

CAMILA BATISTA DA SILVA LOPES

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE UTILIZANDO MICRO-ONDAS E O  
EFEITO DA SUA POTÊNCIA NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DA  
MADEIRA DE *Eucalyptus* sp.

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação  
em Ciência Florestal, para obtenção do título de Magister Scientiae

VIÇOSA  
MINAS GERAIS BRASIL  
2018

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade Federal de Viçosa -  
Câmpus Viçosa

T

L864d  
2018

Lopes, Camila Batista da Silva, 1992-  
Determinação do teor de umidade utilizando micro-ondas e o efeito da sua potência nas propriedades físicas e químicas da madeira de Eucalyptus sp. / Camila Batista da Silva Lopes. – Viçosa, MG, 2018.

xii, 56 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Marcos Oliveira de Paula.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 49-56.

1. Secagem. 2. Permeabilidade. 3. Umidade. 4. Densidade. 5. Ondas eletromagnéticas. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal. Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. II. Título.

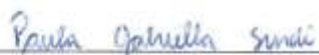
CDO adapt CDD 22. ed. 634.9847

CAMILA BATISTA DA SILVA LOPES

**DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE UTILIZANDO MICRO-ONDAS E EFEITO DA SUA POTÊNCIA NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DA MADEIRA DE *Eucalyptus* sp.**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*

APROVADA: 1 de agosto de 2018.



Paula Gabriella Surdi



Ana Márcia M. Ladeira Carvalho



Vinícius Resende de Castro  
(Coorientador)



Marcos Oliveira de Paula  
(Orientador)

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por iluminar o meu caminho e me manter sempre forte.

Aos meus pais Marilene e José Nilson, pelo incentivo nos estudos, apoio, amor e por não medirem esforços para me ajudar.

Aos meus irmãos Bruna e Thiago, pelo amor incondicional e carinho.

Aos meus avós presentes e ausentes, pelo zelo e orações.

Aos meus familiares pelo apoio e alegria.

À Manuela, Maria Alice, Maíra e Rhuan por alegrarem os meus dias.

Às minhas grandes amigas Aline, Angélica, Bruna, Camila, Fernanda, Karin, Leili, Mari, Mariana, Mayra, Tamiris e Thaís pela amizade e boas energias.

À Meire Rodrigues por todos os conselhos.

Ao meu orientador Marcos Oliveira de Paula, pela orientação, ensinamentos, confiança e por me ajudar a vencer minhas inseguranças.

Aos professores Benedito Rocha Vital e Vinícius Resende de Castro pelos ensinamentos e pela disposição em esclarecer dúvidas.

Às professoras Angélica de Cássia Oliveira Carneiro e Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho pelos ensinamentos e por serem exemplo para mim desde a graduação.

Ao professor Paulo Roberto Cecon pelo auxílio, ensinamentos e lições de vida.

Aos funcionários do Laboratório de Propriedades da Madeira (LPM) e do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), do Departamento de Engenharia Florestal (DEF/UFV), que me ajudaram na realização dos trabalhos, sempre com muita disposição, em especial à Leila, Osvaldo e Wellington.

Aos estagiários que me auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho, em especial à Marina e Vitória.

Aos amigos de laboratório, Matheus, Luciano, Jéssica, Thaís, Larissa, Fabiana e Márcia, pela ajuda em superar os desafios do dia a dia e pela grande alegria de conviver com vocês.

Ao Departamento de Engenharia Florestal e a Universidade Federal de Viçosa pelo ensino de qualidade, pela infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento da pesquisa e por ser fundamental na minha formação profissional e como cidadã.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal e aos funcionários Alexandre Amorim e Dilson Garcia, que sempre foram muito prestativos e pacientes.

À CAPES, pela concessão da bolsa de pesquisa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao CNPq pela oferta de recursos.

Agradeço a todos que torceram e colaboraram na realização deste trabalho!

## BIOGRAFIA

CAMILA BATISTA DA SILVA LOPES, filha de Marilene Batista da Silva Lopes e José Nilson Silva Lopes, nascida em 10 de abril de 1992, na cidade de Viçosa, Minas Gerais.

Em 2010, ingressou no curso de Engenharia Florestal na Universidade Federal de Viçosa, concluindo-o em julho 2016. Em agosto de 2016, iniciou o curso de Pós-Graduação em Ciência Florestal, em nível de mestrado, na Universidade Federal de Viçosa submetendo à defesa de dissertação, para obtenção do título de Magister Scientiae em agosto de 2018.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	vi
LISTA DE TABELAS .....	vii
RESUMO .....	viii
ABSTRACT .....	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	4
2.1. Objetivo geral .....	4
2.2. Objetivos específicos.....	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. Umidade da madeira.....	4
3.2. Relação água-madeira .....	5
3.3. Métodos para determinação do teor de umidade da madeira .....	7
3.3.1. Método da estufa .....	9
3.3.2. Método utilizando micro-ondas.....	9
3.4. Características das micro-ondas .....	11
3.5. Aquecimento convencional por estufa e aquecimento por micro-ondas.....	12
3.6. Relação entre micro-ondas e madeira .....	14
3.7. Componentes químicos da madeira.....	16
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	17
4.1. Determinação do teor de umidade da madeira .....	19
4.1.1. Método da estufa .....	19
4.1.2. Método de micro-ondas.....	19
4.2. Permeabilidade ao ar atmosférico .....	21
4.3. Fendas internas .....	22
4.4. Determinação da densidade básica.....	23
4.5. Contração da madeira.....	23
4.6. Análise química da madeira .....	23
4.7. Análise estatística .....	24

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	24
5.1. Determinação do teor de umidade da madeira .....	24
5.2. Temperatura interna dos corpos de prova .....	33
5.3. Permeabilidade ao ar atmosférico .....	36
5.4. Densidade da madeira .....	40
5.5. Contração da madeira .....	41
5.6. Composição química .....	43
6. CONCLUSÃO.....	44
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	45
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	46

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Espectro eletromagnético com o comprimento de onda no espaço livre.....12
- Figura 2. Gradiente de temperatura em amostras aquecidas por aquecimento convencional (a) e por aquecimento através de micro-ondas (b).....14
- Figura 3. Amostras de madeira submetidas à de potência de micro-ondas e tempo de exposição inadequados.....16
- Figura 4. Valores entre parênteses representam a quantidade de corpos de prova utilizados nos diferentes métodos de determinação da umidade da madeira e posteriores análises de permeabilidade, densidade, contração e análise química.....20
- Figura 5. Representações esquemáticas (a e b) e vista lateral (c) do corpo de prova, mostrando os orifícios onde foram inseridos os termopares.....23
- Figura 6. Seção transversal de um corpo de prova de eucalipto após processo de secagem em micro-ondas. As setas indicam o papel de área conhecida utilizado para calibração e uma fenda interna.....24
- Figura 7. Curva de secagem as amostras de madeira do grupo 1 em função dos métodos de determinação do teor de umidade.....29
- Figura 8. Perda de massa das amostras de madeira do grupo 1 em função do tempo de secagem de cada método de determinação do teor de umidade.....29
- Figura 9. Curva de secagem das amostras de madeira do grupo 2 em função dos métodos de determinação do teor de umidade.....32
- Figura 10. Perda de massa das amostras de madeira do grupo 2 em função do tempo de secagem de cada método de determinação do teor de umidade.....32
- Figura 11. Curva de secagem das amostras de madeira do grupo 3 em função dos métodos de determinação do teor de umidade.....34
- Figura 12. Perda de massa das amostras de madeira do grupo 3 em função do tempo de secagem de cada método de determinação do teor de umidade.....34
- Figura 13. Distribuição da temperatura em função de três posições nas amostras expostas às diferentes potências de micro-ondas. Os números 1, 2 e 3 no eixo x referem-se às posições dos termopares, sendo 2 a posição central.....36
- Figura 14. Imagens infravermelhas captadas após o primeiro ciclo de aquecimento dos corpos de prova em forno micro-ondas.....37
- Figura 15. Corte transversal evidenciando a presença de tiloses obstruindo os vasos da madeira de *Eucalyptus* sp. utilizada no estudo.....40
- Figura 16. Madeira de *Eucalyptus* sp. após aquecimento, mostrando as fendas formadas.....41
- Figura 17. Permeabilidade da madeira e porcentagem da área do corpo de prova ocupada por fendas internas em função da potência de micro-ondas e dos grupos de amostras.....42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores médios do teor de umidade das amostras de cada grupo de umidade relativa média da madeira e tempo total de aquecimento em função dos métodos de determinação...	27
Tabela 2. Valores médios da permeabilidade ( $\text{cm}^3/\text{cm}.\text{amt}.\text{s}$ ) da madeira de <i>Eucalyptus</i> sp. em função dos tipos de aquecimento e dos grupos de amostras.....	39
Tabela 3. Valores médios de densidade ( $\text{g}.\text{cm}^{-3}$ ) da madeira de <i>Eucalyptus</i> sp. em função dos tipos de aquecimento e dos grupos de umidade.....	42
Tabela 4. Valores médios de contração volumétrica, radial e tangencial da madeira de <i>Eucalyptus</i> sp. em função do método de secagem e dos grupos de umidade.....	44
Tabela 5. Valores médios dos teores de extrativos (%) da madeira de <i>Eucalyptus</i> sp. em função dos métodos de secagem e grupos de umidade.....	45

## RESUMO

LOPES, Camila Batista da Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2018. Determinação do teor de umidade utilizando micro-ondas e efeito da sua potência nas propriedades físicas e químicas da madeira de *Eucalyptus* sp. Orientador: Marcos Oliveira de Paula. Coorientadores: Vinicius Resende de Castro e Benedito Rocha Vital.

A quantidade de água presente na madeira influencia suas características tecnológicas, como trabalhabilidade, estabilidade dimensional, durabilidade e resistência mecânica, então é necessário determinar e controlar o teor de umidade. Há diferentes métodos para determinar esse teor, sendo mais utilizados os métodos que se baseiam no princípio gravimétrico por secagem em estufa. Entretanto, é um procedimento oneroso e muito demorado. A utilização de micro-ondas é uma alternativa viável por ser prática, rápida, simples e barata, mas ainda é pouco estudada e desenvolvida para este fim. As micro-ondas são ondas eletromagnéticas que atuam sobre moléculas de água, podendo causar alterações estruturais no interior do material. Foram investigados os efeitos da potência de micro-ondas e da umidade inicial da madeira na determinação do teor de umidade e nas propriedades físicas e químicas da madeira de *Eucalyptus* sp. Foram utilizados corpos de prova de 2 x 3 x 5 cm conforme as prescrições da NBR 7190. Antes das análises, foi feito o controle da umidade dos corpos de prova, e os mesmos foram separados em três grupos amostrais: grupo 1 - 15%, grupo 2 - 25% e grupo 3 - 50% de umidade relativa da madeira. A determinação da umidade pelo método da estufa seguiu a NBR 7190. Para o método do micro-ondas, as amostras foram colocadas para secar em forno micro-ondas doméstico com potências de 210, 420 e 700 W, em intervalos de 1,5 minutos, até obtenção de massa constante. A análise da distribuição da temperatura no interior do corpo de prova foi feita por meio da inserção de termopares em três posições dos corpos de prova. A análise da permeabilidade foi feita por meio de fluxômetros e bomba de vácuo. A densidade básica e a contração da madeira foram determinadas conforme NBR 11941 e NBR 7190, respectivamente. O teor de extrativo foi obtido de acordo com a norma TAPPI 204 om88. Os teores de lignina foram determinados pelo método Klason modificado e pelo procedimento de Goldshimid. O teor de holocelulose foi obtido por diferença em relação ao total (100%) e aos teores de lignina e extrativos. Com base nos resultados, conclui-se que a secagem das amostras de madeira de eucalipto a 210 W em intervalos de 1,5 minutos até massa constante foi efetiva para determinar o teor de umidade de forma tão precisa quanto o método da estufa. As potências de 420 e 700 W não foram efetivas para obter teores de umidade das amostras dos grupos 1 e 2, mas foram efetivas para o grupo 3. A utilização de micro-ondas reduz significativamente o tempo de secagem. Ocorreu uma redução de 98,8% do tempo para os grupos 1 e 2, e de 99% para o grupo 3. A temperatura na zona central dos corpos de prova foi relativamente superior às temperaturas das áreas mais superficiais. O aquecimento por micro-ondas aumenta a permeabilidade longitudinal, reduz a densidade e afeta a contração. O aquecimento por estufa

é responsável por uma maior contração da madeira em relação ao aquecimento em micro-ondas. A ação de micro-ondas não afetou o teor de lignina e holocelulose da madeira, mas reduziu o teor de extrativos totais quando a potência de 700 W foi aplicada.

## ABSTRACT

LOPES, Camila Batista da Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2018. Moisture content determination using microwaves and power effect on physical and chemical properties of *Eucalyptus* sp. Advisor: Marcos Oliveira de Paula. Co-advisors: Vinicius Resende de Castro and Benedito Rocha Vital.

The amount of water present in the wood influences its technological properties, such as workability, dimensional stability, durability and mechanical strength. Therefore, it is necessary to determine and control the moisture content. There are different methods to determine this content. The methods based on the gravimetric principle by drying in an oven are more used. However, it is a costly and time-consuming procedure. The use of microwaves is a viable alternative because it is practical, fast, simple and inexpensive, but it is little studied and developed for this purpose. Microwaves are electromagnetic waves that act selectively on water molecules, and can cause structural changes on the material, affecting its properties. It were evaluated the effects of microwave power and wood initial moisture content on the determination of moisture content and physical properties of *Eucalyptus* sp. Samples of 2 x 3 x 5 were used, according to the requirements of NBR 7190. Before the analysis, the samples were divided into three groups based on their initial moisture content: group 1 - 15%; group 2 - 25% and group 3 - 50% of wood relative humidity. The moisture content determination by the oven method followed the NBR 7190. For the microwave method, the samples were placed to dry in microwave oven with powers of 210, 420 and 700 W, at intervals of 1,5 minutes, until reaching constant mass. The analysis of temperature distribution inside the samples was done by means of the insertion of thermocouples in three positions of wood samples. The permeability analysis was performed using flow meters and vacuum pump. The wood basic density and contraction were determined according to NBR 11941 and NBR 7190, respectively. The extractive content was obtained according to TAPPI 204 om-88. The lignin contents were determined by the modified Klason method and by the Goldshimid procedure. Holocellulose content was obtained by difference in relation to total (100%) minus the lignin and extractive contents. Based on the results, it was concluded that the drying of the samples of *Eucalyptus* sp wood at 210 W at intervals of 1.5 minutes until constant mass was effective to determine the moisture content as accurately as the oven method. Microwave powers of 420 and 700 W were not effective to obtain moisture contents of groups 1 and 2, but were effective for group 3. The use of microwaves reduces drying time significantly. The temperature in the samples central zone was relatively higher than the superficial areas. Microwave heating increases longitudinal permeability, reduces density, and affects shrinkage. Heating by oven is responsible for a greater wood contraction in relation to the heating in microwaves. The microwave action did not affect the lignin and holocellulose content, but reduced the total extractive content when the power of 700 W was applied.



## 1. INTRODUÇÃO

A quantidade de água presente na madeira é uma variável que exerce grande influência sobre sua trabalhabilidade, estabilidade dimensional, durabilidade e resistência mecânica (GLASS; ZELINKA, 2010; BATISTA et al., 2011). Para os diversos usos e aplicações da madeira, é necessário determinar e controlar o teor de umidade a fim de garantir processos produtivos mais eficientes e de menor custo, além de obter produtos uniformes e com melhor qualidade (DONATO et al., 2014; HANSSON et al., 2005).

O teor de umidade da madeira consiste na relação entre a quantidade de água contida em uma peça de madeira e a massa seca da própria peça (KLITZKE, 2007). Existem diferentes métodos para determinar esse teor e a escolha de um método adequado varia principalmente em relação ao tamanho da peça de madeira, precisão desejada, tempo disponível para obtenção dos resultados, viabilidade econômica e finalidade a qual o produto será destinado.

Os métodos tradicionalmente utilizados são aqueles que se baseiam no princípio gravimétrico por secagem em estufa e são estabelecidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Nestes métodos, a amostra de madeira úmida é pesada e, em seguida, levada à estufa com circulação forçada de ar e controle de temperatura a  $103 \pm 2$  °C, até massa constante (JANKOWSKY; GALINA, 2013). Por diferença entre as massas úmida e seca da amostra, obtém-se a massa de água removida da mesma. É um procedimento oneroso e demorado, pois requer maior período de tempo para que o calor gerado no ambiente circundante seja transferido para o interior do material e promova sua completa secagem. Por outro lado, é considerado preciso para qualquer umidade em que a madeira se encontrar (MORESCHI, 2014).

Existe ainda a possibilidade de se utilizar uma balança analisadora de umidade por luz halógena para obter o teor de umidade da madeira, que também se baseia no princípio gravimétrico (DONATO, 2013). Este equipamento é muito utilizado pela indústria química e alimentícia. É constituído por uma balança de precisão e por uma unidade de secagem de luz halógena, e tem a capacidade de fornecer o teor de umidade de materiais particulados de forma muito rápida, em questão de minutos (OHAUS, 2018). Porém, não existe uma norma regulamentadora para o uso desse instrumento na determinação do teor de umidade da madeira. Além disso, este aparelho permite a determinação do teor de umidade de apenas uma amostra por vez e há restrição quanto ao tamanho da amostra, que deve ser reduzido a serragem.

A utilização de micro-ondas para a obtenção do teor de umidade da madeira também pode ser uma possibilidade. A determinação pode ser feita por meio da diferença de massa da amostra,

antes e depois de passar por processo de secagem em micro-ondas, até massa constante. Esta determinação também tem como base o princípio gravimétrico (CALONEGO et al., 2006).

As micro-ondas são ondas eletromagnéticas de alta frequência (300 MHz a 300 GHz) e são empregadas em processos de aquecimento em diversos setores, como na secagem de alimentos, materiais biológicos, cerâmica, entre outros, com economias significativas tanto no consumo de energia quanto no tempo do processo (HEMIS; CHOUDHARY; WATSON, 2012; ESTURK, 2012; BOTHA; OLIVEIRA; AHTNÉ, 2012; CHEN et al., 2014; PERUSELLO et al., 2014; RATTANADECHO; MAKUL, 2016). As micro-ondas atuam sobre moléculas polares, como a água, que têm alta capacidade de absorver e transformar a energia de micro-ondas em energia térmica, pois elas se movimentam para orientarem-se na direção do campo eletromagnético aplicado, causando vibrações e gerando calor (ZHAO; YAN; HUANG; 2011).

Essa tecnologia oferece uma melhor transferência de energia para o material, de tal modo que o calor penetra instantaneamente e profundamente no mesmo. O aquecimento é gerado e dissipado principalmente nas regiões mais úmidas, proporcionando uma secagem de dentro do material para fora (HASSINI; PECKALSKI; GELET, 2013). Quando a madeira úmida é submetida às micro-ondas, a energia é efetivamente absorvida pela água dentro da madeira, induzindo a rápida vaporização. Isso pode causar uma pressão interna de vapor que é responsável por forçar a saída de umidade do interior do material para a superfície, podendo causar alterações estruturais no interior do material (MUJUMDAR, 2014). A geração de alta pressão interna de vapor por ação de micro-ondas pode modificar características naturais da madeira, como a sua permeabilidade, devido ao rompimento de células, causando a formação de fissuras internas (TORGOVNIKOV; VINDEN; BALBONY, 2015).

A duração da exposição da madeira às micro-ondas é fundamental para evitar a deterioração das amostras uma vez que pode ocorrer superaquecimento provocando carbonização. Quando a madeira é submetida à secagem por micro-ondas, a temperatura interna não é conhecida. Então é importante a aplicação intermitente de energia de microondas para evitar queima da amostra (OLOYEDE; GROOMBRIDGE, 2000). O nível de potência, a umidade inicial da madeira, a espécie de madeira e o tamanho da amostra são fatores que podem afetar a secagem, por isso há uma dificuldade em estabelecer um padrão de utilização do aparelho de micro-ondas na determinação do teor de umidade da madeira.

Apesar da tecnologia de micro-ondas aplicada à madeira se mostrar promissora em razão das altas taxas de secagem promovidas e da sua alta capacidade de penetração, que garantem aquecimento rápido e eficiente, pouca atenção tem sido dada para o seu uso como técnica efetiva para determinar o teor de umidade da madeira.

Diante do exposto, este trabalho visa atender à demanda por metodologias de determinação do teor de umidade da madeira em diferentes cenários de utilização, que sejam mais eficientes, de menor custo, práticas, rápidas e simples, avaliando o uso de forno de micro-ondas doméstico para a determinação do teor de umidade da madeira.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo geral

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a determinação do teor de umidade da madeira de *Eucalyptus* sp. por meio de secagem em aparelho de micro-ondas doméstico, avaliando o efeito de diferentes níveis de potência e teores de umidade nas propriedades físicas e químicas da madeira.

### 2.2. Objetivos específicos

- Comparar os valores obtidos por meio da determinação da umidade da madeira utilizando estufa com circulação forçada de ar e controle de temperatura e forno micro-ondas doméstico;
- Avaliar a influência da potência de micro-ondas na obtenção de teores de umidade da madeira;
- Analisar a distribuição de temperatura ao longo dos corpos de prova de madeira durante aquecimento em micro-ondas;
- Verificar o efeito do aquecimento em micro-ondas na permeabilidade, na densidade básica, na contração, no aparecimento de fendas internas e nos componentes químicos estruturais da madeira.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1. Umidade da madeira

A interação da água presente na madeira com os demais componentes químicos pode causar alterações nas propriedades tecnológicas da madeira, como estabilidade dimensional e resistência mecânica. Além disso, tem grande influência sobre a biodeterioração por agentes xilófagos (MORESCHI, 2014). A madeira é um material higroscópico, podendo apresentar diferentes teores de umidade em função da umidade relativa do ar e temperatura do ambiente em que se encontra (TRUGILHO et al., 1990). A quantidade de água contida em uma madeira verde varia de acordo com a espécie, idade da árvore e posição no tronco (BRIETZ; NOGUEIRA, 2006).

Esta água deve ser removida por meio de processos de secagem até um teor de umidade desejado, que depende do uso ao qual a madeira será destinada, para minimizar os efeitos de movimentação dimensional, reduzir custos de transporte e diminuir a susceptibilidade a organismos xilófagos. O conceito de madeira seca pode variar desde teores de umidade entre

20 e 30% para madeiras secas ao ar livre, até valores inferiores a 20%, no caso de secagem controlada (GLASS; ZELINKA, 2010). Para efeitos de ensaios de determinação da umidade, a madeira é considerada seca quando atinge massa constante, ou seja, quando é seca em estufa com circulação forçada de ar e controle de temperatura a  $103 \pm 2$  °C e a variação entre duas pesagens consecutivas é menor ou igual a 0,5% da última massa medida (ABNT, 1997).

O termo teor de umidade da madeira consiste na relação entre a massa de água presente na matéria lenhosa e sua massa. Essa relação pode ser expressa levando em consideração a massa úmida da madeira (base úmida) ou em função da massa seca da madeira (base seca), conforme as Equações 1 e 2. O teor de umidade em base úmida é comumente empregado em indústrias de celulose e papel, enquanto que a base seca é a forma padrão usada para expressar a quantidade de água em produtos de madeira maciça, como madeira serrada e painéis. Este valor pode ultrapassar 100%, pois o peso de água pode exceder o peso do material seco (GOVETT; MACE; BOWE, 2010).

$$\text{TU base úmida (\%)} = \frac{m_i - m_s}{m_i} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{TU base seca (\%)} = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (2)$$

Onde,

TU: teor de umidade, em %;

$m_i$ : massa inicial da amostra, em g;

$m_s$ : massa da amostra seca, em g.

Segundo Donato et al., (2014), a determinação da umidade deve ser feita desde a colheita até o uso final da madeira. O teor de umidade exerce grande influência sobre a trabalhabilidade e utilização da madeira, pois suas propriedades físicas e mecânicas podem variar de acordo com a quantidade de água presente em seu interior. Assim, conhecer, determinar e controlar esse teor é de extrema importância para se obter produto de qualidade (BATISTA et al., 2011).

### 3.2. Relação água-madeira

Existem três formas em que a água se encontra na madeira, sendo classificadas como água livre ou capilar, água de adesão ou impregnação e água de constituição (SIMPSON, 1991). A água de constituição faz parte da estrutura molecular dos componentes químicos presentes nas paredes celulares, permanecendo constante durante processos de secagem, desde que a

temperatura não seja elevada o suficiente para degradar termicamente a madeira (SKAAR, 1972).

A água livre se encontra no lume das células e nos espaços intercelulares. Sua quantidade está relacionada com a quantidade de espaços vazios na estrutura anatômica da madeira. A água livre é facilmente removida e é a primeira ser removida durante processos de secagem, pois necessita de menor energia para ser evaporada, uma vez que está retida à madeira apenas por forças capilares. A remoção da água livre não afeta as dimensões da madeira, mas ocasiona variações na massa e pode provocar o aparecimento de defeitos, como colapsos. Colapsos consistem em achatamento das células da madeira durante a secagem, resultando em superfícies de madeira distorcidas e com ondulações. É causado por forças geradas durante a movimentação da água capilar, as quais podem deformar as células da madeira (JANKOWSKY, 1990; GALVÃO; JANKOWSKY, 1985).

A água de adesão se encontra adsorvida pelas paredes celulares, sendo retida aos grupamentos hidrofílicos das paredes por ligações de hidrogênio. De modo geral, a alta densidade de uma madeira pode estar associada à presença de células com paredes mais espessas, havendo mais água de adesão para ser evaporada e movimentada por difusão, necessitando de mais tempo para perder umidade. É necessário um maior gasto de energia para evaporá-la e sua remoção pode acarretar em alterações nas propriedades físicas e mecânicas da madeira, devido às variações de massa e dimensões que ocorrem (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985; SIMPSON, 1991).

Quando todo o conteúdo de água livre é removido da madeira, ela atinge o seu ponto de saturação das fibras (PSF), ou seja, o PSF é a umidade referente ao estado em que, teoricamente, apenas as paredes celulares estão saturadas (SKAAR, 1988). Abaixo deste ponto, podem ocorrer alterações nas propriedades da madeira no processo de secagem. Simpson (1991) afirma que o PSF, de um modo geral, é de aproximadamente 30%. Jankowsky e Galina (2013) citam que o PSF varia entre 25 e 32%, com valor médio de 28% para todas as espécies.

Durante a secagem, o movimento de água acima do PSF é causado por forças capilares. No início do aquecimento da madeira, a água livre se movimenta, por ação de capilaridade, da madeira para o ambiente, por meio das cavidades celulares (lume) e das pontuações presentes nas paredes celulares. Por outro lado, o movimento de água abaixo do PSF corresponde ao movimento da água de adesão por fenômenos de difusão. O movimento de difusão está relacionado ao gradiente de umidade gerado durante o aquecimento, fazendo com que a água de adesão se movimente de uma região de maior concentração para uma de menor concentração (KOLLMANN; CÔTÈ, 1968; SIAU, 1971). A espessura das paredes celulares afeta a difusão

de vapor de água por meio do material lenhoso (TARMIAN et al., 2012). À medida que a madeira fica mais seca, a taxa de secagem diminui, pois nesta fase ocorre principalmente o fenômeno de difusão, que é mais lento em relação ao movimento por capilaridade.

De acordo com Klitzke (2003), quando a madeira passa por processo de secagem, a ação da capilaridade movimenta a água livre por meio do lume e das pontuações. As diferenças de umidade no interior da madeira estabelecem gradientes responsáveis pela movimentação do vapor de água por difusão e da água de adesão através das paredes celulares, também por difusão.

A estrutura anatômica da madeira confere sua permeabilidade, influenciando a movimentação de fluidos. De modo geral, o tamanho e quantidade de vasos, placas de perfurações e pontuações, bem como a presença de tilose, afetam a permeabilidade de madeira de folhosas. No caso de coníferas, o número de pontuações aspiradas influencia a facilidade ou dificuldade e o modo como a água flui pela madeira (BARAÚNA, 2010; MORESCHI, 2014). Segundo Simpson (1991), o movimento de água pode correr por três caminhos diferentes: lume e pontuações (difusão de vapor de água), paredes celulares (difusão de água de adesão) e lume e paredes celulares (difusão combinada de vapor e água de adesão).

### 3.3. Métodos para determinação do teor de umidade da madeira

A determinação precisa da umidade da madeira é de grande importância para diversos setores que utilizam esse material como matéria-prima. Há diferentes métodos para determinar o teor de umidade da madeira, cada um tem suas vantagens e desvantagens no que diz respeito ao seu objetivo, praticidade, custo e tempo de execução (GOVETT; MACE, BOWE, 2010). Os mais utilizados são os métodos gravimétricos por secagem em estufa com circulação forçada de ar e controle de temperatura que seguem as regulamentações estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, como as normas NBR 7190 (ABNT, 1997) e NBR 14929 (ABNT, 2003). Nesses métodos, a quantidade de água é obtida por meio de diferença de massa, antes e depois de processo de secagem até massa constante. Outra forma de determinar o teor de umidade é por meio de secagem em forno microondas. A utilização de micro-ondas para obtenção da umidade é uma alternativa viável, em termos práticos, por proporcionar uma resposta rápida, mas esta forma de determinar a umidade da madeira ainda é pouco pesquisada (CALONEGO et al., 2006). A radiação de micro-ondas tem sido aplicada em diversos setores com significativas reduções de tempo, energia, espaço físico e custos. Dentre as diversas aplicações, tem-se o uso em indústria alimentícia (LI et al.; 2010; MARRA; DE BONIS; RUOCCO, 2010), cura de resinas e secagem de cerâmica (MENEZES; SOUTO; KIMINAMI,

2007), determinação do teor de umidade de amostras de solo e planta (SOUZA; NOGUEIRA; RASSINI, 2002), secagem de forrageiras (LACERDA; FREITAS; SILVA, 2009), obtenção da umidade de bauxita (MAGALHÃES; LIMA; SOUZA, 2003), entre outros.

Também existe a possibilidade de usar uma balança analisadora de umidade por luz halógena. Este equipamento é utilizado para determinar a quantidade de água presente em diversos materiais. É constituído por uma balança de precisão e uma unidade de aquecimento por luz halógena, que seca a amostra em questão de minutos. Opera com base no princípio gravimétrico, registrando continuamente o peso da amostra durante a secagem e, quando a perda de massa da amostra é constante, o teor de umidade é exibido no display (OHAUS, 2018). A amostra precisa estar na forma particulada (serragem). As principais desvantagens dessa forma de determinação da umidade são o fato de que é possível realizar a análise de apenas uma amostra por vez e o alto custo de aquisição da balança. O valor do equipamento pode variar entre R\$5.000,00 e R\$14.000,00, dependendo do modelo e da marca.

Estudos sobre o uso da balança analisadora de umidade para determinar o teor de umidade da madeira ainda são escassos, não havendo uma metodologia correta a ser utilizada. De acordo com Donato (2013), o tempo para a determinação da umidade de 0,9 g de serragem de *Eucalyptus sp.*, utilizando esta balança, é de 3 a 5 min, dependendo do teor de umidade inicial do material. Em seu estudo, este autor concluiu que o teor de umidade obtido se aproximou do valor obtido pelo método da ABNT, embora os valores fossem estatisticamente diferentes, enfatizando que este método ainda precisa ser mais estudado e aprimorado.

Além dos métodos já mencionados, o teor de umidade da madeira pode ser determinado por meio do método químico de destilação e de titulação Karl Fischer (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985). Este método é preciso, entretanto há elevado custo associado à necessidade de reagentes químicos, vidrarias laboratoriais específicas, operador técnico bem treinado e laboratório equipado com escapamentos de vapores insalubres e inflamáveis. Outra alternativa é o uso de medidores elétricos resistivos e capacitivos, que são práticos, portáteis e proporcionam resposta imediata, mas com exatidão contestada. As desvantagens são a necessidade de correções para espécie e temperatura e a menor faixa de utilização, que é de 5 a 25% de umidade para a maioria das espécies e modelos de medidores elétricos (JANKOWSKY, GALINA; 2013). Galina (1997) relatou que a medição da resistência elétrica para a determinação do teor de umidade é válida para a faixa de 4 a 40% de umidade.

Para definir o método de determinação da umidade ideal, deve-se levar em consideração principalmente a sua precisão, rapidez, praticidade, custo e a finalidade a qual o produto se destina (DONATO et al., 2014).

### 3.3.1. Método da estufa

O método de determinação do teor de umidade em estufa é o mais convencionalmente utilizado. É considerado um dos mais precisos para qualquer umidade inicial em que a madeira se encontrar (CALONEGO et al., 2006). Utiliza-se uma estufa de secagem com circulação forçada de ar e controle de temperatura entre 101 e 105 °C e uma balança com precisão de 0,1 g (JANKOWSKY, 1990). A exatidão dos resultados obtidos está relacionada principalmente à precisão da balança e ao cuidado do operador durante o processo de pesagem. O preço de uma estufa é de no mínimo R\$4.000,00 e o valor da balança de precisão varia entre R\$6.000,00 e R\$ 14.000,00, dependendo da marca, modelo e tamanho.

Este método requer maior período de tempo para obtenção da massa seca da madeira, requerendo aproximadamente 24 horas ou possivelmente mais tempo, dependendo, principalmente, do tamanho da peça de madeira, do teor de umidade em que a mesma se encontrar e das características da madeira, como densidade e estrutura anatômica. Não é adequado para madeiras com altos teores de componentes voláteis, pois parte da massa perdida no processo de secagem pode ser devido à evaporação dessas substâncias, fazendo com que o valor do teor de umidade seja superestimado (MORESCHI, 2014). Os demais métodos de determinação da umidade da madeira são comumente comparados com os resultados deste método para assegurar precisão (GOVETT; MACE; BOWE, 2010).

### 3.3.2. Método utilizando micro-ondas

A utilização de micro-ondas para determinação do teor de umidade da madeira também se baseia no princípio gravimétrico, no qual a amostra é inserida em um aparelho emissor de micro-ondas para que seja seca até massa constante. É uma alternativa viável, prática e rápida para obter a umidade da madeira, principalmente porque a secagem ocorre na ordem de minutos. A principal desvantagem associada ao uso de micro-ondas é que deve ser monitorado de perto, pois pode ocorrer combustão da amostra. Dessa forma, é fundamental controlar o nível de potência e o tempo de exposição às micro-ondas em função do tamanho da amostra (DASHTI et al., 2012).

A norma americana ASTM E 1358 - 97 (ASTM, 2006) regulamenta a determinação do teor de umidade de madeira particulada usando forno micro-ondas convencional, fornecendo a massa seca em alguns minutos. A massa constante é obtida quando a diferença entre duas pesagens sucessivas é menor que 0,5 g. De acordo com essa norma, o método é aplicável em situações que requerem a rápida verificação da umidade, como, por exemplo, para conferir se uma carga de madeira particulada para biocombustível entregue em uma indústria é desejável. Entretanto,

essa norma é aplicável somente para madeira particulada e somente a potência de 600 W é utilizada, variando-se o tempo de aquecimento em micro-ondas conforme o tipo de madeira particulada utilizada, como serragem, cavacos e restos de madeira.

Um forno doméstico de micro-ondas possui uma cavidade metálica à qual a energia de micro-ondas é aplicada. A potência de micro-ondas é gerada por válvulas geralmente do tipo magnetron e uma guia de ondas transporta as ondas eletromagnéticas até a parte superior da cavidade do forno. As paredes metálicas refletem essas ondas, tentando garantir um aquecimento mais homogêneo. O prato giratório também proporciona uma melhor distribuição da energia ao longo do material. Há um exaustor para auxiliar na remoção do ar quente e úmido do forno (DECAREAU; PETERSON, 1986). Um forno doméstico de microondas pode custar entre R\$200,00 e R\$400,00, dependendo da marca e do tamanho de sua cavidade interna, preço muito inferior em relação às estufas com circulação forçada de ar e controle de temperatura de secagem.

Para uma determinação de umidade precisa, são necessários mais estudos que avaliem parâmetros como tempos de exposição às essas ondas, potências e temperatura para definir melhores programações para um determinado tipo de amostra e teor de umidade inicial da madeira. Além de ser necessário avaliar o comportamento da madeira perante a ação dessas micro-ondas, analisando o efeito na retratibilidade, permeabilidade, densidade e composição química.

A retratibilidade é importante porque diz respeito às variações dimensionais da madeira quando há alterações em seu teor de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras (PANSWIN; DE ZEEUW, 1980). A permeabilidade é a medida da facilidade com que fluidos são transportados através de um sólido poroso (SIAU, 1971). Relaciona-se com processamento e tratamento da madeira, pois afeta sua secagem e impregnação com substâncias químicas (TARMIAN; PERRÉ, 2009). A densidade é uma das características mais importantes dentre as propriedades físicas, pois afeta demais propriedades e características tecnológicas da madeira (PANSWIN; DE ZEEUW, 1980; TRUGILHO; LIMA; MENDES, 1996). A maioria das propriedades mecânicas e físicas da madeira está fortemente relacionada à densidade, como resistência, rigidez, propagação de calor, contração e inchamento. A composição química da madeira pode afetar a determinação da umidade. Madeiras com um alto conteúdo de materiais voláteis, por exemplo, podem ter seu valor de teor de umidade superestimado, pois parte da massa perdida no processo de secagem pode ser devido à evaporação de tais substâncias (MORESCHI, 2005).

### 3.4. Características das micro-ondas

O espectro eletromagnético (Figura 1) abrange uma vasta gama de ondas que apresentam diferentes propriedades devido às suas frequências. As micro-ondas estão situadas entre a radiação infravermelha e as ondas de rádio. São definidas como ondas eletromagnéticas cuja frequência está na faixa de 300 MHz a 300 GHz, comprimentos de onda correspondentes de 1 m a 1 mm (HANSSON, 2007; LUNDGREN, 2007). As frequências de 0,915 e 2,45 GHz são as mais comumente utilizadas em aquecimento por micro-ondas para fins industriais, científicos e médicos (FERNÁNDEZ; ARENILLAS; MENÉNDEZ, 2011).

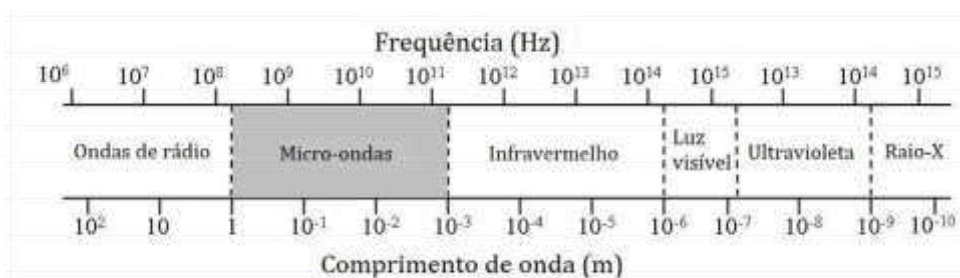


Figura 1. Espectro eletromagnético com o comprimento de onda no espaço livre. Fonte: Adaptado de Lundgren (2007).

Os materiais que absorvem a energia de micro-ondas são chamados dielétricos. Estes apresentam a capacidade de converter energia eletromagnética em energia térmica, pois quando as micro-ondas são interceptadas por um material dielétrico, elas interagem com as moléculas polares deste material, resultando na rápida vibração dessas moléculas e no consequente aumento de temperatura no interior do mesmo. Isso depende da quantidade de energia aplicada por tempo, ou seja, da potência (DECAREAU; PETERSON, 1986). De acordo com Meredith (1998), o comportamento de um material em resposta a um campo de micro-ondas depende da frequência aplicada, das propriedades dielétricas do próprio material, como perda dielétrica e constante dielétrica, e de parâmetros como teor de umidade, densidade e geometria do material. O termo perda dielétrica refere-se à energia de microondas de entrada que é perdida para o material, sendo dissipada como energia térmica. A constante dielétrica de um material relaciona-se com a capacidade das moléculas de serem polarizadas pelo campo elétrico. O valor da constante dielétrica da água é 80, sendo superior comparado à madeira, que possui constante dielétrica em torno de 4 e 5 (SKAAR, 1988).

A transformação da energia de micro-ondas em energia térmica ocorre por mecanismos em escalas atômica e molecular, sendo a rotação dipolar e a condução iônica os mais significativos. A condução iônica ocorre quando íons em solução entram em movimento em resposta a um campo eletromagnético, colidindo-se uns com os outros e convertendo energia cinética em calor. Na rotação dipolar, as moléculas polares, como a água, tentam se orientar na direção do

campo eletromagnético aplicado. Considerando uma frequência de 2,45 GHz, um campo eletromagnético tem um fluxo de cerca de 2 bilhões de ciclos por segundo, produzindo atrito entre as moléculas de água devido à sua rápida movimentação e gerando calor (KAPPE, 2008). Em materiais com altos teores de umidade, o fenômeno de rotação dipolar é mais importante do que a condução iônica.

As micro-ondas têm sido mais eficazes do que os métodos de secagem convencionais para cerâmica (VONGPRADUBCHAI; RATTANADECHO, 2011), materiais biológicos e vegetais (ESTURK, 2012; HEMIS; CHOUDHARY; WATSON, 2012; PERUSELLO et al., 2014; SCAMAN et al., 2014), alimentos (BHATTACHARYA, SRIVASTAV; MISHRA, 2013; BOTHA; OLIVEIRA; AHTNÉ, 2012; CHEN et al., 2014), entre outros. Segundo Mujumdar (2014), o tempo de secagem de materiais utilizando a técnica de micro-ondas pode ser diminuído em mais de 50%.

### 3.5. Aquecimento convencional por estufa e aquecimento por micro-ondas

O aquecimento convencional que ocorre em secagem em estufas com circulação forçada de ar e controle de temperatura é lento e é introduzido na amostra a partir da superfície (DE LA HOZ et al., 2005). É necessário que o interior da estufa atinja certa temperatura para depois iniciar o aquecimento e secar o material (FERNÁNDEZ; ARENILLAS; MENÉNDEZ, 2011). Quando um material que contenha umidade é submetido a um processo convencional de secagem, ocorrem dois processos simultaneamente: a transferência de energia como calor do ambiente circundante para evaporar a umidade da superfície do material e a lenta transferência da umidade interna para a superfície, até sua subsequente evaporação devido ao primeiro processo. A remoção de água da superfície do material depende de condições externas, como temperatura, fluxo do ar e área exposta do material. Já o movimento de umidade internamente está relacionado com características intrínsecas do material, temperatura e teor de umidade (MUJUMDAR, 2014).

A transferência de calor ocorre por gradiente de temperatura decorrente da temperatura mais alta do ambiente circundante em relação ao material, que resulta em transferências de energia para o interior do mesmo. A transferência de umidade ocorre devido a um gradiente de concentração entre o interior úmido e a superfície seca. Esses gradientes são direcionados de forma oposta, resultando em um efeito de amortecimento na transferência de umidade, com isso, o processo é muito lento. Além disso, à medida que o teor de umidade reduz, a condutividade térmica da madeira diminui, prolongando o tempo de secagem (STAMM, 1964).

Outro fator a se considerar é que mais energia é necessária para remover a água que está fortemente ligada aos constituintes da madeira (SIMPSON, 1980).

Em contrapartida, o aquecimento por micro-ondas é instantâneo, ocorrendo em questão de segundos ou minutos. Acontece em nível molecular, pois magnitude da ação dessas ondas, ou seja, a absorção da radiação e o aquecimento, depende das propriedades dielétricas das moléculas polares do material (DE LA HOZ et al., 2005). Existe uma alta afinidade entre as micro-ondas e moléculas de água, pois estas são polares, interagindo com a radiação de micro-ondas (SHARA'AH; HELLEUR, 2014). Dessa forma, o uso de micro-ondas proporciona uma eficiente conversão energética e taxas de aquecimento mais altas uma vez que a energia é fornecida diretamente ao material por meio da interação molecular, não havendo gasto de tempo e energia aquecendo o ambiente circundante (OLOYEDE; GROOMBRIDGE, 2000). Além disso, a secagem por micro-ondas permite o desligamento instantâneo em caso de necessidade ou emergência.

A energia de micro-ondas tem grande poder de penetração e é efetivamente absorvida pela água, induzindo sua vaporização e criando uma pressão de vapor interna. Esta pressão força a saída de água para a superfície (LYONS; HATCHER; SUNDERLAND, 1972). Quanto maior o teor de água, maior é a influência do gradiente de pressão na remoção da umidade. O calor é gerado nas partes mais úmidas do material e a intensidade de calor gerado cai com a redução do conteúdo de umidade, sendo a secagem mais uniforme (COLLIN, 2001; KRASZEWSKI; NELSON, 1995). A principal vantagem das micro-ondas é o aumento da taxa de secagem e subsequente redução no tempo de secagem (GUANBEN; SIQUN; ZHIYONG, 2005; AWOYEMI, 2004; VONGPRADUBCHAI; RATTANADECHO, 2009). O processo de secagem por micro-ondas depende essencialmente de fatores internos do material e das características das micro-ondas. Os elementos externos como umidade e fluxo do ar contribuem pouco para a velocidade de secagem. A condutividade térmica de um material tem um papel menos importante em aquecimento por micro-ondas em relação a aquecimento convencional devido à rápida velocidade na qual o calor é formado, reduzindo o tempo no qual a condutividade térmica pode ser efetiva (MUJUMDAR, 2014).

A comparação da distribuição de temperatura em ambos os sistemas de aquecimento pode ser observada na Figura 2, onde os círculos representam a amostra e os quadrados correspondem à cavidade dos instrumentos de aquecimento. No aquecimento convencional por estufa, o calor é transferido do ambiente aquecido para o material. No aquecimento por micro-ondas, o material está a uma temperatura mais elevada do que a área circundante, pois ocorre a geração de calor internamente (FERNÁNDEZ; ARENILLAS; MENÉNDEZ, 2011).

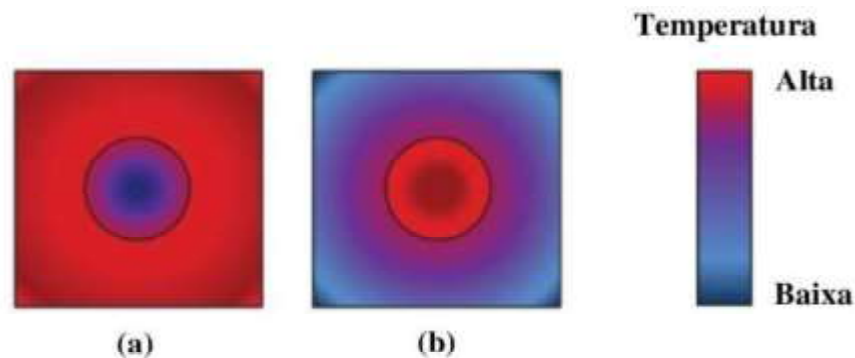


Figura 2. Gradiente de temperatura em amostras aquecidas por aquecimento convencional (a) e por aquecimento por meio de micro-ondas (b). Fonte: Adaptado de Fernández, Arenillas e Menéndez (2011).

A principal desvantagem do uso de micro-ondas é a possibilidade de poder aquecer e secar tão rapidamente que o aquecimento pode degradar a madeira. Dependendo da potência, do tempo de exposição e da quantidade de água presente, podem ser estabelecidos gradientes de temperatura significativos entre regiões internas mais quentes e a superfície das amostras. Assim, pode acontecer superaquecimento localizado, fazendo com que a madeira sofra pirólise e ocorra degradação de constituintes químicos (MIURA et al., 2004). Logo, é importante monitorar as variações de energia e distribuição de temperatura para evitar superaquecimento e deterioração das amostras.

### 3.6. Relação entre micro-ondas e madeira

A ação de micro-ondas pode aumentar a taxa de secagem da madeira, reduzindo o tempo de secagem de forma significativa (ZIELONKA; DOLOWY, 1998). Brodie (2007) obteve uma redução de 17% e 33% do tempo de secagem das madeiras de *Eucalyptus regnans* e *Populus alba*, respectivamente, após ter sido feito um pré-tratamento com microondas operando a 2,45 GHz por 6 minutos. Tal aceleração foi atribuída a uma redução de 9% na densidade da madeira e um aumento substancial na permeabilidade associada às fissuras internas microscópicas geradas pelas micro-ondas.

De acordo Torgovnikov e Vinden (2006), o uso de micro-ondas em pré-secagem de madeira de *Eucalyptus obliqua* reduziu o tempo de secagem em 4-5 vezes. Turner, Puiggali e Jomaa (1998) demonstraram que a taxa de secagem e a qualidade da madeira de pinheiro aumentou significativamente pela aplicação de radiação de micro-ondas como pré-tratamento. Estudos mostram a eficiência do uso de micro-ondas no nivelamento da umidade de madeira úmida (AFZAL; THOMSON, 2004; ANTTI; HANSSON, 2010). O condicionamento de *Pinus radiata* em um sistema de micro-ondas com potência de 500 W por 6 minutos proporcionou uma

distribuição uniforme de umidade sem o aparecimento de estresse residual (ROMERO et al., 1995).

A secagem por meio de micro-ondas é rápida, pois essas ondas propiciam o aumento da pressão interna por entre as células da madeira, resultando no rompimento de tiloses, membranas de pontuações e células parenquimáticas e consequente formação de espaços aleatórios, o que pode elevar significativamente a permeabilidade da madeira a fluidos (XU et al., 2014; DASHTI et al., 2012).

Com isso, novos produtos podem ser criados, como Torgvin e Vintorg (CRC, 2005; TORGOVNIKOV; VINDEN, 2010). Torgvin consiste em uma peça de madeira com várias cavidades longitudinais e radiais causadas por tratamento com micro-ondas de alta intensidade. Quando este material é impregnado com resina e comprimido em prensa, Vintorg é formado. Este apresenta as altas propriedades de resistência, boa estabilidade dimensional e resistência à deterioração. A principal vantagem é que permite o uso de madeira de baixa qualidade, convertendo-a em um produto com melhores propriedades.

A ação de micro-ondas pode aumentar a permeabilidade de madeira serrada, moirões e cavacos, e afetar a resistência, retratibilidade e densidade da madeira. A intensidade das modificações causadas pelas micro-ondas depende do nível da potência das micro-ondas e está associada principalmente à ruptura de células do raio que representam cerca de 5 a 35% do volume total da madeira, dependendo da espécie (TORGOVNIKOV; VINDEN, 2009). A quantidade de água é importante porque as moléculas de água são as responsáveis pela transformação de energia eletromagnética em calor (ZHAO; YAN; HUANG, 2011). Então, o teor de umidade em que a madeira se encontra afeta a capacidade de aquecimento. Dashti et al. (2012) ressaltaram que a efetividade do uso de micro-ondas depende da duração da exposição, sendo necessário interromper o aquecimento por 60 a 120 segundos. No estudo de Oloyede e Groombridge (2000), a madeira foi resfriada após períodos curtos de exposição às micro-ondas para evitar seu superaquecimento e carbonização (Figura 3). Ainda assim, o tempo total gasto na secagem por micro-ondas foi significativamente menor em relação aos métodos convencionais. O fenômeno de superaquecimento ocorre porque a radiação de micro-ondas atinge o interior da madeira rapidamente, de tal modo que a energia pode se concentrar em único ponto, elevando a temperatura de forma rápida, causando degradação. Isso depende do nível de energia aplicado, do tempo de exposição e das propriedades da madeira, como densidade e umidade (LEIKER; ADAMSKA, 2004).



Figura 3. Amostras de madeira submetidas à potência de micro-ondas e tempo de exposição inadequados.

### 3.7. Componentes químicos da madeira

A ligação entre a madeira e a água deve-se principalmente aos seus três principais constituintes, celulose, hemicelulose e lignina, que apresentam diferentes capacidades de adsorção. A celulose é constituída por unidades de  $\beta$ -D-anidroglicopiranosose, unidas por ligações glicosídicas do tipo  $\beta$  (1-4) (ROWELL; PETTERSEN; TSHABALALA, 2013). As moléculas de celulose se juntam longitudinalmente, formando as fibrilas elementares, as quais possuem regiões cristalinas, interrompidas por regiões amorfas quimicamente fracas. A adsorção da água acontece principalmente nessas regiões amorfas, onde há grupos hidroxílicos livres (MORESCHI, 2014). A celulose é degradada em temperaturas entre 260 e 370 °C (OLIVEIRA; GOMES; ALMEIDA, 1982).

As hemiceluloses são constituídas por diferentes açúcares. Possuem alto número de grupos hidroxílicos, sendo responsáveis por grande parte dos fenômenos de adsorção e inchamento da madeira (MORESCHI, 2014). São menos termicamente estáveis que a celulose, pois são polímeros amorfos, com cadeias ramificadas e geralmente apresentam baixo peso molecular (ROWELL; PETTERSEN; TSHABALALA, 2013). A degradação térmica das hemiceluloses ocorre geralmente entre 220 a 330 °C (OLIVEIRA; GOMES; ALMEIDA, 1982; ROWELL; PETTERSEN; TSHABALALA, 2013; YANG et al., 2007). A partir de 250 °C passam ser degradadas com maior intensidade, se comparadas à celulose e à lignina (MARTINS, 1980).

A lignina é uma substância amorfa, composta de grupos fenólicos, sendo, portanto, altamente hidrofóbica. Apresenta alta resistência à degradação térmica devido a sua estrutura complexa, seu nível de aromaticidade e tamanho da molécula. O comportamento da lignina frente à

degradação térmica ainda é pouco conhecido (MOORE et al., 1974; ROWELL; PETTERSEN; TSHABALALA, 2013). Segundo Yang et al. (2007) a faixa de degradação térmica da lignina ocorre de forma lenta desde 150 até 900 °C, sendo que começa a se degradar em temperaturas relativamente baixas, mas sua degradação acontece de maneira mais lenta.

De acordo com Hansson e Antti (2003), apesar das moléculas de água serem significativamente afetadas pelas micro-ondas, outras moléculas polares existentes na constituição da madeira também podem ser afetadas, como hemicelulose, celulose e lignina,

porém de forma não significativa. Ainda de acordo com Shara'ah e Helleur (2014), a água tem maiores propriedades dielétricas do que celulose e materiais lignocelulósicos. Sabe-se que o efeito de micro-ondas em componentes químicos da madeira ainda não é muito claro.

De acordo com Sahin e Ay (2004) à medida que o teor de umidade aumenta, os componentes polares da parede celular e celulose alcançam mais liberdade de rotação em maior teor de umidade e desta forma também contribuem para um comportamento dielétrico mais pronunciado. No estado seco, as macromoléculas da celulose na madeira estão ligadas por forças de valência secundárias que impedem os dipolos das moléculas de se deslocarem sob a influência do campo eletromagnético.

O comportamento da madeira em resposta a um campo eletromagnético é influenciado pela celulose na direção longitudinal, principalmente porque os grupos hidroxila da celulose provavelmente têm mais liberdade de rotação na direção longitudinal (LIN, 1967; NORIMOTO, YAMADA, 1972). Porém, segundo James (1975), a celulose tem um baixo efeito nas propriedades dielétricas da madeira. A habilidade de biomassa e materiais celulósicos absorverem radiação de micro-ondas é baixa, mas a presença de água melhora a eficiência de absorção das micro-ondas (OMAR et al., 2011).

Para determinação do teor de umidade pelo método do micro-ondas, espera-se que não ocorra alterações na composição químicas na madeira. Se algum componente químico for degradado e removido da madeira, o valor obtido para o teor de umidade pode ser superestimado e a confiabilidade do método pode ser influenciada.

#### 4. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no Laboratório de Propriedades da Madeira (LPM) e no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), pertencentes ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais.

A madeira utilizada foi proveniente de um povoamento de *Eucalyptus* sp. localizado no município de Viçosa, Minas Gerais, Brasil. Foram utilizadas 3 árvores de eucalipto com idade

de 8 anos. Destas árvores, foram obtidas toras com 1,5 m de comprimento cada uma, sendo descartada a primeira tora da base da árvore e utilizadas as duas toras subsequentes, a partir das quais foram produzidos os corpos de prova da região de transição entre cerne e alburno, com dimensões de 2 x 3 cm e comprimento ao longo das fibras de 5 cm, conforme NBR 7190 (ABNT, 1997).

A quantidade total de corpos de prova utilizada na determinação da umidade e nas análises está representada na Figura 4, na qual está exemplificado para o grupo 1 (15%), mas o mesmo se aplica aos demais grupos 2 (25%) e 3 (50%). Foram utilizados 468 corpos de prova no total, extraídos de 3 árvores. Deste total, 432 foram divididos em 3 grupos de umidade média, totalizando 144 corpos de prova por grupo de umidade média. Para cada metodologia de determinação da umidade utilizou-se 36 corpos de prova. Estes passaram por análise de permeabilidade, densidade, contração e análise química. Os demais 36 corpos de prova foram utilizados como testemunha nas análises de permeabilidade, densidade e análise química.

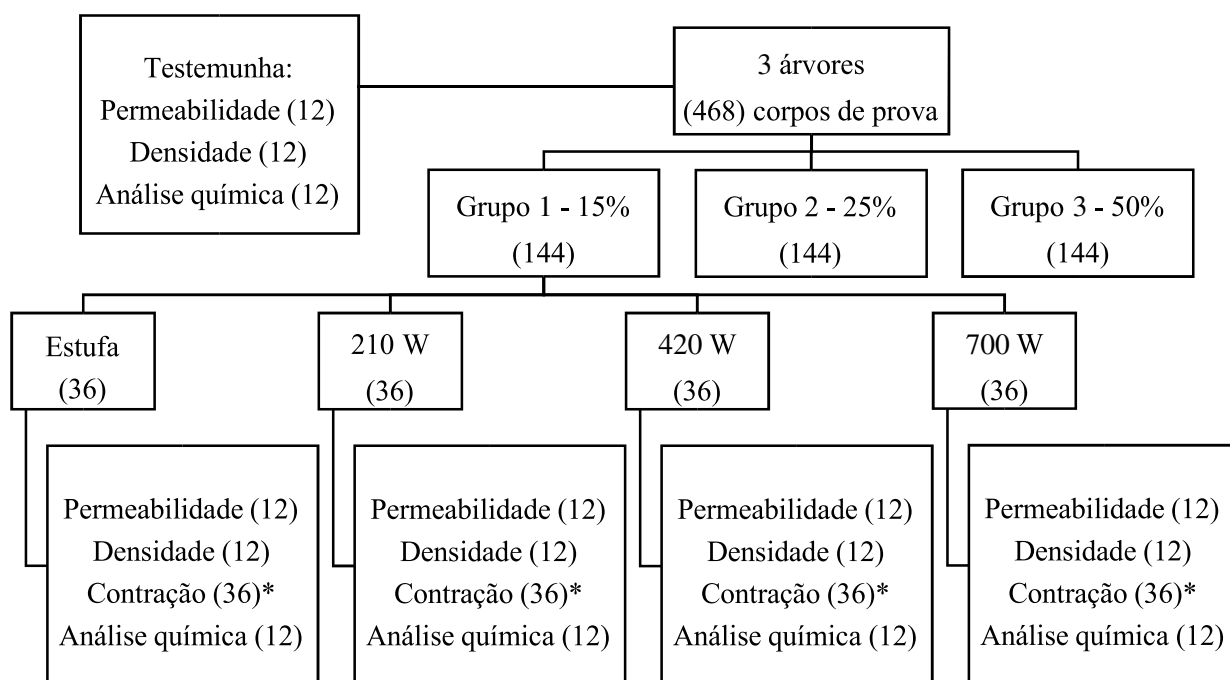


Figura 4. Valores entre parênteses representam a quantidade de corpos de prova utilizados nos diferentes métodos de determinação da umidade da madeira e posteriores análises de permeabilidade, densidade, contração e análise química. O (\*) indica que todos dos corpos de prova que passaram pelo processo de determinação da umidade pelos diferentes métodos também passaram pelo ensaio de contração e, depois, foram subdivididos em grupos para realização das análises de permeabilidade, densidade e análise química.

Posteriormente, foi determinado o teor de umidade inicial dos corpos de prova utilizando o método de secagem em estufa com circulação forçada de ar e controle de temperatura, para saber em qual teor de umidade o material se encontrava. Após o ensaio, os mesmos foram

acondicionados em uma sala climática a temperatura de  $20 \pm 2$  °C e umidade relativa de  $65 \pm 3\%$ . O controle periódico da perda de massa dos corpos de prova foi feito pesando-se amostras de controle, que foram selecionadas aleatoriamente, separando-os em 3 grupos de umidade média:

- Grupo 1: 15% de umidade relativa da madeira;
- Grupo 2: 25% de umidade relativa da madeira; Grupo
- 3: 50% de umidade relativa da madeira.

Após esta separação dos corpos de prova a serem utilizados no estudo, procedeu-se a determinação da umidade conforme o método de secagem em estufa com circulação forçada de ar e controle de temperatura e conforme o método de secam em micro-ondas.

#### 4.1.Determinação do teor de umidade da madeira

##### 4.1.1. Método da estufa

Os corpos de prova foram pesados em uma balança com precisão de 0,001g para a obtenção da massa inicial. Após a determinação da massa inicial, foram colocados em estufa com circulação forçada de ar e controle de temperatura, a  $103 \pm 2$  °C. Durante a secagem, a massa do corpo de prova foi medida a cada 2 horas até que a variação entre duas medidas consecutivas fosse menor ou igual a 0,5% da última massa medida (ABNT, 1997), sendo essa massa considerada a massa seca. Foram utilizados os 3 grupos de corpos de prova com diferentes umidades iniciais (grupos 1, 2 e 3), com 36 corpos de prova para cada grupo. O teor de umidade foi calculado conforme Equação 3.

$$TU = \frac{mi - ms}{ms} \times 100 \quad (3)$$

Onde,

TU: teor de umidade, em %;

mi: massa inicial da amostra, em g;

ms: massa da amostra seca, em g.

##### 4.1.2. Método de micro-ondas

Foi utilizado um forno doméstico de micro-ondas da marca Panasonic, modelo NNST254W, com dimensões externas de 461 x 367 x 287 mm, capacidade interna de 21 L,

frequência de 2,45 GHz e potência útil de 700 W. Foram aplicadas 3 potências de trabalho, sendo representadas por 30%, 60% e 100% da potência útil do aparelho de micro-ondas. Dessa forma, as amostras foram submetidas às potências de 210, 420 e 700 W.

Para o método de micro-ondas foram utilizados os mesmos 3 grupos de corpos de prova com diferentes umidades iniciais (grupos 1, 2 e 3), variando a potência (210, 420 e 700 W), sendo utilizados 36 corpos de prova para cada combinação.

#### 4.1.2.1. Tempo de exposição às micro-ondas

Os corpos de prova foram colocados em micro-ondas e a cada 1,5 minuto o aparelho foi desligado para que o aquecimento fosse interrompido. Os corpos de prova passaram por ciclos de exposição às micro-ondas por 1,5 minutos, em cada potência, até que a variação entre duas medidas consecutivas fosse de cerca de 1% da última massa medida, obtendo-se a massa seca. Entre cada ciclo de exposição, os corpos de prova eram resfriados por cerca de 10 minutos em dessecadores para realizar as posteriores pesagens em balança de precisão.

#### 4.1.2.2. Teor de umidade

Os corpos de prova foram previamente pesados em balança com precisão de 0,001 g para obter a massa inicial. Três corpos de prova foram colocados por vez sobre o prato giratório do micro-ondas, de forma a se ter uma melhor distribuição de calor. O aparelho foi ligado e a secagem processada por 1,5 minutos conforme dito anteriormente. Durante cada intervalo, foram realizadas as medições da temperatura dos corpos de prova imediatamente após o desligamento do micro-ondas. Em seguida, os corpos de prova foram colocados para resfriar em dessecador e a massa foi obtida por posterior pesagem em balança de precisão.

O processo de secagem foi repetido até que as amostras alcançassem a massa constante e o teor de umidade foi calculado utilizando-se a equação proposta pelo método da estufa (Equação 3).

#### 4.1.2.3. Temperatura interna dos corpos de prova

Para acompanhar a temperatura interna dos corpos de prova, previamente ao aquecimento, foram feitos 3 orifícios de aproximadamente 1,2 mm de diâmetro, com auxílio de furadeira elétrica de mesa, em 1 corpo de prova de cada 3 colocados no micro-ondas para secagem, conforme procedimento descrito por Zielonka e Dolowy (1998), com algumas adaptações (Figura 5). No procedimento desses autores, foram feitos orifícios de 1 mm de diâmetro à uma distância de 10 mm uns dos outros. A profundidade dos orifícios foi de 1,5 cm e foram feitos na direção perpendicular à emissão das micro-ondas.

Quando o micro-ondas era desligado, a temperatura interna era instantaneamente medida utilizando 3 termopares tipo J inseridos nos orifícios, e conectados ao instrumento de leitura digital.

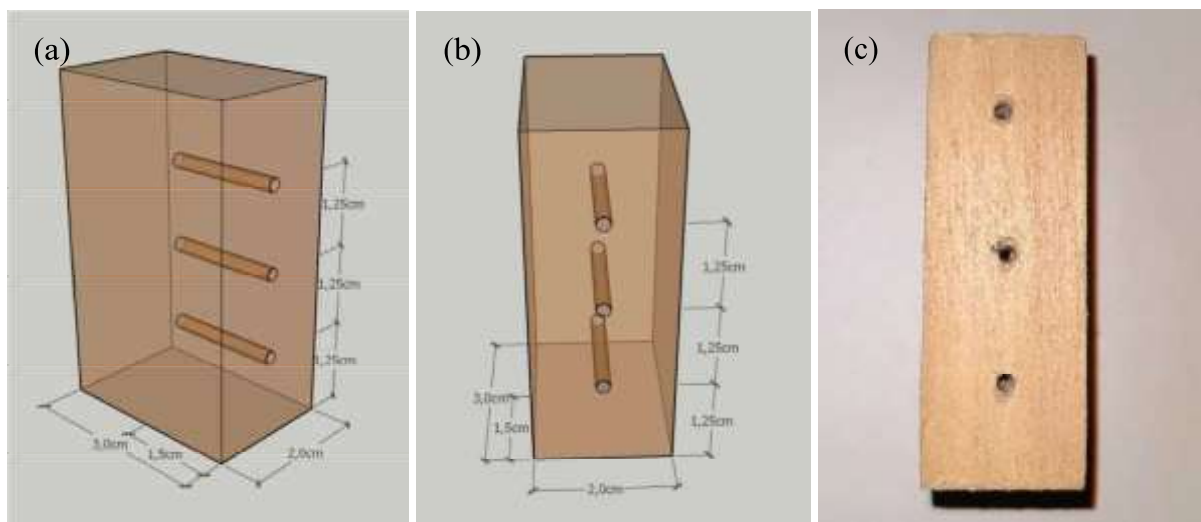


Figura 5. Representações esquemáticas (a e b) e vista lateral (c) do corpo de prova, mostrando os orifícios onde foram inseridos os termopares.

#### 4.2. Permeabilidade ao ar atmosférico

O ensaio de permeabilidade ao ar atmosférico no sentido longitudinal dos corpos de prova foi feito com o objetivo de se avaliar o efeito da secagem com micro-ondas na permeabilidade da madeira. Para a análise, os corpos de prova (com dimensões de 2 x 3 x 5 cm) foram torneados em um torno mecânico para adquirirem a forma cilíndrica. Os corpos de prova tiveram suas faces impermeabilizadas com parafina a fim de evitar a passagem de ar no sentido radial e comprometer as medições, de acordo com os procedimentos descritos por Baraúna (2010). A permeabilidade da madeira foi determinada pelo método do fluxômetro, obedecendo a Lei de Darcy, conforme metodologia descrita por Siau (1971) e adaptada por Teixeira (2015).

O equipamento para o ensaio da permeabilidade ao ar atmosférico foi dotado de quatro fluxômetros conectados em série nas seguintes escalas e sequência: 0,04 a 0,5 LPM (Litros Por Minuto); 0,5 a 2,5 LPM; 2,5 a 5,0 LPM e 5,0 a 25,0 LPM, ligados por mangueiras a uma bomba de vácuo da marca Primatec, modelo 131 2VC em uma das extremidades e, na outra, foram encaixadas as amostras. A pressão de vácuo inicial aplicada foi de -3 polHg, sendo que a leitura de vazão de ar foi obtida pelo fluxômetro de menor escala possível. É importante ressaltar que quando se fez a leitura em um fluxômetro, os demais permaneceram fechados. Após o acionamento da bomba, foram coletados os dados de vazão de fluxo pela amostra e da pressão de saída indicada pela bomba. Foram utilizados 12 corpos de prova de cada método de

determinação de umidade (estufa, micro-ondas a 210 W, micro-ondas a 420 W e microondas a 700 W), para cada grupo de umidade, além de mais 12 corpos de prova que foram utilizados como testemunhas (corpos de prova que não passaram pelos processos de determinação de umidade), para realizar a análise de permeabilidade ao ar atmosférico. Utilizou-se a Equação 4, seguindo a lei de Darcy, para calcular a permeabilidade ao ar atmosférico.

$$K = \frac{Q \cdot L \cdot P_i}{A \cdot \Delta P \cdot P_m} \quad (4)$$

Onde,

K: permeabilidade, em  $\text{cm}^3/\text{cm} \cdot \text{atm} \cdot \text{s}$ ;

Q: volume do fluxo de gás fluindo através da amostra, em  $\text{cm}^3/\text{s}$ ;

L: comprimento da amostra na direção do fluxo, em cm;

P<sub>i</sub>: pressão de entrada (pressão do ambiente), em atm;

A: área da seção transversal da amostra, em  $\text{cm}^2$ ;

$\Delta P$ : diferença de pressão, em atm;

P<sub>m</sub>: média da pressão no corpo de prova, em atm.

#### 4.3.Fendas internas

Após secagem em micro-ondas, corpos de prova foram serrados ao meio para observar a ocorrência de fendas internas. Foram obtidas imagens da seção transversal dos corpos de prova com auxílio de câmera digital de smartphone (marca Apple, modelo A 1688). Tais imagens foram processadas no software Adobe Photoshop 6.0, sendo mensuradas a área e a frequência das fendas internas. Para cada imagem, foi feita uma calibração por meio de escala em pedaço de papel de área conhecida ( $4,0 \text{ mm}^2$ ), que foi colocado sobre cada corpo de prova, conforme a Figura 6. Foram utilizados 12 corpos de prova de cada método de determinação de umidade (estufa, micro-ondas a 210 W, micro-ondas a 420 W e micro-ondas a 700 W) para cada grupo de umidade, para a observação da ocorrência de fendas. É importante enfatizar que estes mesmos corpos de prova foram reutilizados para a realização da análise química.



Figura 6. Seção transversal de um corpo de prova de eucalipto após processo de secagem em micro-ondas. As setas indicam o papel de área conhecida utilizado para calibração e uma fenda interna.

#### 4.4. Determinação da densidade básica

Foi determinada a densidade básica dos corpos de prova antes e após secagem em estufa com circulação forçada de ar e controle de temperatura e em micro-ondas. O procedimento foi realizado conforme a norma NBR 11941 (ABNT, 2003). Foram utilizados 12 corpos de prova de cada método (estufa, micro-ondas a 210 W, micro-ondas a 420 W e micro-ondas a 700 W), para cada grupo de umidade, além de mais 12 corpos de prova que foram utilizados como testemunha (corpos de prova que não passaram pelos processos de determinação de umidade), para realizar a determinação da densidade básica.

#### 4.5. Contração da madeira

O ensaio de contração baseou-se na NBR 7190 (ABNT, 1997). Foram feitas medições lineares nos corpos de prova nos sentidos radial, tangencial e axial, com paquímetro digital de precisão de 0,01 mm, antes de se obter a massa inicial dos corpos de prova e após a secagem dos mesmos, tanto em estufa quanto em micro-ondas. Foram utilizados 36 corpos de prova de cada método (estufa, micro-ondas a 210 W, micro-ondas a 420 W e micro-ondas a 700 W) para cada grupo de umidade, visto que todos os corpos de prova passaram por processo de medição durante a determinação da umidade pelos diferentes métodos.

#### 4.6. Análise química da madeira

As amostras foram moídas, peneiradas e classificadas, recolhendo-se a fração que passou pela peneira de malha 40 mesh e ficou retida na peneira com malha de 60 mesh. Os teores de extrativos da madeira foram determinados conforme a norma TAPPI 204 om-88 (TAPPI, 2001), utilizando-se o método de determinação de extrativos totais, apenas substituindo o etanol/benzeno pelo etanol/tolueno. Os teores de lignina insolúvel foram determinados pelo método Klason, modificado de acordo com o procedimento proposto por Gomide e Demuner (1986). O teor de lignina solúvel foi obtido de acordo com o procedimento proposto por Goldschimid (1971). O teor de lignina total representa a soma dos valores de lignina solúvel e insolúvel. O teor de holocelulose foi obtido por meio da análise somática dos componentes químicos, conforme a Equação 5. Foram utilizados 12 corpos de prova de cada método (estufa, micro-ondas a 210 W, micro-ondas a 420 W e micro-ondas a 700 W), para cada grupo de umidade, além de mais 12 corpos de prova da testemunha (corpos de prova sem passarem pelos processos de determinação de umidade), para realizar a análise química.

$$\text{HOLO} = 100 - (\text{Text} + \text{Tlig}) \quad (5)$$

Onde,

HOLO: teor de holocelulose (%);

Text: teor de extrativos totais (%);

Tlig: teor de lignina total (%).

#### 4.7. Análise estatística

O experimento foi instalado segundo um delineamento inteiramente casualizado. Os dados foram submetidos aos testes de Lilliefors, para testar normalidade, e de Cochran, para testar a homogeneidade das variâncias. Realizou-se a análise de variância (ANOVA), e quando observado efeito significativo dos tratamentos, as médias foram comparadas entre si por meio do teste Tukey, a 5% de probabilidade de erro, com o objetivo de identificar a igualdade dos métodos para determinar o teor de umidade médio para cada grupo de amostras, separadamente.

A análise do efeito da potência do micro-ondas na permeabilidade ao ar atmosférico, densidade, contração e composição química da madeira foi realizada em esquema fatorial. O esquema fatorial foi constituído por quatro métodos de secagem (estufa, micro-ondas a 210 W, micro-ondas a 420 W e micro-ondas a 700 W) e de três grupos de umidade média, com 4 repetições, totalizando 12 tratamentos e a testemunha.

A análise de correlação de Pearson (r) foi realizada para avaliar a permeabilidade ao ar atmosférico e o surgimento das fendas internas.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Determinação do teor de umidade da madeira

As amostras dos três grupos de umidade média (grupo 1 - 15% de umidade relativa da madeira, grupo 2 - 25% de umidade relativa da madeira e grupo 3 - 50% de umidade relativa da madeira) passaram por ciclos de secagem em estufa com circulação forçada de ar e controle de temperatura e em forno de micro-ondas até atingirem massa seca constante. Na Tabela 1 estão apresentados os teores de umidade médios da madeira de *Eucalyptus* sp. obtidos a partir do método de estufa e do método de micro-ondas, com seus respectivos tempos totais de aquecimento das amostras.

Tabela 1. Valores médios do teor de umidade das amostras de cada grupo de umidade relativa média da madeira e tempo total de aquecimento em função dos métodos de determinação.

Grupos	Métodos	Potência (W)	Teor de umidade (%)	Desvio padrão	Tempo total de aquecimento (min)
1	Estufa	-	15,30 c	1,08	360,0
	Micro-ondas	210	15,27 c	1,18	4,5
	Micro-ondas	420	15,94 b	1,14	4,5
	Micro-ondas	700	17,02 a	0,97	4,5
2	Estufa	-	25,12 b	0,91	480,0
	Micro-ondas	210	25,08 b	1,32	6,0
	Micro-ondas	420	25,82 a	1,12	6,0
	Micro-ondas	700	26,14 a	0,99	4,5
3	Estufa	-	51,00 a	0,94	720,0
	Micro-ondas	210	50,93 a	1,34	7,5
	Micro-ondas	420	50,88 a	1,26	6,0
	Micro-ondas	700	51,03 a	1,03	4,5

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). Em que: grupo 1 = 15% de umidade relativa da madeira; grupo 2 = 25% de umidade relativa da madeira e grupo 3 = 50% de umidade relativa da madeira).

De acordo com a Tabela 1 observa-se que o valor médio do teor de umidade das amostras do grupo 1 (15% de umidade relativa da madeira) obtido por meio de micro-ondas com potência de 210 W foi significativamente igual ao valor médio obtido por meio do método da estufa. Isso mostra que o uso dessa potência, com tempo de exposição em intervalos de 1,5 minutos, foi suficiente para a completa eliminação da umidade da madeira. O tempo total gasto para a obtenção da massa seca do grupo 1 utilizando forno de micro-ondas a 210 W foi de 4,5 minutos, enquanto que o tempo total para a estufa foi de 360 minutos, o que equivale a uma redução de 98,8% do tempo. As micro-ondas possibilitam um aquecimento instantâneo, pois o feixe de energia eletromagnética atuou rapidamente na madeira úmida. Além disso, possui mecanismo de aquecimento diferente da secagem convencional, que propiciam um processo de secagem acelerado, reduzindo o tempo para obtenção da massa seca e consequente determinação do teor de umidade. Em comparação com as amostras da estufa, He et al. (2017) encontraram que a taxa de secagem, que é a saída de água por unidade de tempo, da madeira de *Eucalyptus*

urophylla em micro-ondas aumentou para 171% e o tempo de secagem foi reduzido para 65%. Esta perda de umidade da madeira em função da ação de micro-ondas, depende da quantidade de energia aplicada por tempo, da umidade inicial da madeira e da espécie (TORGOVNIKOV; VINDEN, 2009). Por outro lado, os valores de umidade médios das amostras do grupo 1 obtidos por meio de micro-ondas com níveis de potências de 420 e 700 W foram estatisticamente diferentes em relação ao método da estufa, sendo o valor médio obtido para potência de 700 W (17,02%) maior que os demais. Isso mostra que o uso dessas potências em intervalos de 1,5 minutos não foi efetivo para a determinação do teor de umidade da madeira de eucalipto quando a mesma apresenta um baixo teor de umidade, no caso, cerca de 15% de umidade. Nas Figuras 7 e 8 estão representadas, respectivamente, as curvas de secagem e a perda de massa das amostras do grupo 1 submetidas ao aquecimento em estufa e em microondas a diferentes potências.

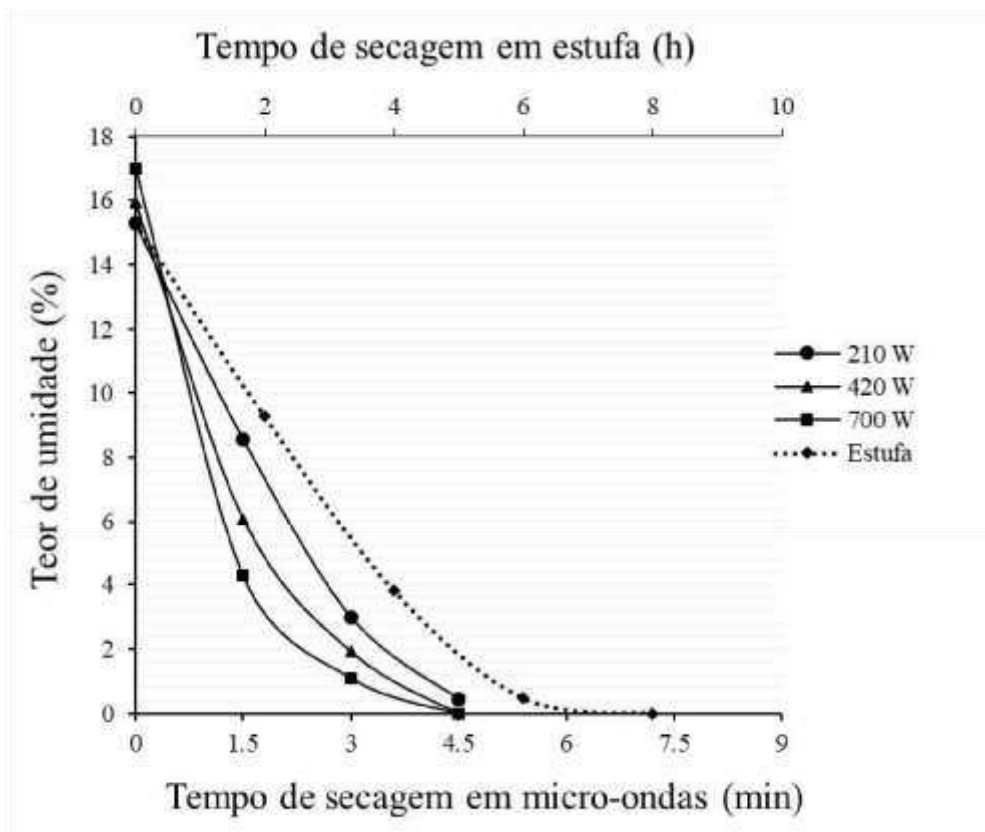


Figura 7. Curva de secagem as amostras de madeira do grupo 1 em função dos métodos de determinação do teor de umidade.

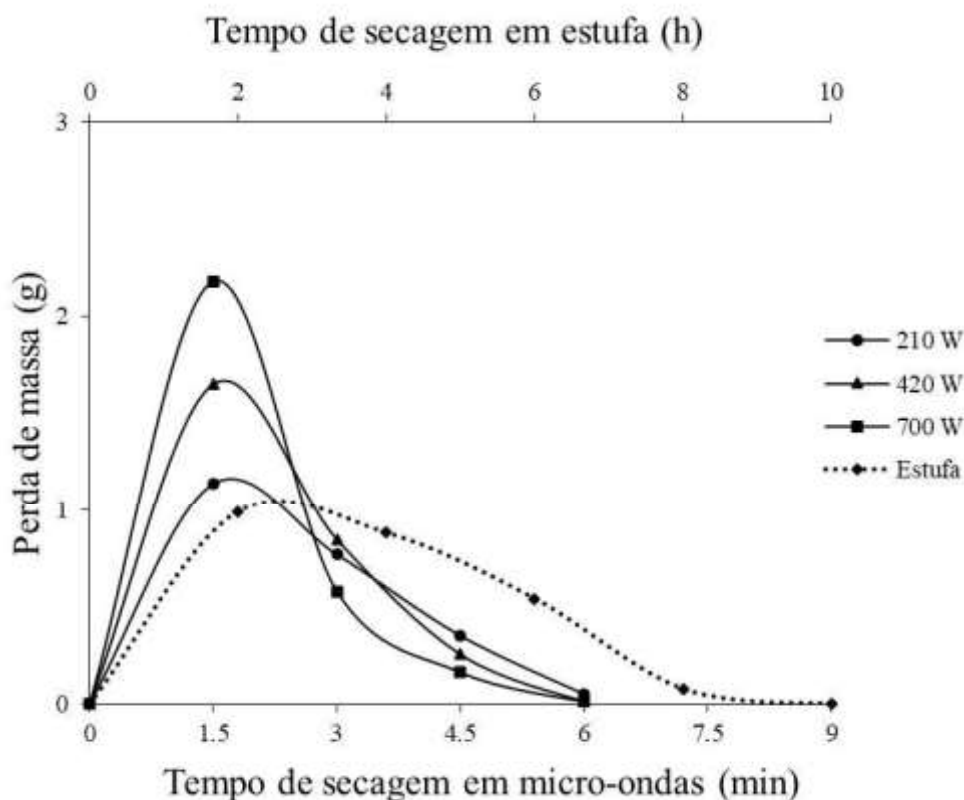


Figura 8. Perda de massa das amostras de madeira do grupo 1 em função do tempo de secagem de cada método de determinação do teor de umidade.

No aquecimento em micro-ondas, nota-se que para primeiro ciclo de secagem (1,5 min) há maiores taxas de secagem. Considerando as curvas de perda de massa em resposta à ação de micro-ondas, há maior interação entre as ondas eletromagnéticas e o material, devido às maiores quantidades de água no primeiro instante, pois esta molécula é polar e tem alta constante dielétrica, tendo a capacidade de interagir com as micro-ondas, convertendo a energia eletromagnética em calor. Portanto, quanto mais água no material, maior a quantidade de energia térmica gerada, maior evaporação e consequentemente maior perda de massa do material.

A maior perda de massa está associada às maiores potências, de modo que para a potência de 700 W a perda de massa foi muito maior no primeiro instante em relação às demais potências, ou seja, a água foi rapidamente removida no primeiro intervalo em que a amostra foi colocada para secar no aparelho de micro-ondas. Isso pode ser explicado pelo fato de maiores potências transportarem mais energia por unidade de tempo para o material. Resultado similar foi encontrado no estudo de He et al. (2017), no qual a taxa de secagem foi nitidamente maior para maior potência. Além disso, maior pressão de vapor é criada devido à rápida vaporização da água no interior da madeira, impulsionando mais água para fora da amostra. Quanto menor a quantidade de água nas amostras nos ciclos sucessores menor será a taxa de secagem. Quando

o conteúdo de água é muito baixo caso a madeira continue a ser aquecida por micro-ondas, pode ocorrer a sua pirólise.

A perda de massa acentuada relativa às amostras aquecidas a 700 W pode estar associada à degradação de algum componente da madeira ou remoção de extrativos em resposta à ação da temperatura e da alta pressão de vapor d'água criada na madeira, e não à perda somente de água. A deterioração pode ocorrer quando a madeira é submetida às combinações inadequadas de potência e tempo de exposição, havendo alta concentração de energia em uma região da madeira, elevando a temperatura rapidamente. Isso acarreta em uma superestimação do valor do teor de umidade, pois essa perda de massa é contabilizada como massa de água. A análise química das amostras (Tabela 7) evidenciou a redução do teor de extrativos nas amostras aquecidas a 700 W. Entretanto, a análise química não mostrou redução do teor de extrativos para a potência de 420 W. Provavelmente, depois do primeiro ciclo de secagem, a madeira já havia perdido quase todo o seu conteúdo de água, então cada unidade de massa de madeira pode ter absorvido mais energia de micro-ondas, e expô-la a mais 1,5 minutos de secagem pode ter causado degradação local da amostra. Para esses casos, sugere-se que o tempo de exposição seja reduzido, pois a alta potência remove a água rapidamente. Du, Wang e Cai (2005), em experimento com painéis de pinheiro, encontraram que aumentando a potência de entrada do micro-ondas resulta em alta temperatura, elevada taxa de secagem e menor tempo de secagem.

Com o prosseguimento dos ciclos de secagem, as amostras secas a 420 e 700 W apresentaram conteúdo de água baixo em relação às amostras submetidas a potência de 210 W. A partir do primeiro ciclo, as amostras aquecidas às menores potências apresentaram maiores perdas de massa pois ainda havia conteúdo de água para ser removido. A perda de umidade ocorreu de forma mais gradativa e uniforme, demorando mais tempo para secar em relação às demais potências. Observa-se que o comportamento da curva de secagem e da perda de massa para a potência de 210 W foi relativamente semelhante em relação à estufa, de tal forma que as amostras perderam massa de maneira mais uniforme. No entanto, deve-se considerar que a secagem em estufa demora horas enquanto que em micro-ondas necessita de apenas alguns minutos.

Com relação ao grupo 2 (25% de umidade relativa da madeira), o valor médio do teor de umidade por meio de micro-ondas com potência de 210 W foi estatisticamente igual ao valor médio obtido por meio do método da estufa (Tabela 1). O tempo total gasto para a obtenção da massa seca utilizando forno de micro-ondas com potência de 210 W foi de 6,0 minutos e o tempo total para a estufa foi de 480 minutos, havendo uma redução de 98,8% no tempo de

determinação da umidade da amostra. Portanto, a secagem de amostras em forno de micro-ondas com potência de 210 W em intervalos regulares de 1,5 minutos pode ser realizada para obter a massa seca da madeira de eucalipto e determinar o seu teor de umidade de forma rápida, efetiva e precisa.

As curvas de secagem e a perda de massa das amostras do grupo 2 submetidas à secagem em estufa e em micro-ondas com diferentes potências estão representadas nas Figuras 9 e 10, respectivamente.

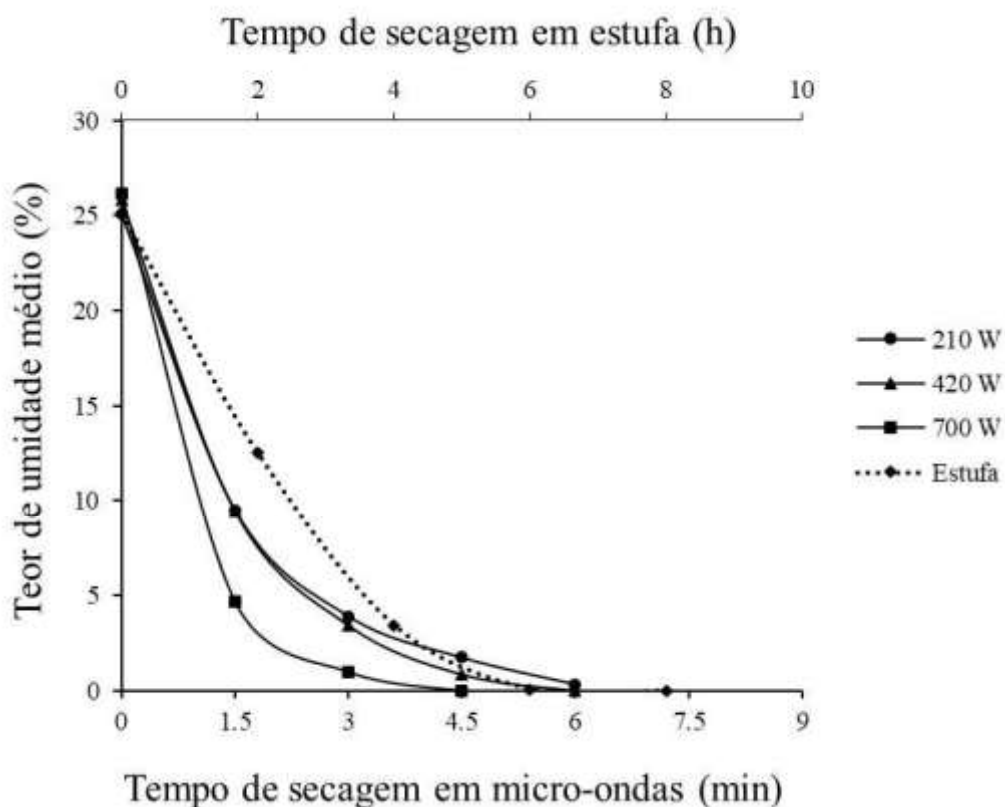


Figura 9. Curva de secagem das amostras de madeira do grupo 2 em função dos métodos de determinação do teor de umidade.

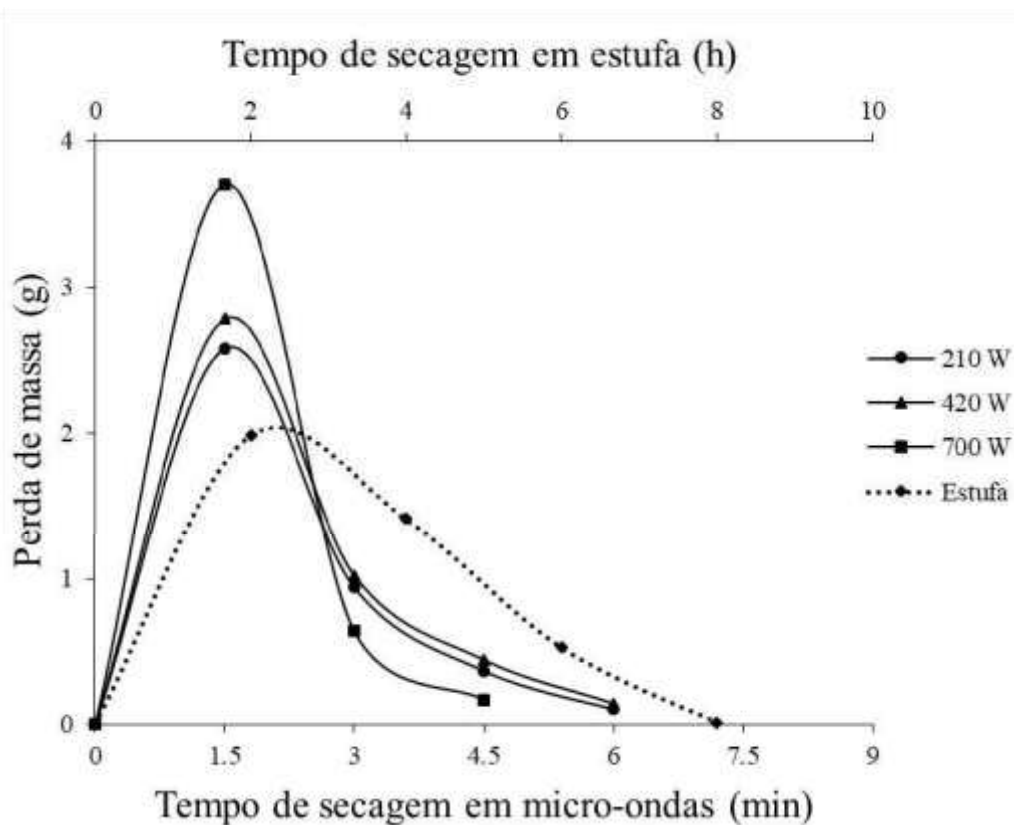


Figura 10. Perda de massa das amostras de madeira do grupo 2 em função do tempo de secagem de cada método de determinação do teor de umidade.

Observa-se nas figuras as tendências de maiores taxas de secagem e perdas de massa para maiores poderes de radiação de micro-ondas e para maiores conteúdos de água, no primeiro ciclo de secagem (1,5 minutos). À medida que o conteúdo de água vai diminuindo, a taxa de secagem diminui. A ação das micro-ondas faz com que a madeira perca massa de forma mais brusca em relação à estufa. Isso ocorre devido a capacidade das micro-ondas interagirem com as moléculas polares presentes na madeira e pela criação de pressão de vapor no interior das amostras, impulsionando a água para fora do material de forma rápida.

No entanto, a maior perda de massa das amostras de madeira que passaram por processo de secagem em micro-ondas com potência de 420 e 700 W pode estar associada à perda de componentes químicos da madeira, como extrativos, devido à alta pressão de vapor. Também pode estar associada à termodegradação da madeira, o que pode superestimar o cálculo do teor de umidade, conforme citado anteriormente.

Observou-se que para a potência de 700 W, houve uma maior perda de massa das amostras inicialmente, de modo que com o avanço dos ciclos de secagem, as amostras aquecidas à 210 e 420 W apresentaram maiores perdas de massa porque ainda havia água para ser removida. As curvas de secagem e de perda de massa para essas potências tiveram comportamento semelhantes, mas é importante ressaltar que o uso das potências de 420 e 700 W não é

recomendado para a determinação do teor de umidade da madeira, pois o valor de teores de umidade obtidos foram estatisticamente diferentes em relação ao método gravimétrico.

Para o terceiro grupo (50% de umidade relativa da madeira), os valores médios de teor de umidade obtidos tanto pelo método da estufa quanto do micro-ondas foram estatisticamente iguais (Tabela 1). O uso de forno micro-ondas com potências de 210, 420 e 700 W, com tempo de exposição em intervalos de 1,5 minutos, para obter a massa seca das amostras e proceder o cálculo do teor de umidade da madeira de eucalipto com teor de umidade acima do ponto de saturação das fibras foi eficiente. O principal fator a ser considerado é que o uso de micro-ondas propicia a obtenção do teor de umidade na ordem de minutos, com redução de 99% no tempo de ensaio. Observou-se uma redução do tempo de secagem com o aumento do nível de potência do micro-ondas, mostrando a grande influência do poder de radiação do micro-ondas na taxa de secagem, sendo necessários 7,5 minutos, 6,0 minutos e 4,5 minutos para as potências de 210, 420 e 700 W respectivamente. Em contrapartida, o tempo gasto para secagem da madeira em estufa foi de cerca de 720 minutos. As curvas de secagem e a perda de massa das amostras do grupo 3 para as diferentes potências e para a secagem em estufa estão mostradas na Figura 11 e 12, respectivamente.

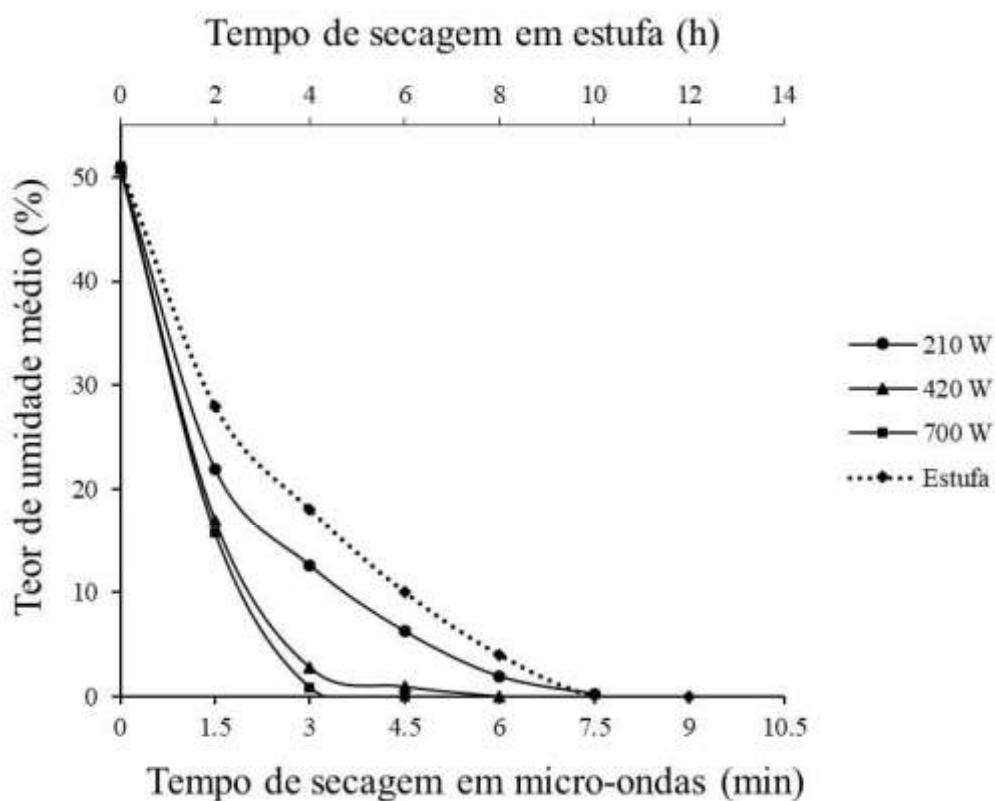


Figura 11. Curva de secagem das amostras de madeira do grupo 3 em função dos métodos de determinação do teor de umidade.

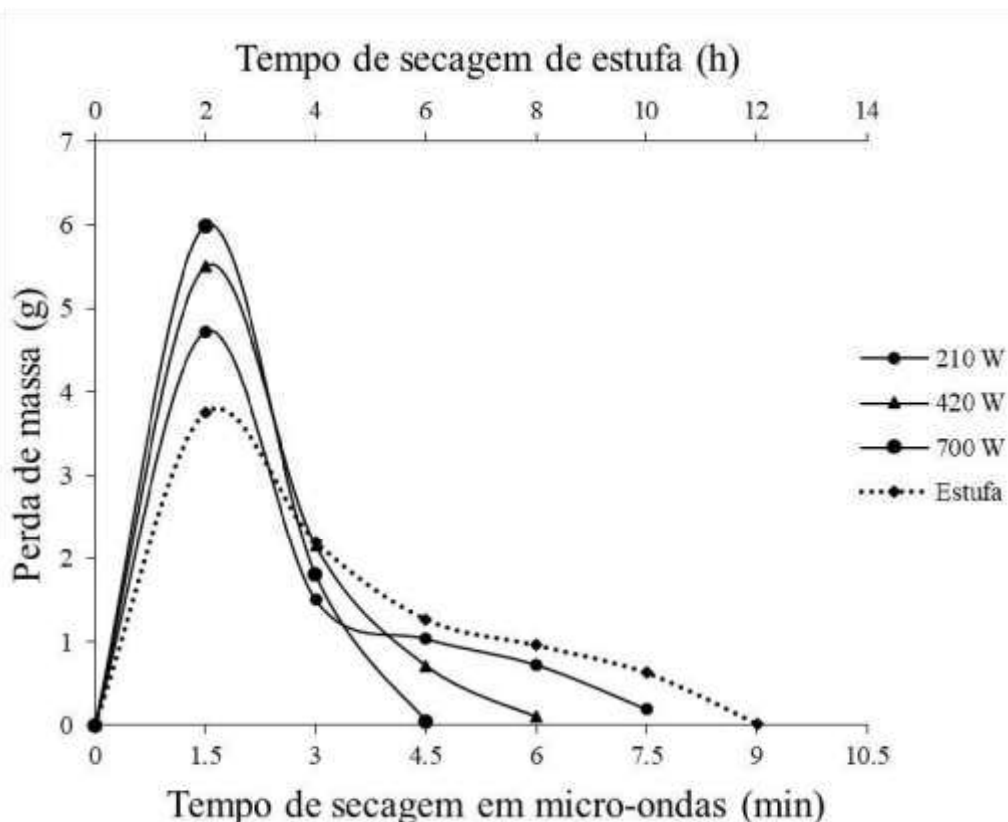


Figura 12. Perda de massa das amostras de madeira do grupo 3 em função do tempo de secagem de cada método de determinação do teor de umidade.

As maiores taxas de secagem no início do ensaio estão relacionadas ao alto teor de água.

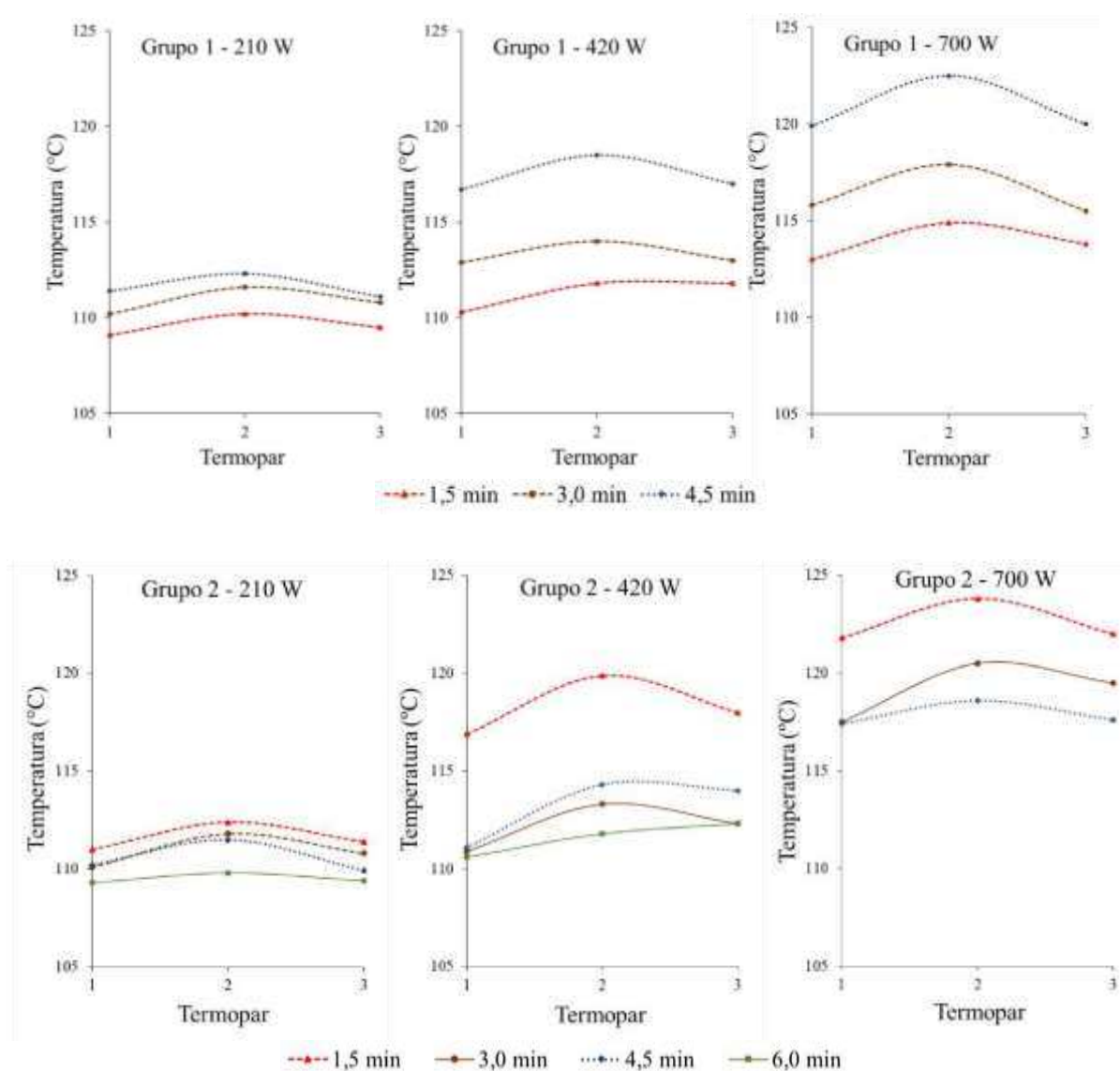
A partir do segundo ciclo de secagem, há um menor conteúdo de água na madeira. Quanto menor o conteúdo de água nos ciclos de secagem posteriores, menor é a taxa de secagem até todo o conteúdo de água ser removido.

Para aquecimento em micro-ondas, as maiores perdas de massa ocorreram para as maiores potências, sendo a perda de umidade em resposta à potência de 210 W mais gradual e uniforme a partir do segundo ciclo de secagem. Além disso, o comportamento da curva de 210 W foi relativamente semelhante às curvas do método estufa, mas deve-se levar em consideração a duração de cada método.

Embora na potência de 210 W o tempo de secagem tenha sido maior em relação às outras potências, na potência de 700 W, principalmente, pode ocorrer o superaquecimento. Dessa forma, para secar amostras usando micro-ondas, de forma mais rápida que a estufa e evitar a degradação, recomenda-se o nível de potência de 210 W por intervalos de 1,5 minutos até que a perda de peso entre as pesagens seja inferior a 1%.

## 5.2. Temperatura interna dos corpos de prova

Na Figura 13 estão representadas as distribuições da temperatura para cada grupo de unidade de amostras submetidas às diferentes potências de micro-ondas. Os pontos 1, 2 e 3 referem-se aos pontos exemplificados na Figura 5 a uma profundidade de 1,5 cm do corpo de prova.



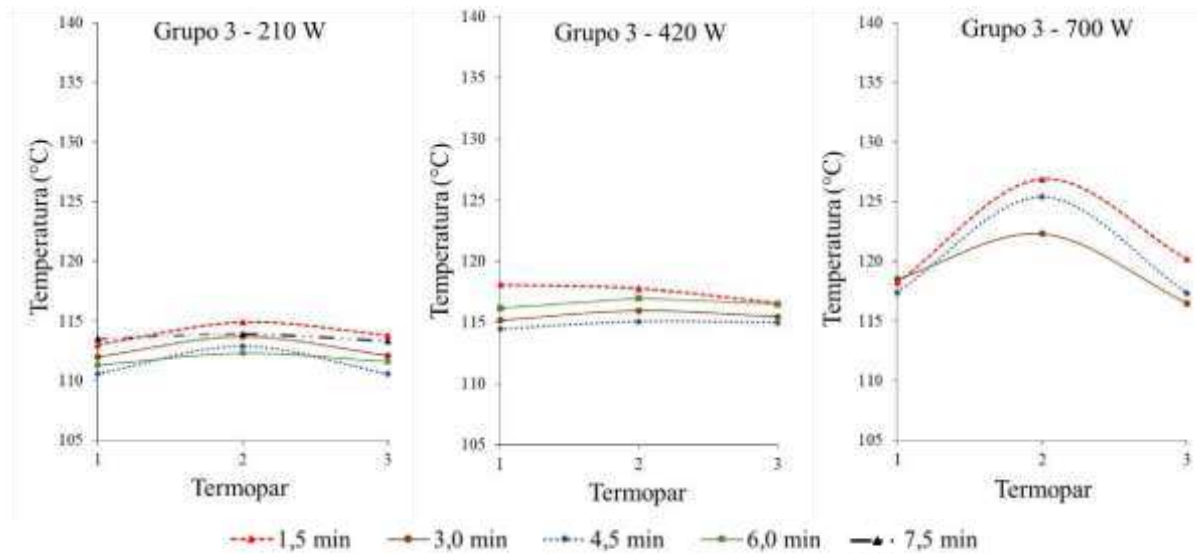


Figura 13. Distribuição da temperatura em função de três posições nas amostras expostas às diferentes potências de micro-ondas. Os números 1, 2 e 3 no eixo x referem-se às posições dos termopares, sendo 2 a posição central.

Pode-se observar que para o primeiro grupo de amostras, as temperaturas decorrentes ao aquecimento nas potências de 420 e 700 W foram superiores em relação à potência de 210 W. Para as potências de 420 e 700 W, é possível observar que a temperatura foi aumentando muito com o decorrer da secagem, o que pode ter contribuído para degradação da madeira em resultando em valores de teores de umidade de baixa confiabilidade.

Para o grupo 2, nota-se que a temperatura no primeiro instante de aquecimento também foi superior para os níveis de potência de 420 e 700 W. Para o grupo 3, a distribuição da temperatura ao longo do corpo de prova e ao decorrer dos tempos de aquecimento foi mais homogênea para as potências de 210 e 420 W. A potência de 700 W apresentou temperatura mais elevada devido à combinação de maior energia eletromagnética e maior presença de água livre neste grupo. De modo geral, observou-se que as temperaturas são mais uniformes para menores potências e maiores conteúdos de umidade.

Observa-se que as temperaturas na posição central do corpo de prova foram maiores mostrando que as micro-ondas podem atuar diretamente no interior do substrato (Figura 14).

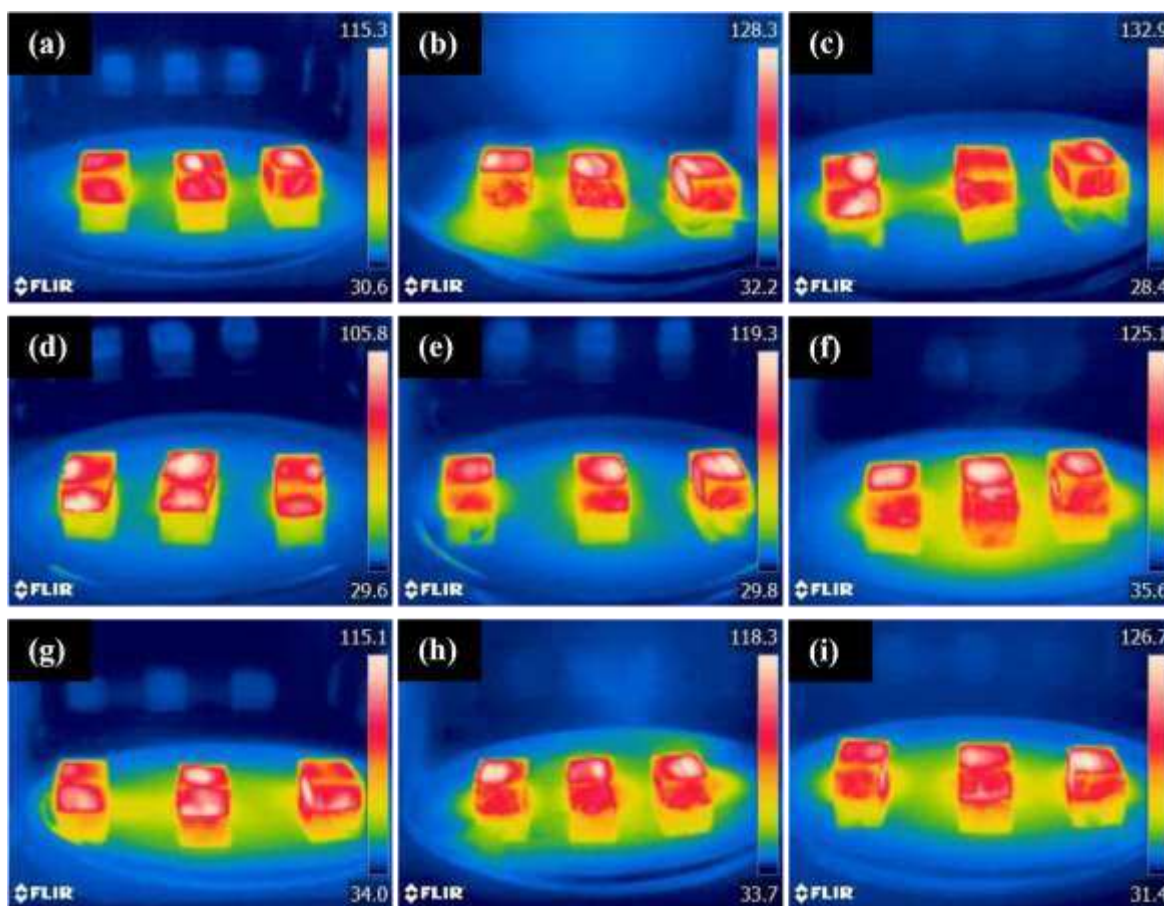


Figura 14. Imagens infravermelhas captadas após o primeiro ciclo de aquecimento dos corpos de prova em forno micro-ondas, em que: (a): grupo 1 - 210 W, (b): grupo 1 - 420 W, (c): grupo 1 - 700 W, (d): grupo 2 - 210 W, (e): grupo 2 - 420 W, (f): grupo 2 - 700 W, (g): grupo 3 - 210 W, (h): grupo 3 - 420 W, (i): grupo 3 - 700 W.

Estudos mostram que a zona central de peças de madeira tratadas com micro-ondas apresenta maiores temperaturas em relação às regiões das extremidades (TORGOVNIKOV; VINDEN, 2014; VINDEN; TORGOVNIKOV; HANN, 2011), o que corrobora com os resultados encontrados. Zielonka e Dolowy (1998) encontraram que em amostras de spruce submetidas à ação de micro-ondas, o pico de temperatura ocorre milímetros abaixo da superfície da peça de madeira exposta às micro-ondas. A energia penetra profundamente na madeira úmida, tendo o risco de aumento repentino da temperatura.

Quando a temperatura atinge certo nível, a diminuição do teor de umidade pode realçar o aumento de temperatura, conforme pode ser observado nos gráficos da distribuição de temperatura do grupo 3, onde na fase final de secagem ocorreu um aumento da temperatura (Figura 13). De acordo com Du, Wang e Cai (2005) há um período da secagem por microondas no qual a temperatura de secagem atinge um platô e a evaporação vai reduzindo. Quando evaporação da umidade diminui muito, a temperatura pode aumentar rapidamente. A temperatura das amostras atinge o ponto de ebulição da água rapidamente quando é exposta à

energia de micro-ondas, devido à eficiente transferência de energia das microondas. Assim, a água livre é expelida a uma taxa constante, na qual a temperatura é relativamente estável, pois o calor latente de vaporização da água mantém a temperatura no ponto de ebulição. Depois, ocorre um período em que a taxa de perda de umidade diminui à medida que a água de adesão é removida. Em processos de secagem convencional, esse período é o mais demorado. Cerca de dois terços do tempo gasto para secagem é devido a remoção dessa umidade (SCHIFFMANN, 1987).

### 5.3. Permeabilidade ao ar atmosférico

Os valores médios da permeabilidade ao ar atmosférico da madeira de *Eucalyptus* sp. após passar por processo de secagem em estufa com circulação forçada de ar e controle de temperatura e em forno de micro-ondas em diferentes potências estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores médios da permeabilidade (cm<sup>3</sup>/cm.amt.s) da madeira de *Eucalyptus* sp. em função dos tipos de aquecimento e dos grupos de amostras.

Métodos	Grupos de amostras		
	1 (15%)	2 (25%)	3 (50%)
Estufa	96,70 Aa <sup>ns</sup>	94,52 Ab <sup>ns</sup>	90,65 Ab <sup>ns</sup>
Micro-ondas 210 W	100,33 Aa <sup>ns</sup>	103,20 Ab <sup>ns</sup>	111,70 Ab <sup>ns</sup>
Micro-ondas 420 W	103,35 Ba <sup>ns</sup>	220,87 Aa	236,33 Aa
Micro-ondas 700 W	118,20 Ba <sup>ns</sup>	256,93 Aa	262,86 Aa
Testemunha	93,33		

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula ao longo de cada linha e minúscula ao longo de cada coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). Ns: indica diferenças não significativas entre as médias e a testemunha.

Observa-se que houve efeito significativo da interação entre o tipo de aquecimento e o grupo de amostras para a permeabilidade. A permeabilidade teve aumento significativo em relação a

testemunha devido a ação das potências de 420 e 700 W. Ocorreu um aumento significativo com o aumento da potência de 210 W para 420 e 700 W, para os grupos de amostras que tinham umidade média de aproximadamente 25% (grupo 2) e 50% (grupo 3) antes de passarem pelo processo de secagem. O aquecimento das amostras em potências de 420 e 700 W foram responsáveis por um aumento de 153,2 e 181,6% na permeabilidade. Para a menor potência e para a estufa não houve efeito significativo do teor de umidade nos valores médios de permeabilidade.

Esse aumento da permeabilidade com o aumento da potência está relacionado com o fato de que quando a energia eletromagnética é aplicada à madeira, rapidamente é gerado vapor por entre as células como consequência do aquecimento das moléculas de água. Sob alta pressão interna de vapor, estruturas celulares mais fracas como membranas das pontuações, paredes celulares e células dos raios podem se romper formando novos caminhos que facilitam a passagem de fluidos. Segundo He et al. (2017) e Torgovnikov e Vinden (2009), o aumento da potência de micro-ondas causa mais transferência de energia para a madeira, favorecendo a efetiva vaporização da água nela contida, resultando em uma elevada pressão interna e maior ruptura de estruturas da madeira.

Para uma mesma potência, madeiras com maiores conteúdos de água apresentam maior ruptura da estrutura da madeira devido à maior quantidade de água pra ser vaporizada e gerar ainda mais pressão de vapor. Como consequência, ocorre o aumento da permeabilidade. Se a potência de micro-ondas não tivesse sido efetiva para vaporizar a água, remover o conteúdo de água do material de forma rápida e romper a estrutura interna da madeira devido à pressão de vapor, provavelmente a permeabilidade teria sido menor para maiores conteúdos de umidade (HE et al., 2017). Então, de modo geral, maiores permeabilidades estão associadas a ação efetiva de maiores potências em madeiras mais úmidas. Ainda segundo He et al. (2017), o aumento da permeabilidade explica a elevação da taxa de secagem, reduzindo o tempo para secagem da madeira. Menores teores de umidade são responsáveis por pressão de vapor interna mais baixas, por isso a estrutura da madeira é menos danificada (OUERTANI et al., 2015).

É importante considerar que as espécies de folhosas geralmente desenvolvem tilose, obstruindo os vasos e diminuindo a permeabilidade da madeira. Isto é comum em algumas espécies de eucalipto. Foi verificada a presença de tiloses obstruindo os vasos da madeira em estudo, conforme pode ser observado na Figura 15. O gradiente de pressão promovido pelas micro-ondas pode romper as tiloses e aumentar a permeabilidade, reduzindo o tempo necessário para a secagem (DASHTI et al., 2012).



Figura 15. Corte transversal evidenciando a presença de tiloses obstruindo os vasos da madeira de *Eucalyptus* sp. utilizada no estudo. Aumento 10x.

Observou-se a formação de fendas internas nos corpos de prova devido à ação das micro-ondas, principalmente nos sentidos radial e longitudinal (Figura 16). O coeficiente de correlação de Pearson ( $\rho$ ) entre a permeabilidade e o surgimento dessas fendas internas foi de 0,9251, indicando forte relação entre os resultados, de tal forma que maiores permeabilidades estão associadas à uma maior presença de fendas internas.

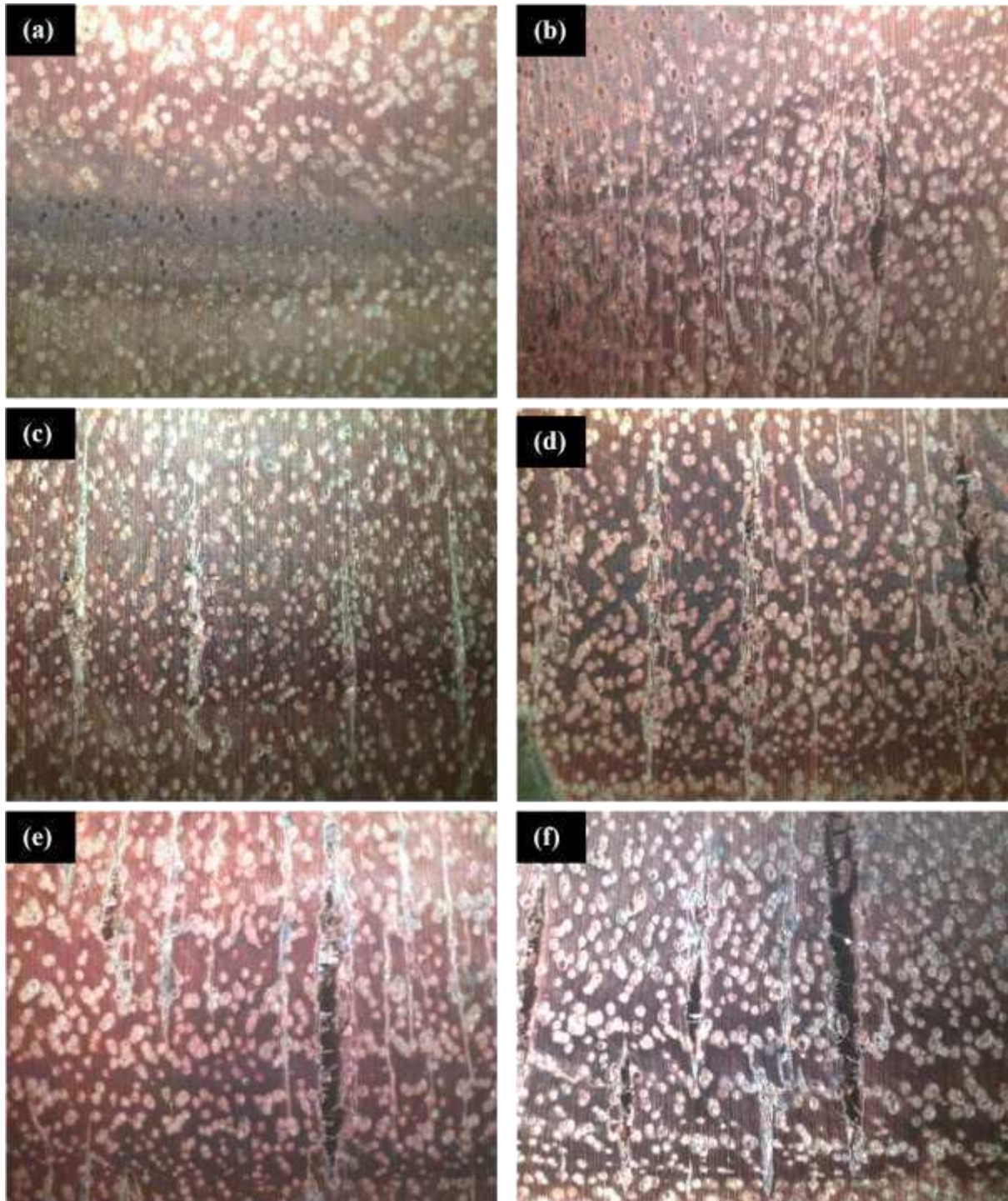


Figura 16. Madeira de *Eucalyptus* sp. após aquecimento, mostrando algumas fendas formadas. As quatro primeiras imagens correspondem ao grupo 2 (25%), em que (a): estufa, (b): 210 W, (c): 420 W, (d): 700 W, com aumento 1x. As duas últimas imagens correspondem ao grupo 3, em que (e): 420 W, (f): 700 W, com aumento 1,25x.

Na Figura 17 pode-se observar que com o aumento do nível de potência do microondas e do teor de umidade da madeira, maior foi a porcentagem de fendas internas no corpo de prova e, por consequência, maior foi a permeabilidade. O número, a distribuição e a dimensão das fendas vai depender da estrutura anatômica da madeira e da intensidade de aplicação das micro-ondas.

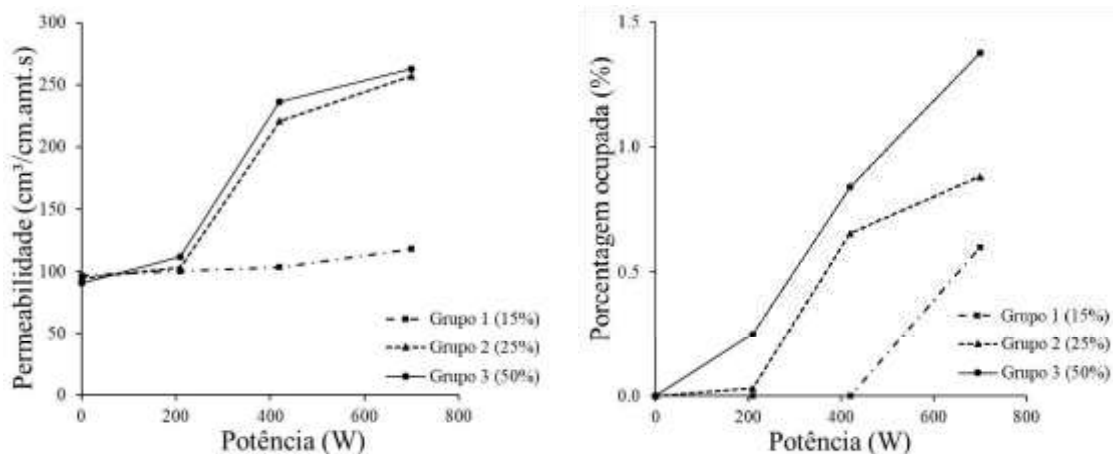


Figura 17. Permeabilidade da madeira e porcentagem da área do corpo de prova ocupada por fendas internas em função da potência de micro-ondas e dos grupos de amostras.

Torgovnikov e Vinden (2009) afirmam que as fendas internas formadas promovem alterações em diversas propriedades da madeira, tais como porosidade, permeabilidade, resistência, flexibilidade, contração e inchamento, condutividade térmica e acústica, e propriedades dielétricas, o que requer pesquisas mais avançadas.

#### 5.4. Densidade da madeira

Na Tabela 3 estão apresentados os valores médios da densidade da madeira de eucalipto. A densidade média da madeira de eucalipto utilizada no estudo foi  $0,506 \text{ g.cm}^{-3}$ .

Tabela 3. Valores médios de densidade ( $\text{g.cm}^{-3}$ ) da madeira de *Eucalyptus* sp. em função dos tipos de aquecimento e dos grupos de umidade.

Métodos	Grupos de amostras			Média geral
	1 (15%)	2 (25%)	3 (50%)	
Estufa	0,507 <sup>ns</sup>	0,510 <sup>ns</sup>	0,505 <sup>ns</sup>	0,507 a
Micro-ondas 210 W	0,509 <sup>ns</sup>	0,498 <sup>ns</sup>	0,506 <sup>ns</sup>	0,504 a
Micro-ondas 420 W	0,476	0,488	0,490	0,485 b
Micro-ondas 700 W	0,475	0,465	0,482	0,474 b
Testemunha	0,506			

Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). Ns: indica diferenças não significativas entre as médias e a testemunha.

A densidade é uma das principais propriedades da madeira, pois afeta outras propriedades da madeira. A análise de variância indicou que a densidade foi influenciada pelo aquecimento por micro-ondas, não havendo efeito da umidade.

O aquecimento em micro-ondas com potência de 420 e 700 W acarretou em uma redução de 4,2% e 6,3%, respectivamente, na densidade da madeira. Torgovnikov, Vinden e Balbony (2015) encontraram que a madeira de *Eucalyptus globulus* reduziu sua densidade de 0,697 g.cm<sup>-3</sup> para 0,637 g.cm<sup>-3</sup>, ou seja, uma redução de aproximadamente 8,6%, após o tratamento da madeira em um equipamento aplicador de micro-ondas. Brodie (2007) obteve uma diminuição de 9% na densidade da madeira de *Eucalyptus regnans* devido à formação de fissuras internas microscópicas em decorrência de tratamento com micro-ondas operando a 2,45 GHz por 6 minutos. Torgovnikov e Vinden (2006) também encontraram uma redução de 8% na densidade devido à formação de cavidades aleatórias nos sentidos longitudinal e radial da madeira.

Esta redução da densidade pode estar associada à formação das fissuras internas microscópicas e macroscópicas geradas pelas micro-ondas, devido à ruptura de estruturas da madeira. Quanto mais energia aplicada, menor a densidade da madeira. Segundo Torgovnikov e Vinden (2009), um grau de modificação em resposta à ação das micro-ondas depende do nível de energia de micro-ondas aplicado e está associado principalmente à ruptura das células do raio. O volume de tecido de raio é típico de cada espécie, variando de 5 a 35% do volume total da madeira, e a sua desintegração afeta diversas propriedades, incluindo a densidade. A redução da densidade também pode estar relacionada com a perda de extrativos visto que ocorreu redução do teor de extrativos em devido à ação do micro-ondas (Tabela 5).

### 5.5. Contração da madeira

Os valores médios das contrações das amostras madeira de *Eucalyptus* sp. após passarem por processo de secagem em micro-ondas e estufa estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Valores médios de contração volumétrica, radial e tangencial da madeira de *Eucalyptus* sp. em função do método de secagem e dos grupos de umidade.

Volumétrica			Radial			Tangencial		
1 (15%)	2 (25%)	3 (50%)	1 (15%)	2 (25%)	3 (50%)	1 (15%)	2 (25%)	3 (50%)

1	10,7 Ba	11,4 Ba	13,8 Aa	5,0 BCa	4,8 Ba	5,7 Aa	5,7 Ba	6,5 Ba	7,5 Aa
2	7,4 Cc	8,8 Bb	10,4 Ac	2,4 Cb	3,8 Bb	4,7 Ab	4,7 Bb	4,7 Bb	5,5 Ac
3	7,7 Bbc	8,6 Bb	11,9 Abc	2,3 Cc	3,9 Bb	5,3 Aab	4,5 Bb	4,5 Bb	6,5 Ab
4	8,6 Bb	9,4 Bb	12,0 Ab	2,8 Cbc	4,2 Bab	5,3 Aab	5,2 Bab	5,0 Bb	6,9 Ab

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula ao longo de cada linha e minúscula ao longo de cada coluna, para cada contração, não diferem entre pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). 1, 2, 3 e 4 correspondem aos métodos da estufa, micro-ondas a 210 W, micro-ondas a 420 W e micro-ondas a 700 W, respectivamente.

A análise de variância indicou que as contrações radial, tangencial e volumétrica foram influenciadas pelos métodos de secagem e pelas umidades iniciais dos corpos de prova, havendo interação significativa entre eles. Por outro lado, a contração longitudinal não sofreu influência dos métodos de aquecimento e das umidades iniciais dos corpos de prova.

De modo geral, os maiores valores de contrações foram encontrados para umidade de 50%, independentemente do método de secagem. O método de micro-ondas foi responsável por menores retrações quando comparado com a estufa.

Para contração volumétrica, observa-se que houve efeito significativo da ação de micro-ondas em relação à estufa, de tal modo que a madeira apresentou maior contração quando foi seca em estufa. Além disso, as amostras do grupo 3 apresentaram maiores contrações volumétrica em relação aos grupos 1 e 2 quando passaram por secagem tanto em estufa quanto em micro-ondas. No caso da contração radial, a madeira contraiu menos quando seca em micro-ondas, comportamento semelhante observado para a contração volumétrica. Observa-se que o efeito da umidade foi significativo, sendo as maiores contrações correspondentes ao grupo 3 de umidade.

Para contração tangencial, nota-se que as maiores contrações também estão associadas às amostras que foram secas em estufa. Além disso, a maior umidade é responsável por uma maior contração tangencial tanto em estufa quanto em micro-ondas, conforme foi observado para as contrações volumétrica e radial.

O comportamento de contração de amostras que passam por aquecimento e secagem em micro-ondas é diferente em relação à secagem convencional. Em estufa geralmente ocorre uma elevada retratibilidade, havendo maior redução das dimensões em relação às suas dimensões iniciais (GARCIA, 1995). No entanto, devido ao aquecimento volumétrico, o desenvolvimento de um gradiente interno de pressão força a água para fora do material, evitando o encolhimento durante a secagem.

Segundo Torgovnikov e Vinden (2009), amostras de madeira aquecidas por microondas apresentam menos alterações em seu formato. A influência das micro-ondas tem dupla ação.

Primeiro, a temperatura aumenta na madeira úmida, geralmente entre 110 e 158 °C e isso amolece a lignina, hemicelulose e celulose, promovendo a atenuação das tensões na madeira. Segundo, a pressão de vapor gerada dentro da madeira rompe regiões mais fracas, criando micro e macro espaços, que levam à melhoria da permeabilidade e redução de tensões internas (KUBLER, 1987). A formação dessas fendas podem aumentar o volume da madeira de certa forma. Torgovnikov, Vinden e Balbony (2015) também encontraram redução de contração em madeira de eucalipto tratada com micro-ondas.

### 5.6. Composição química

Na Tabela 5 estão apresentados os teores de extrativos totais da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da secagem por estufa e micro-ondas e dos grupos de umidade inicial dos corpos de prova. A análise de variância indicou que houve apenas efeito dos métodos de secagem no teor de extrativos totais da madeira, havendo uma redução significativa desse teor para as amostras de madeira que passaram por secagem em micro-ondas à 700 W.

Tabela 5. Valores médios dos teores de extrativos (%) da madeira de *Eucalyptus* sp. em função dos métodos de secagem e grupos de umidade.

Métodos	Grupos de amostras			Média geral
	1 (15%)	2 (25%)	3 (50%)	
Estufa	4,70 <sup>ns</sup>	4,18 <sup>ns</sup>	4,22 <sup>ns</sup>	4,37 a
Micro-ondas 210 W	4,01 <sup>ns</sup>	4,16 <sup>ns</sup>	4,78 <sup>ns</sup>	4,32 a
Micro-ondas 420 W	4,59 <sup>ns</sup>	4,77 <sup>ns</sup>	4,29 <sup>ns</sup>	4,55 a
Micro-ondas 700 W	3,10	3,14	3,98 <sup>ns</sup>	3,41 b
Testemunha	4,36			

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula ao longo de cada linha e minúscula ao longo de cada coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). Ns: indica diferenças não significativas entre as médias e a testemunha.

Pode-se observar que as médias dos teores de extrativos das amostras dos grupos 1 e 2 secas à 700 W foram significativamente diferentes das amostras que não passaram por nenhum processo de secagem.

O menor percentual de extrativos totais na madeira em decorrência da ação de microondas pode estar associado à remoção dos extrativos pela ação da elevada pressão interna de vapor causada nas células da madeira, pois as micro-ondas vaporizam rapidamente a umidade na profundidade do material. Segundo Hillis (1962), a maioria dos extrativos presentes na madeira são facilmente

solúveis em água. O vapor gerado é rapidamente liberado para a área circundante, não apenas varrendo voláteis, mas também criando canais no sólido que aumentam sua porosidade e permeabilidade. Isso, por sua vez, favorece a liberação de voláteis a baixas temperaturas e, conseqüentemente, sua reação com o vapor produzido (MINKOVA et al., 2001).

Além disso, essa redução no teor de extrativos pode ser explicada pela ação da temperatura. Temperaturas mais elevadas podem causar a volatilização de determinados extrativos. No estudo de Torgovnikov, Vinden e Balbony (2015) encontraram que a ação de micro-ondas na madeira de *Eucalyptus globulus* promoveu a ebulição da resina presente nessa madeira. Os extrativos podem ser removidos pela ação de água e temperatura (PIERRE et al., 2011; HAKKOW et al., 2005; ESTEVES; GRAÇA; PEREIRA, 2008).

Segundo Siau (1971), extrativos como gomas e resinas podem obstruir as pontuações das paredes celulares e podem se depositar nas tiloses. As micro-ondas podem hidrolisar e romper essas estruturas em função da temperatura e da pressão de vapor criada, afetando a quantidade de extrativos.

De acordo com a análise estatísticas, os teores de lignina e holocelulose das amostras não foram afetados pelos métodos de aquecimento e teores de umidade. Os valores médios de holocelulose e lignina total para as amostras de *Eucalyptus* sp. utilizadas no estudo foram de 69,99% e 25,65%, respectivamente.

## 6. CONCLUSÃO

A secagem de amostras de madeira de eucalipto a 210 W durante intervalos de 1,5 minutos até obtenção de massa constante foi efetiva para obter a massa seca e determinar o teor de umidade de forma tão precisa quanto o método gravimétrico da estufa.

O uso de potências de 420 e 700 W não foi efetivo para obter teores de umidade de madeiras com baixa umidade (umidade próxima ou abaixo do ponto de saturação das fibras), mas foram efetivas para determinar a massa seca e teor de umidade de amostras com maior conteúdo de água.

O tempo total para a obtenção da massa seca utilizando a potência de 210 W foi de 4,5 min, 6,0 minutos e 7,5 minutos para amostras com umidade de 15, 25 e 50%, respectivamente. O tempo total para obtenção da massa seca das amostras mais úmidas (grupo 3) com as potências de 420 W e 700 W foi de 6,0 e 4,5 min, respectivamente.

A utilização de micro-ondas reduz significativamente o tempo de secagem, mostrando ser muito rápido e efetivo.

A temperatura na zona central dos corpos de prova foi relativamente superior às temperaturas das áreas mais superficiais. De modo geral, no primeiro ciclo de secagem (1,5 min), as temperaturas foram superiores devido ao maior conteúdo de água.

O aquecimento por micro-ondas aumenta a permeabilidade longitudinal da madeira de forma significativa. A permeabilidade aumentou significativamente com o aumento da potência em amostras com maiores conteúdos de água, que ocasionaram o aumento da pressão interna de forma rápida e o surgimento de fendas internas.

O aquecimento por micro-ondas causa a formação de fendas internas nos corpos de prova devido. Com o aumento do nível de potência do micro-ondas e do teor de umidade da madeira, maior é a porcentagem de fendas internas no corpo de prova e conseqüentemente maior é a permeabilidade.

O aquecimento por micro-ondas reduz significativamente a densidade da madeira, especialmente para maiores potências.

O aquecimento por estufa é responsável por uma maior contração da madeira em relação ao aquecimento em micro-ondas.

O uso de micro-ondas não afetou o teor de lignina e holocelulose da madeira, mas reduziu o teor de extrativos totais quando a potência de 700 W foi aplicada.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização do forno de micro-ondas doméstico para a obtenção da massa seca de amostras de madeira e conseqüente determinação do teor de umidade é promissora. Recomenda-se a realização de estudos que analisem o efeito do micro-ondas nas características e propriedades de madeiras de diferentes espécies. Além disso, é importante avaliar diferentes potências e tempos de exposição às micro-ondas, sempre comparando os resultados obtidos com o método convencional da estufa comumente utilizado, conferindo maior confiabilidade ao uso do forno de micro-ondas doméstico para esta finalidade.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFZAL, M. T.; THOMSON, F. C. Moisture equalization of kiln-wet lumber using microwave heating. In: ASAE/CSAE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 2004, St. Joseph. Anais... St. Joseph: ASABE, 2004. p. 1-12.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E 1358-97: Standard test method for determination of moisture content of particulate wood fuels using a microwave oven. West Conshohocken, 2006. 2 p.

ANTTI, L.; HANSSON, L. Equalization of moisture in pre-dried pinewood using microwave power. *Pro Ligno*, v. 6, n. 2, p. 53-59, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT NBR 7190: Projetos de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107 p.

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

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

AWOYEMI, L. Effects of microwave modification on the kiln drying time of *Eucalyptus obliqua* wood. *Journal of Indian Academy of Wood Science*, v. 1, p. 83-88, 2004.

BARAÚNA, E. E. P. Permeabilidade das madeiras de Amapá (*Brosimum parinarioides* Ducke) e Faveira (*Parkia gigantocarpa* Ducke). 2010. 69 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal e Tecnologia da Madeira) Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

BATISTA, W. R.; SANTOS, J. E. G.; SEVERO, E. T. D.; KLAR, A. E. Calibração de um equipamento TDR (reflectometria por domínio do tempo) para a determinação da umidade da madeira de *Grevillea robusta* (Cunn.). *Revista Energia na Agricultura*, v. 26, n. 2, p. 129-145, 2011.

BHATTACHARYA, M.; SRIVASTAV, P. P.; MISHRA, H. N. Thin-layer modeling of convective and microwave-convective drying of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*). *Journal of Food Science and Technology*, v. 52, n. 4, p. 2013-2022, 2013.

BOTHA, G. E.; OLIVEIRA, J. C.; AHRNÉ, L. Microwave assisted air drying of osmotically treated pineapple with variable power programmes. *Journal of Food Engineering*, v. 108, n. 2, p. 304-311, 2012.

BRIETZ, C. S.; NOGUEIRA, V. Inter-relação entre as propriedades e a microestrutura das madeiras Princípios da ciência dos materiais aplicados aos materiais de construção civil. São Paulo: USP, 2006. 25 p. Disponível em:  
<[http://netulio.weebly.com/uploads/9/0/6/6/9066781/madeira\\_-\\_ipt\\_-\\_microestrutura.pdf](http://netulio.weebly.com/uploads/9/0/6/6/9066781/madeira_-_ipt_-_microestrutura.pdf)>. Acesso em: 25 maio 2018.

BRODIE, G. Microwave treatment accelerates solar timber drying. *ASABE*, v. 50, n. 2, p. 389-396, 2007.

CALONEGO, F. W.; BATISTA, W. R.; SEVERO, E. T. D.; SANTOS, J. E. G. dos; RIBAS, C. Avaliação do teor de umidade da madeira de *Eucalyptus grandis* por medidores elétricos resistivos. *Revista do Instituto Florestal*, v. 18, n. único, p. 71-78, 2006.

CHEN, J.; PITCHAI, K.; BIRLA, S.; NEGAHBAN, M.; JONES, D.; SUBBIAH, J. Heat and mass transport during microwave heating of mashed potato in domestic oven model development, validation, and sensitivity analysis. *Journal of Food Science*, v. 79, n. 10, p. 1991-2004, 2014.

COLLIN, R. E. *Foundations for microwave engineering*. 2. ed. New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2001. 944 p.

CRC WOOD INNOVATIONS. *Modified wood products - Torgvin e Vintorg*. Melbourne: Swinburne University of Technology, 2005. Disponível em: <<http://www.crcwood.unimelb.edu.au/science/torgvin.html>>. Acesso em: 20 jan. 2018.

DASHTI, H.; TARMIAN, A.; FAEZIPOUR, M.; SHAHYERDI, M. Effect of microwave radiation and pre-steaming treatments on the conventional drying characteristics of fir wood (*Abies alba* L.). *Lignocellulose*, v. 1, n. 3, p. 166-173, 2012.

DECAREAU, R. V.; PETERSON, R. A. *Microwave processing and engineering*. Chichester: Ellis Horwood Ltd., 1986. 224 p.

DE LA HOZ, A.; DIAZ-ORTIZ, A.; MORENO, A. Microwaves in organic synthesis. Thermal and non-thermal microwave effects. *Chemical Society Reviews*, v. 34, n. 2, p. 164178, 2005.

DONATO, D. B.; CASTRO, R. V. O.; CARNEIRO, A. C. I.; CARVALHO, A. M. L. M.; PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; BARBOSA, C. J. Determinação da umidade da madeira em tora por diferentes métodos. *Pesquisa Florestal Brasileira*, Colombo, v. 34, n. 80, p. 449-453, 2014.

DONATO, D. B. Métodos de amostragem e de determinação do teor de umidade da madeira em tora. 2013. 59 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

DU, G.; WANG, S.; CAI, Z. Microwave drying of wood strands. *Drying Technology*, v. 23, p.1-16, 2005.

ESTEVES, B.; GRAÇA, J.; PEREIRA, H. Extractive compositions and summative chemical analysis of thermally treated eucalypt wood. *Holzforschung*, v. 62, p. 344-351, 2008.

ESTURK, O. Intermittent and continuous microwave-convective air-drying characteristics of sage (*Salvia officinalis*) leaves. *Food and Bioprocess Technology*, v. 5, p. 1664-1673, 2012.

FERNÁNDEZ, Y.; ARENILLA, A.; MENÉNDEZ, J. A. Microwave heating applied to pyrolysis. In: GRUNDAS, S. (Ed.). *Advances in induction and microwave heating of mineral and organic materials*. Rijeka: Intech, 2011. p. 723-752.

GALINA, I. C. M. Variação da resistência elétrica em madeiras visando o grupamento de espécies. 1997. 93 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeiras) – Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. *Secagem racional da madeira*. São Paulo: Nobel, 1985. 112 p.

- GARCIA, J. N. Técnicas de desdobro de eucalipto. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA, 1995, São Paulo. Anais... São Paulo: IPEF, 1995. p. 59-67.
- GLASS, S. V.; ZELINKA, S. L. Moisture relations and physical properties of wood. In: ROSS, R. J. (Ed.). Wood Handbook: wood as an engineering material. Madison: USDA, Forest Products Laboratory, 2010. p. 4.1-4.19.
- GOLDSCHIMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K. V.; LUDWING, C. H. (Org.). Lignins. New York: Wiley Interscience, 1971, p. 241-266.
- GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B. J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. O Papel, v. 47, n. 8, p. 36-38, 1986.
- GOVETT, R.; MACE, T.; BOWE, S. A practical guide for the determination of moisture content of woody biomass. Madison: University of Wisconsin, 2010. 20 p. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Arvind\\_Singh56/post/How\\_to\\_calculate\\_moisture\\_in\\_biomass/attachment/59d6542279197b80779abcc1/AS:520619624484864@1501136799635/download/BiomassMoistureContent.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Arvind_Singh56/post/How_to_calculate_moisture_in_biomass/attachment/59d6542279197b80779abcc1/AS:520619624484864@1501136799635/download/BiomassMoistureContent.pdf)>. Acesso em: 12 abr. 2018.
- GUANBEN, D.; SIQUN, W.; ZHIYONG, C. Microwave drying of wood strands. Drying Technology, v. 23, n. 12, p. 1-46, 2005.
- HAKKOW, M.; PÉTRISSANS, M.; ZOULALIAN, A.; GÉRARDIN, P. Investigation of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis. Polymer Degradation and Stability, v. 89, p. 1-5, 2005.
- HANSSON, L.; ANTTI, L. Design and performance of an industrial microwave drier for on-line drying of wood components. In: IUFRO INTERNATIONAL WOOD DRYING CONFERENCE, 8, 2003, Brasov. Anais... Brasov: Mihai Ispas, 2003. p. 156-158.
- HANSSON, L.; LUNDGRE, N.; ANTTI, A. L.; HAGMAN, O. Microwave penetration in wood using imaging sensor. Measurement, v. 38, n. 1, p. 15-20, 2005.
- HANSSON, L. Microwave treatment of wood. 2007. 137 p. Tese (Doutorado em Física da Madeira) Lulea University of Technology, Skelleftea, 2007.
- HASSINI, L. PECKALSKI, R.; GELET, J. Combined convective and microwave drying of agglomerated stand: internal transfer modeling with gas pressure effect. Drying Technology, v. 31, n. 8, p. 898-905, 2013.
- HEMIS, M.; CHOUDHARY, R.; WATSON, D. G. A coupled mathematical model for simultaneous microwave and convective drying of wheat seeds. Biosystems engineering, v. 112, n. 3, p. 202-209, 2012.
- HE, X.; XIONG, X.; XIE, J.; LI, Y.; WEI, Y.; QUAN, P.; MOU, Q.; LI, X. Effect of microwave pretreatment on permeability and drying properties of wood. BioResources, v. 12, n. 2, p. 3850-3863, 2017.
- HILLIS, W. E. Wood extractives. New York: Academic Press, 1962. 59 p.
- JAMES, W. L. Dielectric properties of wood and hardboard: variation with temperature, frequency, moisture content, and grain orientation. USDA, Forest Products Laboratory, Madison, 35 p., 1975.

- JANKOWSKY, I. P. Fundamentos de secagem da madeira. Documentos Florestais, Piracicaba, v. 10, p. 1-13, 1990.
- JANKOWSKY, I. P.; GALINA, I. C. M. Secagem de madeiras. São Paulo: PIMADS, 2013. 39 p.
- KAPPE, C.O. Microwave dielectric heating in synthetic organic chemistry. Chemical Society Reviews, v. 37, n. 6, p. 1127-1139, 2008.
- KLITZKE, R. J. Secagem da madeira. Curitiba: UFPR, 2003. 98 p.
- KLITZKE, R. J. Secagem da madeira. In: OLIVEIRA, J. T. S.; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. (Org.). Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro. Jerônimo Monteiro: Suprema Gráfica e Editora, 2007, p. 271-342.
- KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÈ, W. A. Jr. Principles of wood science and technology: I. solid wood. New York: Springer-Verlag, 1968. 592 p.
- KRASZEWSKI, A. W.; NELSON, E. S. O. Application of microwave techniques in agricultural research. In: SBMO/IEEE MTT-S IMOC, 1995, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: IEEE, 1995. p. 117-126.
- KUBLER, H. Growth stresses in trees and related wood properties. Forestry Abstracts, v. 48, p. 131-189, 1987.
- LACERDA, M. J. R.; FREITAS, K. R.; SILVA, J. W.; Determinação da matéria seca de forrageiras pelos métodos de micro-ondas e convencional. Bioscience Journal, v. 25, n. 3, p. 185-190, 2009.
- LEIKER, M.; ADAMSKA, M. A. Energy efficiency and drying rates during vacuum microwave drying of wood. European Journal of Wood and Wood Products, v. 62, p. 203208, 2004.
- LIN, R. T. Review of the dielectric properties of wood and cellulose. Forest Products Journal, v. 17. P. 61-66, 1967.
- LI, Z.; VIJAVA-RAGHAVAN, G. S.; WANG, N. Carrot volatiles monitoring and control in microwave drying. Food Science and Technology, v. 43, n. 2, p. 291-297, 2010.
- LUNDGREN, N. Microwave sensors for scanning of sawn timber. 2007. 115 p. Tese (Doutorado em Física da Madeira) Lulea University of Technology, Skelleftea. 2007.
- LYONS, D. W.; HATCHER, J. D.; SUNDERLAND, J. E. Drying of a porous medium with internal heat generation. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 15, n.5, p. 897-905, 1972.
- MAGALHÃES, R. S.; LIMA, R. M. F.; SOUZA, H. A. O uso de micro-ondas para determinação de umidade de bauxita. Revista Escola de Minas, v. 56, n. 4, p. 255-259, 2003.
- MARTINS, H. Madeira como fonte de energia. In: PENEDO, W. R (Ed.). Uso da madeira para fins energéticos. Belo Horizonte: CETEC, 1980. p. 9-26.
- MARRA, F.; DE BONIS, M. V.; RUOCCO, G. Combined microwaves and convection heating: A conjugate approach. Journal of Food Engineering, v. 97, n. 1, p. 31-39, 2010.

MENEZES, R. R.; SOUTO, P. M.; KIMINAMI, R. H. G. A. Sinterização de cerâmicas em micro-ondas. Parte I aspectos fundamentais. *Cerâmica*, v. 63, p. 1-10, 2007.

MEREDITH, R. **Engineers' handbook of industrial microwave heating**. Stevenage: The Institution of Electrical Engineers, 1998. 380 p.

MINKOVA, V.; RAZVIGOROVA, M.; BJORNBOOM, E.; PETROV, N. Effect of water vapor and biomass nature on the yield and quality of the pyrolysis products from biomass. *Fuel Processing Technology*, v. 70, n. 1, p. 53-61, 2001.

MIURA, M.; KAGA, H.; SAKURAI, A.; KAKUCHI, T.; TAKAHASHI, K. Rapid pyrolysis of wood block by microwave heating. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 71, n. 1, p. 187-199, 2004.

MOORE, G. R.; BLANKENHORN, P. R.; BEALL, F. C. KLINE, D. E. Some physical properties of birch carbonized in a nitrogen atmosphere. *Wood and Fiber*, v. 6, n. 3, p. 193-199, 1974.

MORESCHI, J. C. *Relação água-madeira e sua secagem*. Curitiba: UFPR, 2014, 121p.

MUJUMDAR, A. S. *Handbook of industrial drying*. 4. ed. Canada: CRC Press, 2014. 1348 p.

NORIMOTO, M.; YAMADA, T. The dielectric properties of wood VI, on the dielectric properties of the chemical constituents of wood and the dielectric anisotropy of wood. *Wood Research*, v. 52, p. 31-43, 1972.

OHAUS. *Analisadores de umidade*. São Paulo: Corporação Ohaus, 2018. Disponível em: <<https://br.ohaus.com/pt-BR/Products/Balances-Scales/Moisture-Analyzers>> 2018. Acesso em: 28 abr. 2018.

OLIVEIRA, J. B.; GOMER, P. A.; ALMDEIRA, M. R. Caracterização do processo de fabricação de carvão em fornos de alvenara. In: PENEDO, W. R. (Ed.). *Carvão vegetal: destilação, carvoejamento, propriedades, controle de qualidade*. Belo Horizonte: CETEC, 1982. p. 63-102.

OLOYEDE, A.; GROOMBRIDGE, P. The influence of microwave heating on the mechanical properties of wood. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 100, p. 67-73, 2000.

OMAR, R.; IDRIS, A.; YUNUS, R.; KHALID, K.; AIDA ISMA, M. I. Characterization of empty fruit bunch for microwave-assisted pyrolysis. *Fuel*, v. 90, n. 4, p. 1536-1544, 2011.

OUERTANI, S.; HASSINI, L.; AZZOUZ, S.; TORRES, S. S.; BELGHITH, A.; KOUBAA, A. Modeling of combined microwave and convective drying of wood: prediction of mechanical behavior via internal gas pressure. *Drying Technology*, v. 33, n. 10, p. 1234-1242, 2015.

PASHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. *Textbook of wood technology. Structure, identification, properties and uses of the commercial woods of the U. S. and Canada*. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 1980. 722 p.

PIERRE, F.; ALMDEIDA, G.; BRITO, J. O.; PERRÉ, P. Influence of torrefaction on some chemical and energy properties of maritime pine and pedunculate oak. *BioResources*, v. 6, n. 2, p. 1204-1218, 2011.

- PERUSSELLO, C. A.; KUMAR, C.; CASTILHOS, F.; KARIM, M. A. Heat and mass transfer modeling of the osmo-convective drying yacon roots (*Smallanthus sonchifolius*). *Applied Thermal Engineering*, v. 63, n. 1, p. 23-32, 2014.
- RATTANADECHO, P.; MAKUL, N. Microwave-assisted drying: a review of the state-of-the-art. *Drying Technology*, v. 34, n. 1, p. 1-38, 2016.
- ROMERO, J.; VINDEN, P.; TORGOVNIKOV, G.; KHO, P. Post-drying microwave conditioning of *Pinus radiata* D. Don for non-pressure preservative treatment. In: *International Conference on Microwave and High Frequency Heating*, 5, 1995, Cambridge. **Anais...** Cambridge: Cambridge University, 1995. p. 4.1-4.4.
- ROWELL, R. M.; PETTERSEN, R.; TSHABALALA, M. A. Cell wall chemistry. In: ROWELL, R. M. (Ed.). *Handbook of wood chemistry and wood composites*. Boca Raton: CRC Press, 2013. p. 33-72.
- SAHIN, H.; AY, N. Dielectric properties of hardwood species at microwave frequencies. *Journal of Wood Science*, v. 50, n. 4, p. 375-380, 2004.
- SCAMAN, C. H.; DURANCE, T. D.; DRUMMOND, L.; SUN, D. W. Combined microwave vacuum drying. In: SUN, D. W. (Ed.). *Emerging Technologies for Food Processing*. Academic Press, 2014. p. 427-445.
- SCHIFFMANN, R. F. Microwave and dielectric drying. In: MUJUMDAR, A. S. (Ed.). *Handbook of industrial drying*. New York: Marcel Dekker, 1987. p. 327-356.
- SHARA'AH, A. A.; HELLEUR, R. Microwave pyrolysis of cellulose at low temperature. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 105, p. 91-99, 2014.
- SIAU, J. F. *Flow in wood*. Syracuse: Syracuse University Press, 1971. 131 p.
- SIMPSON, W. T. **Dry kiln operator's manual**. Madison: USDA, 1991. 274 p.
- SIMPSON, W. Sorption theories applied to wood. *Wood and Fiber Science*, v. 12, n. 3, p. 183-195, 1980.
- SKAAR, C. *Water in wood*. Syracuse: Syracuse University Press, 1972. 218 p.
- SKAAR, C. *Wood-water relations*. New York: Springer; 1988. 283 p.
- SOUZA, G. B.; NOGUEIRA, A. R. A.; RASSINI, J. B. Determinação de matéria seca e umidade em solos e plantas com forno de microondas doméstico. São Carlos: Embrapa, 2002. 9 p.
- STAMM, A. J. *Wood and cellulose science*. New York: The Ronald Press, 1964. 549 p.
- 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, p. 352-356, 2009.
- TARMIAN, A., REMOND, R., DASHTI, H., PERRÉ, P. Moisture diffusion coefficient of reaction woods: Compression wood of *Picea abies* L. and tension wood of *Fagus sylvatica* L. *Wood Science and Technology*, v. 6, n. 1, p. 405-417, 2012.
- TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. TAPPI T 204

om-88: Preparation of wood for chemical analysis. In: TAPPI Standard Method. Atlanta. CdRom, 2001.

TEIXEIRA, R. U. Efeito da produtividade florestal e permeabilidade da madeira de *Eucalyptus* spp. na velocidade de secagem. 2015. 58 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

TORGOVNIKOV, G.; VINDEN, P.; BALBONY, B. Microwave conversion of plantation grown blue gum (*Eucalyptus glubulues* L'Herit) wood to Torgvin and impregnation with a metal alloy. *Journal of Materials Science and Engineering with Advanced Technology*, v. 11, n. 1, p.1-19, 2015.

TORGOVNIKOV, G.; VINDEN, P. High intensity microwave wood modification for increasing permeability. *Forest Products Journal*, v. 59, n. 3, p. 1-9, 2009.

TORGOVNIKOV, G.; VINDEN, P. Microwave method for increasing the permeability of wood and its applications. *Advances in Microwave and Radio Frequency Processing*, p. 303-311, 2006.

TORGOVNIKOV, G.; VINDEN, P. Microwave modification of the peeler cores for preservative treatment. *Journal of Materials Science and Engineering with Advanced Technology*, v. 9, n. 1, p. 51-68, 2014.

TORGOVNIKOV, G.; VINDEN, P. Microwave wood modification technology and its applications. *Forest Products Journal*, v. 60, n. 2, p. 173-182, 2010.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. *Cerne*, v. 2, n. 1, p. 94 -111, 1996.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A.; FRAZÃO, F. J. L.; MATOS, J. L. M. Comparação de métodos de determinação da densidade básica em madeira. *Acta Amazônica*, v. 20, p. 307319, 1990.

TURNER, W., PUIGGALI, J. R., JOMAA, W. A numerical investigation of combined microwave and convective drying of a hygroscopic porous material: a study based on pine wood. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 76, n. 2, p. 193-209, 1998.

VINDEN, P.; TORGOVNIKOV, G.; HANN, J. Microwave modification of Radiata pine railway sleepers for preservative treatment. *European Journal of Wood and Wood Products*, v. 69, n. 2, p. 271-279, 2011.

VONGPRADUBCHAI, S.; RATTANADECHO, P. Microwave and hot air drying of wood using a rectangular waveguide, *Drying Technology*, v. 29, n. 4, p. 451-460, 2011.

VONGPRADUBCHAI, S.; RATTANADECHO, P. The microwave processing of wood using a continuous microwave belt drier. *Chemical Engineering and Processing*, v. 48, n. 5, p. 997-1003, 2009.

XU, K.; LU, J.; LI, X.; WU, Y; LIU, Y. Process of wood high intensity microwave pretreatment based on response surface methodology. *Scientia Silvae Sinicae*, v. 50, n. 11, p. 109-114, 2014.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H.; ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis., *Fuel*, v. 86, p. 1781-1788, 2007.

ZHAO, X.; YAN, L.; HUANG, K. Review of numerical simulation of microwave heating process. In: GRUNDAS, S. (Ed.). Advances in induction and microwave heating of mineral and organic materials. Rijeka: Intech, 2011. p. 27-48.

ZIELONKA, P.; DOLOWY, K. Microwave drying of spruce: Moisture content, temperature, and heat energy distribution. Forest Products Journal, v. 48, n. 6, p. 77-80, 1998.