da madeira e contribuir para a saída de água higroscópica. O que também não corrobora com o comportamento apresentado por T2 e T4. Entretanto, no presente trabalho o tratamento com nanopartícula utilizado foi imersão, não foi realizado vácuo nas amostras para, possivelmente, aumentar a impregnação das nanopartículas, por tanto, esta pode ser uma variável que explique o fato da nanopartícula não ter contribuído positivamente na saída de água por difusão.

O tratamento T5 para a espécie Farinha seca, teve um desempenho abaixo do T4 e T2, diferiu estatisticamente dos demais, porém mostrou bons resultados para a secagem quando comparado a T3 e T1. T5 apresentou todas as taxas de secagem avaliadas superiores às de T3. Pace (2016) afirma que uma das hipóteses a ser considerada, seria que a impregnação de nanopartículas de Ag diminui a força de tensão superficial da coluna d'água, facilitando, por tanto, o fluxo de saída da água livre da madeira.

5. CONCLUSÃO

Para a espécie *Pterocarpus rohrii* a ressonância plasmônica de nanopartícula de Ag proporciona um aumento significativo da taxa de secagem e potencializa o efeito fototérmico da Lâmpada de LED nas três faixas de umidade da madeira para a distância de 13 cm.

Para a espécie *Basiloxylon brasiliensis*, a ressonância plasmônica de nanopartícula de Ag não apresenta efeito positivo para a distância de 6 cm. Entretanto, a imersão potencializa o efeito do LED na secagem da madeira para a distância de 13 cm.

SUGESTÕES

Realizar o experimento com espécie de alta densidade; realizar impregnação da nanopartícula com vácuo; ampliar as pesquisas sobre a anatomia e permeabilidade das espécies após o tratamento com nanopartícula; realizar a caracterização da nanopartícula.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERTIN, M.; PEROTTONI, C. A. Efeito da Ressonância Plasmônica Sobre o Espectro de Absorção de Nanopartículas Metálicas. **SCIENTIA CUM INDUSTRIA**, V. 8, N. 1, PP. 12 - 24, 2020.

ESTEVES, G. **Lista de Espécies da Flora do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em Flora do Brasil. 2015.

IWAKIRI, S. et al. **Painéis de Madeira Reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005. 247p.

KURACHI, Cristina. **Estudo comparativo do laser, do LED azul e da lâmpada convencional no processo de polimerização da resina composta dental**. 2000. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

LEE, P. C.; MEISEL, D. Adsorption and Surface-Enhanced Raman of Dyes on Silver and Gold Sols. **J. Phys. Chem.** v. 86, p. 3391, 1982.

MA, Y. et al. Spectral study of interaction between chondroitin sulfate and nanoparticles and its application in quantitative analysis. **Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 153, p. 445-450, jan. 2016.

MELO Jr., M. A. et al. Preparação de Nanopartículas de Prata E Ouro: Um Método Simples para a Introdução da Nanociência em Laboratório de Ensino. Campinas - SP, **Quim. Nova**, v. 35, n. 9, p. 1872-1878, 2012.

NOGUEZ, C. Surface plasmons on metal nanoparticles: the influence of shape and physical environment. **The Journal of Physical Chemistry C**, v. 111, n. 10, p. 3806-3819, 2007.

PACE, J. H. C. **Efeito da vaporização e impregnação de nanopartículas nas variáveis do processo de secagem da madeira de *Eucalyptus pellita* F Muell.** 2016. 56 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2016.

PACE, J. H. C.; LATORRACA, J. V. F.; CARVALHO, A. M. C; DOS SANTOS, G. C. V.; ALMEIDA, S. M.; GOMES, F. J. B. Influence of vaporization and impregnation of silver nanoparticles on the drying rate of *Eucalyptus pellita* Muell. **Floresta**, v.49, n.3, p.579-586, 2019.

PLECH, A.; KOTAIDIS, V.; GRÉSILLON, S.; DAHMEN, C. and PLESSEN, G. V. LASER-induced heating and melting of gold nanoparticles studied by time-resolved x-ray scattering. **Phys. Rev. B** 70, 195423. 2004.

SANTOS, GRV; JANKOWSKY, IP; ANDRADE, A. CURVA CARACTERÍSTICA DE SECAGEM PARA MADEIRA DE *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, 2003.

SILVA D. A.; TOMASELLI I., IWAKIRI S., Influência da umidade na resistência da linha de cola e estabilidade dimensional do compensado utilizando resina de alta reatividade, **Scientia Forestalis**, IPEF – ESALQ – Universidade de São Paulo.nº54 p.69- 80. 1998.

VELOSO, M. N. **Influência da luz LED em culturas de células-tronco mesenquimais in-vitro**. Trabalho de conclusão de curso (bacharelado - Física Médica) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências de Botucatu. 2010.

WANG, H.; QIAO, X.; CHEN, J.; DING, S. Preparation of silver nanoparticles by chemical reduction method. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 256, n. 2-3, p. 111- 115, 2005.

ANEXOS

Tabela 20. Programa de secagem para o tratamento 1.

UMIDADE	T _s (°C)	T _u (°C)	UR (%)	UE (%)	PS
Aquecimento	47.0	46.0	95	21.5	**
50	47.0	43.5	81	15.0	3.3
45	47.0	43.0	79	14.1	3.2
40	47.0	42.5	76	13.2	3.0
35	47.0	41.7	71	12.4	2.8
30	47.0	41.0	69	11.5	2.6
25	53.3	45.3	61	9.6	2.6
20	59.5	48.5	53	7.7	2.6
15	65.8	48.8	40	5.8	2.6
10	72.0	46.0	26	3.8	2.6
5	72.0	42.0	17	1.9	2.6
Uniformização	72.00	62.50	62	8.00	Xx
Condicionamento	72.00	65.40	73	14.00	Xx

Tabela 21. Programa de secagem para o tratamento 2.

UMIDADE	T _s (°C)	T _u (°C)	UR (%)	UE (%)	PS
Aquecimento	50.0	49.0	95	21.5	**
50	50.0	46.6	81	15.0	3.3
45	50.0	46.0	79	13.9	3.2
40	50.0	45.0	74	12.8	3.1
35	50.0	44.2	70	11.8	3.0
30	50.0	43.0	65	10.7	2.8
25	56.0	47.0	58	8.9	2.8
20	62.0	50.1	51	7.1	2.8
15	68.0	50.0	39	5.4	2.8
10	74.0	46.8	21	3.6	2.8
5	74.0	44.0	18	1.8	2.8
Uniformização	74.00	64.70	66	8.00	Xx
Condicionamento	74.00	67.50	73	14.00	Xx

Tabela 22. Programa de secagem para o tratamento 3

UMIDADE	T _s (°C)	T _u (°C)	UR (%)	UE (%)	PS
Aquecimento	49.0	47.0	95	21.8	**
50	49.0	45.6	89	15.0	3.3
45	49.0	45.0	81	14.0	3.2
40	49.0	44.5	76	13.1	3.1
35	49.0	43.6	72	12.1	3.0
30	49.0	42.6	70	11.1	2.7
25	54.5	46.5	62	9.3	2.7
20	61.0	49.0	51	7.4	2.7
15	67.5	50.5	41	5.6	2.7
10	74.0	48.0	26	3.7	2.7
5	74.0	44.0	18	1.9	2.7
Uniformização	74.00	64.70	66	8.00	Xx
Condicionamento	74.00	67.50	73	14.00	Xx

Tabela 23. Programa de secagem para o tratamento 4

UMIDADE	T _s (°C)	T _u (°C)	UR (%)	UE (%)	PS
Aquecimento	51.0	50.0	95	21.4	**
50	51.0	47.7	81	15.0	3.3
45	51.0	46.8	80	13.8	3.3
40	51.0	46.0	74	12.5	3.2
35	51.0	44.8	70	11.3	3.1
30	51.0	44.5	71	10.0	3.0
25	57.3	47.3	55	8.3	3.0
20	63.5	50.0	47	6.7	3.0
15	69.8	49.8	35	5.0	3.0
10	76.0	48.0	22	3.3	3.0
5	76.0	46.0	20	1.7	3.0
Uniformização	76.00	66.00	82	8.00	Xx
Condicionamento	76.00	72.70	85	14.00	Xx

Tabela 24. Programa de secagem para o tratamento 5

UMIDADE	Ts (°C)	Tu (°C)	UR (%)	UE (%)	PS
Aquecimento	45.0	44.0	94	21.2	**
50	45.0	41.5	81	15.00	3.3
45	45.0	41.0	79	14.25	3.2
40	45.0	40.5	76	13.50	3.0
35	45.0	40.0	73	12.75	2.7
30	45.0	39.5	71	12.00	2.5
25	51.3	43.6	60	10.0	2.5
20	57.5	47.8	56	8.0	2.5
15	63.8	45.4	36	6.0	2.5
10	70.0	46.0	27	4.0	2.5
5	70.0	40.0	16	2.0	2.5
Uniformização	70.00	59.00	59	8.00	xx
Condicionamento	70.00	66.50	83	14.00	xx

Tabela 25. Programa de secagem para o tratamento 6

UMIDADE	Ts (°C)	Tu (°C)	UR (%)	UE (%)	PS
Aquecimento	47.0	46.0	95	21.5	**
Acima de 50	47.0	43.5	81	15.0	3.3
50	47.0	43.5	81	15.0	3.3
45	47.0	43.0	79	14.1	3.2
40	47.0	42.5	76	13.2	3.0
35	47.0	41.7	71	12.4	2.8
30	47.0	41.0	69	11.5	2.6
25	53.3	45.3	61	9.6	2.6
20	59.5	48.5	53	7.7	2.6
15	65.8	48.8	40	5.8	2.6
10	72.0	46.0	26	3.8	2.6
5	72.0	42.0	17	1.9	2.6
Uniformização	72.00	62.50	62	8.00	Xx
Condicionamento	72.00	65.40	73	14.00	Xx

Tabela 26. Programa de secagem para o tratamento 7

UMIDADE	Ts (°C)	Tu (°C)	UR (%)	UE (%)	PS
Aquecimento	49.0	48.0	95	21.6	**
Acima de 50	49.0	45.5	81	15.0	3.3
50	49.0	45.5	81	15.0	3.3
45	49.0	45.0	79	13.95	3.2
40	49.0	44.0	74	12.90	3.1
35	49.0	43.0	70	11.85	3.0
30	49.0	42.0	65	10.80	2.8
25	55.3	46.3	58	8.90	2.8
20	61.3	49.3	51	7.10	2.8
15	67.8	48.8	35	5.30	2.8
10	74.0	48.0	25	3.60	2.8
5	74.0	44.0	18	1.80	2.8
Uniformização	74.00	64.70	66	8.00	xx
Condicionamento	74.00	67.50	73	14.00	xx

Tabela 27. Programa de secagem para o tratamento 8

UMIDADE	Ts (°C)	Tu (°C)	UR (%)	UE (%)	PS
Aquecimento	46.0	45.0	94	21.3	**
Acima de 50	46.0	42.5	81	15.0	3.3
50	46.0	42.5	81	15.0	3.3
45	46.0	42.0	79	14.3	3.2
40	46.0	41.5	76	13.5	3.0
35	46.0	41.0	74	12.8	2.7
30	46.0	40.5	71	12.0	2.5
25	52.3	44.9	53	10.0	2.5
20	58.5	48.0	55	8.0	2.5
15	64.8	48.8	42	6.0	2.5
10	71.0	47.0	26	4.0	2.5
5	71.0	41.0	17	2.0	2.5
Uniformização	71.00	60.00	62	8.0	xx
Condicionamento	71.00	67.70	82	14.00	xx