

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA

VINICIUS MUNALDI LUBE

EFEITO DAS MICRO-ONDAS NA SECAGEM E PROPRIEDADES
MECÂNICAS DA MADEIRA JOVEM E ADULTA DE *Eucalyptus grandis*

JERÔNIMO MONTEIRO
ESPÍRITO SANTO

2012

VINICIUS MUNALDI LUBE

EFEITO DAS MICRO-ONDAS NA SECAGEM E PROPRIEDADES
MECÂNICAS DA MADEIRA JOVEM E ADULTA DE *Eucalyptus grandis*

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Industrial Madeireiro.

JERÔNIMO MONTEIRO

ESPÍRITO SANTO

2012

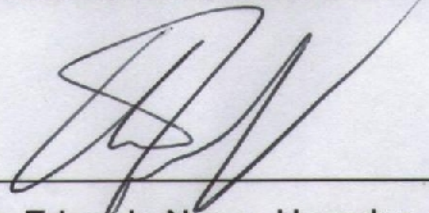
VINICIUS MUNALDI LUBE

EFEITO DAS MICRO-ONDAS NA SECAGEM E PROPRIEDADES
MECÂNICAS DA MADEIRA JOVEM E ADULTA DE *Eucalyptus grandis*

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da
Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do
título de Engenheiro Industrial Madeireiro.

Aprovada em 20 de agosto de 2012.

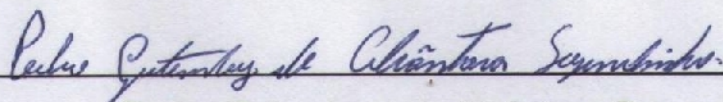
COMISSÃO EXAMINADORA



Clovis Eduardo Nunes Hegedus

Universidade Federal do Espírito Santo

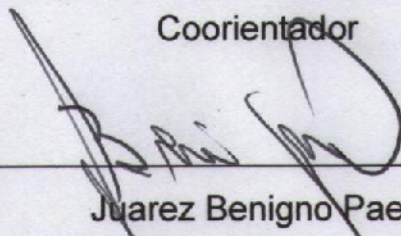
Orientador



Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho

Universidade Federal do Espírito Santo

Coorientador



Juarez Benigno Paes

Universidade Federal do Espírito Santo

Aos meus pais, por todo apoio moral e financeiro.

Aos meus irmãos, pelo apoio financeiro e por acreditarem nas minhas convicções.

Aos meus amigos, por toda a valorização pessoal e respeito.

Aos meus caríssimos professores, por todo conhecimento e conselhos oferecidos.

"Os limites da minha linguagem
são os limites do meu mundo".

Ludwig Wittgenstein

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Espírito Santo, pela oportunidade concedida em realizar uma graduação em nível superior, e por disponibilizar Capital Humano, Científico e Tecnológico para tal finalidade.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo pela ajuda financeira e suporte técnico prestado.

A todos os meus familiares, Barbara e Leonardo, em especial aos meus pais, Vionilson e Elizabeth, pelo amor, carinho, compreensão e ensinamentos ao longo da minha vida.

À minha afilhada e sobrinha Luisa, por chegar de forma imprevista, mas ao mesmo tempo, radiante na minha vida.

Aos Professores Clovis Eduardo Nunes Hegedus e Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho, pela orientação, dedicação, apoio, amizade e compreensão ao longo do desenvolvimento da pesquisa.

Ao Professor Roberto Colistete Junior, Professora Graziela Baptista Vidaurre, Professor José Tarcísio da Silva Oliveira e o Professor Wendel Andrade pelos conselhos e ensinamentos. Em especial ao Professor Djeison Cesar Batista e ao Professor Juarez Benigno Paes, pelo companheirismo, amizade e conhecimentos transmitidos.

Ao técnico em marcenaria Elecy Palácio Constantino pela amizade, apoio, sabedoria, paciência, compreensão e assistência prestada.

Aos meus amigos do Curso de Engenharia Industrial Madeireira pela ajuda, amizade e alegrias durante o Curso. Em especial aos meus amigos Doahn, Ivan e Lélío, por seus intrínsecos ponto de vista ao analisarem e viverem o Curso de Engenharia Industrial Madeireira.

Aos caríssimos amigos da pós-graduação, por suas contribuições no meu crescimento, tanto acadêmico quanto pessoal, em especial ao Danilo, a Fabiana, o Marcelo e a Tessa, pessoas que serão eternos amigos.

E, finalmente a todas as pessoas não citadas que fazem parte diretamente e indiretamente da minha vida.

RESUMO

A secagem da madeira exerce papel preponderante na agregação de valor à madeira e seus derivados, pois promove um aumento significativo da qualidade com uma série de vantagens, dentre algumas delas, o aumento da resistência à deterioração por organismos biológicos, melhora da estabilidade dimensional e principalmente o aumento da resistência mecânica. O objetivo do estudo foi realizar a secagem por meio da energia eletromagnética no espectro de frequência das micro-ondas, sendo utilizado um aparelho convencional de micro-ondas com um *magnetron* de potência máxima de 700 W, analisando por meio de um estudo preliminar, o efeito da exposição da madeira à energia eletromagnética de micro-ondas sobre algumas das propriedades tecnológicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. Foram aplicados diferentes tratamentos com potência de 460, 600 e 700 Watts, tempo de exposição de 5; 5,5 e 11 minutos, e material amostrado, em que foram utilizadas madeiras de *Eucalyptus grandis* de duas idades, uma com oito e a outra com 34 anos. Foi realizada a caracterização do desempenho em relação a algumas propriedades mecânicas, com o emprego de métodos destrutivos no ensaio mecânico de compressão axial, e não destrutivos, com o método de aplicação de ondas acústicas, para identificar a rigidez da madeira, por meio do equipamento de *Stress Wave Timer*. De maneira geral, a madeira com oito anos de idade demonstrou alterações significativas em suas propriedades tecnológicas quando submetidas à radiação de micro-ondas de acordo com os tratamentos aplicados.

Palavras-chave: Ondas eletromagnéticas. Propriedades tecnológicas da madeira. Pré-tratamento. Modificação de madeiras.

SUMÁRIO

| | |
|---|------|
| LISTA DE TABELAS | viii |
| LISTA DE FIGURAS..... | ix |
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 O problema e sua importância | 2 |
| 1.2 Objetivos | 4 |
| 1.2.1 Objetivo geral | 4 |
| 1.2.2 Objetivos específicos | 4 |
| 2 REVISÃO DE LITERATURA | 5 |
| 2.1 Espectro eletromagnético das micro-ondas | 5 |
| 2.2 Propriedades dielétricas da madeira | 6 |
| 2.3 Efeito das micro-ondas na madeira | 7 |
| 3 METODOLOGIA | 8 |
| 3.1 Obtenção da madeira e confecção dos corpos de prova | 8 |
| 3.2 Tratamentos com micro-ondas..... | 10 |
| 3.2.1 Primeiro grupo de amostras | 11 |
| 3.2.2 Segundo grupo de amostras | 11 |
| 3.2.3 Terceiro grupo de amostras | 12 |
| 3.2.4 Ciclos de exposição | 13 |
| 3.3 Métodos de avaliação..... | 14 |
| 3.3.1 Propriedades físicas..... | 14 |
| 3.3.2 Resistência mecânica pelo método destrutivo | 14 |
| 3.3.3 Rigidez pelo método não destrutivo | 16 |
| 3.3.4 Análise estatística | 18 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 19 |
| 4.1 Propriedades físicas do primeiro grupo | 19 |

| | |
|--|----|
| 4.2 Propriedades mecânicas do primeiro grupo | 22 |
| 4.3 Propriedades físicas do segundo grupo | 28 |
| 4.4 Propriedades mecânicas do segundo grupo | 31 |
| 4.5 Propriedades físicas do terceiro grupo | 33 |
| 4.6 Propriedades mecânicas do terceiro grupo | 35 |
| 5 CONCLUSÕES | 38 |
| 6 REFERÊNCIAS | 39 |
| APÊNDICES | 42 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Amostragem do primeiro grupo (E - 1.1)..... | 11 |
| Tabela 2 - Amostragem do segundo grupo (E – 1.2) | 12 |
| Tabela 3 - Amostragem do terceiro grupo (E – 2). | 13 |
| Tabela 4 - Ciclos de exposição do 1º e segundo grupo | 13 |
| Tabela 5 - Ciclos de exposição do terceiro grupo | 13 |
| Tabela 6 - Propriedades físicas do primeiro grupo ao longo dos tratamentos | 20 |
| Tabela 7 - Taxa de secagem em função da potência e do tempo de exposição de cada ciclo do primeiro grupo | 21 |
| Tabela 8 – Resultados da f_{wco} do primeiro grupo..... | 22 |
| Tabela 9 - Fator de modificação da f_{wco} do primeiro grupo em comparações de tratamentos | 23 |
| Tabela 10 - Propriedades físicas da madeira ao longo dos tratamentos do segundo grupo | 28 |
| Tabela 11 - Variação da densidade em função do tempo de exposição do segundo grupo | 29 |
| Tabela 12 - Taxa de secagem em função das potências e do tempo de exposição do segundo grupo..... | 30 |
| Tabela 13 - Variação da rigidez ao longo do tempo de exposição do segundo grupo. | 32 |
| Tabela 14 - Fator de modificação do MOE_d do segundo grupo..... | 33 |
| Tabela 15 - Propriedades físicas da madeira ao longo dos tratamentos do terceiro grupo | 34 |
| Tabela 16 - Taxa de secagem em função do tempo de exposição do terceiro grupo | 34 |
| Tabela 17 - Resultados da f_{wco} do terceiro grupo | 36 |
| Tabela 18 - Fator de modificação da f_{wco} do terceiro grupo em comparações de tratamentos | 37 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Amostras de eucalipto após secagem em condições semelhantes: (a) amostra tratada com micro-ondas; (b) amostras de controle sem tratamento com micro-ondas | 3 |
| Figura 2 - Espectro eletromagnético em função do comprimento de onda no espaço livre..... | 5 |
| Figura 3 - Preparação dos corpos de prova E – 1.1 e E - 1.2 para ensaios de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade dinâmico..... | 9 |
| Figura 4 - Dimensões nominais das amostras com suas respectivas identificações .. | 9 |
| Figura 5 - Pirólise em amostras utilizando inadequados <i>layouts</i> iniciais..... | 10 |
| Figura 6 – Amostras tipo E – 1.1 do primeiro grupo | 11 |
| Figura 7 - Amostras tipo E – 1.2 do segundo grupo..... | 12 |
| Figura 8 - Amostras tipo E – 2 do terceiro grupo..... | 13 |
| Figura 9 - Máquina de ensaio mecânico com aquisição automática de dados | 15 |
| Figura 10 – <i>Stress Wave Timer</i> (SWT) | 17 |
| Figura 11 – Amostras tipo E – 1.1 do primeiro grupo no arranjo físico utilizado | 19 |
| Figura 12 - Variação da densidade do primeiro grupo em função da potência e do tempo de exposição. | 20 |
| Figura 13 - Variação da umidade em função da potência e do tempo de exposição do primeiro grupo | 21 |
| Figura 14 - Taxa de secagem em função da potência e do tempo de exposição do primeiro grupo. | 21 |
| Figura 15 - Resultados da f_{wc0} em comparativo após todos os tratamentos do primeiro grupo. | 24 |
| Figura 16 - Coeficiente de variação após tratamentos do primeiro grupo..... | 24 |
| Figura 17 - Curva da f_{wc0} em relação à umidade da madeira do primeiro grupo. | 25 |
| Figura 18 - Comparações das f_{wc0} da Testemunha do primeiro grupo. | 26 |
| Figura 19 - Comparações das f_{wc0} após tratamento em 460W do primeiro grupo. | 26 |

| | |
|--|----|
| Figura 20 - Comparações das f_{wc0} após tratamento em 600W do primeiro grupo. | 27 |
| Figura 21 - Comparações das f_{wc0} após tratamento em 700W do primeiro grupo. | 27 |
| Figura 22 - Amostras do tipo E – 1.2 do segundo grupo. | 28 |
| Figura 23 - Umidade do segundo grupo ao longo do tempo de exposição. | 29 |
| Figura 24 - Densidade do segundo grupo ao longo do tempo de exposição. | 30 |
| Figura 25 - Taxas de secagem do segundo grupo. | 30 |
| Figura 26 - MOE_d do segundo grupo ao longo do tempo de exposição. | 33 |
| Figura 27 - Amostras do tipo E – 2 do terceiro grupo. | 34 |
| Figura 28 - Taxa de secagem do 1º Subgrupo do terceiro grupo. | 35 |
| Figura 29 - Taxa de secagem do 2º Subgrupo do terceiro grupo. | 35 |
| Figura 30 - Comparações das f_{wc0} entre os tratamentos ao longo da exposição do terceiro grupo. | 36 |

1 INTRODUÇÃO

Existem várias espécies de madeiras que apresentam baixa permeabilidade a fluidos, uma vez que, essa propriedade pode ainda, ser atenuada para aquelas espécies de folhosas que desenvolvem tilose, que é comum em algumas espécies de eucalipto. De acordo com Vinden e Torgovnikov (2003), essas espécies podem desenvolver com mais facilidade defeitos durante o processo de secagem, pois a baixa permeabilidade apresentada pela madeira irá conduzir a necessidade de utilizar ciclos de secagem mais longos e condições higrométricas mais brandas. O não cumprimento desses parâmetros conduzirá à elevação de gradientes de umidade nas peças, levando ao desenvolvimento de tensões de secagem, podendo induzir a defeitos de empenamentos como principal característica.

A madeira jovem de eucalipto apesar de ser largamente utilizada, apresenta algumas características que limitam seu uso como matéria prima pela indústria madeireira. Dentre essas características, destacam-se a elevada tensão de crescimento (GARCIA, 1995), elevada retratibilidade e susceptibilidade ao colapso durante a secagem. A madeira de eucalipto proveniente de florestas de rápido crescimento apresenta essas características em função da maior porção de lenho jovem (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE - ABIMCI, 2004).

A secagem da madeira tem papel significativo na agregação de valor ao produto, pois promove uma série de vantagens, dentre elas, o aumento da resistência à deterioração por organismos biológicos, aumento da estabilidade dimensional e principalmente o aumento da resistência mecânica. Várias dessas características apresentam baixos índices quando se trata de madeiras de lenho jovem para eucalipto, podendo apresentar ganhos significativos quando submetido a processos de secagem.

As tecnologias de micro-ondas aplicadas à madeira vêm sendo utilizada em nível científico e em processos industriais, com o objetivo de modificar características naturais da madeira, e com isto, tornar possível a promoção de tratamentos preservativos facilitados de espécies de madeiras refratárias, ou de difícil impregnabilidade, rápida secagem com elevada qualidade, alívio das tensões de crescimento, aumento da permeabilidade em toras, madeira serrada, e cavacos

para a polpação química (TORGOVNIKOV; VINDEN, 2010). A tecnologia de micro-ondas tem sido muito importante nesse setor à medida que permite o surgimento de novas técnicas de processamento e utilização da madeira.

A absorção de energia das micro-ondas pela água produz vibração aleatória de moléculas polarizadas, gerando atrito e elevando a temperatura em qualquer material que apresente água (umidade) em sua constituição (ZHAO; YAN; HUANG, 2011). Apesar das moléculas de água serem significativamente afetadas pelas micro-ondas, dada a sua alta permissividade dielétrica, também outras moléculas polares existentes na constituição da hemicelulose, celulose e lignina podem ser afetadas, porém de maneira não significativa (HANSSON; ANTTI, 2003).

É relatado na literatura que a radiação micro-ondas promove alterações na estrutura da madeira, podendo elevar significativamente a permeabilidade nas direções radiais e longitudinais (TORGOVNIKOV; VINDEN, 2002; CRC, 2005). No entanto, pesquisas mostram que essas alterações promovem fissuras nos tecidos celulares e degradam o tecido parenquimático, em que, dependendo da exposição à radiação micro-ondas, a madeira pode ter suas propriedades mecânicas minoradas significativamente (MACHADO, 2006).

1.1 O problema e sua importância

A madeira de eucalipto é altamente propensa ao desenvolvimento de colapso, sendo, inclusive, considerado um dos principais defeitos de sua secagem (SANTINI; TOMASELLI, 1980; ANANIAS; DIAZ; LEANDRO, 2009). A pré-secagem que pode ser promovida pelas micro-ondas praticamente inibem o desenvolvimento de colapso na madeira (Figura 1), uma vez que a aplicação intensiva de micro-ondas condiciona a um aumento na permeabilidade da madeira, diminuindo a tendência do desenvolvimento de colapso durante a secagem (TORGOVNIKOV; VINDEN, 2010).

Em função de ser um mecanismo que atua rapidamente na madeira, as micro-ondas possibilitam redução no tempo de secagem da madeira, proporcionando uma redução do espaço físico, energia e custos de trabalho, bem como o aumento do giro de capital, enquanto a redução de defeitos de secagem pode ainda aumentar a produtividade (CRC, 2005).

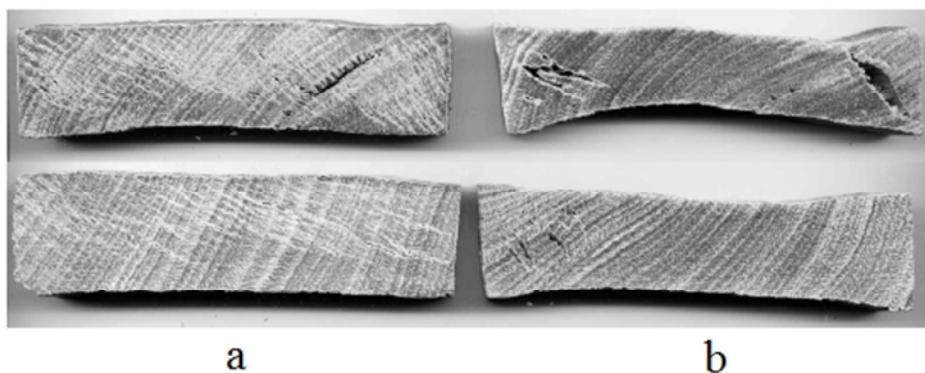


Figura 1 - Amostras de eucalipto após secagem em condições semelhantes: (a) amostra tratada com micro-ondas; (b) amostras de controle sem tratamento com micro-ondas

Fonte: Torgovnikov e Vinden (2010).

Em algumas madeiras de folhosas durante a formação de cerne, pode ocorrer o desenvolvimento do fenômeno denominado tilose, definido pela proliferação dos tilos (células parenquimáticas) pelas pontoações dos vasos (CARMO, 2008). As micro-ondas promovem pelo aquecimento, um gradiente de pressão oposto ao sentido de obstrução pelos tilos, desta forma, rompendo as células parenquimáticas que obstruem os vasos, promovendo um aumento significativo da permeabilidade na direção longitudinal da madeira (TORGOVNIKOV; VINDEN, 2010), consequentemente otimizando o processo de secagem.

Apesar da tecnologia de micro-ondas aplicada à madeira se mostrar promissora, pouca atenção tem sido dada para quantificar o efeito do método nas propriedades mecânicas da madeira, desta forma, constitui-se num problema, analisar a interferência dos tratamentos de micro-ondas na resistência mecânica à compressão e rigidez da madeira. Portanto, torna-se pertinente uma avaliação deste efeito, uma vez que ele pode limitar o uso da madeira.

Uma possível termo-degradação em função da pirólise da madeira durante a exposição à energia de micro-ondas é uma questão a ser levada em consideração.

Smith et al. (1996) relataram que há uma perda da resistência mecânica em função da temperatura, sendo um processo que ocorre cumulativamente durante o tempo de exposição à energia eletromagnética. No entanto, caso a exposição dure

um curto período de tempo, foi relatado que não haveria alterações negativas das propriedades de resistência da madeira.

É geralmente aceito, que a madeira aquecida até 100°C irá recuperar suas propriedades mecânicas quando resfriada, não sendo esperada qualquer degradação dos constituintes primários com funções estruturais (MACHADO, 2006).

Este estudo preliminar buscou contribuir para fortalecer a discussão entre os fatores que afetam a secagem por meio das micro-ondas nas propriedades físicas e mecânicas da madeira.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Analisar o efeito das micro-ondas no processo de secagem e propriedades de resistência à compressão axial e rigidez da madeira de *Eucalyptus grandis* de 8 e 34 anos de idade.

1.2.2 Objetivos específicos

- i. Avaliar a influência dos tratamentos de micro-ondas na secagem da madeira de *Eucalyptus grandis*.
- ii. Verificar o efeito dos tratamentos de micro-ondas na resistência à compressão axial e rigidez da madeira de *Eucalyptus grandis*.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Espectro eletromagnético das micro-ondas

A radiação de micro-ondas consiste em uma forma de energia eletromagnética que apresenta faixa de frequência entre 300 MHz e 300 GHz com comprimentos de onda correspondentes de um 1 m a 1 mm (HANSSON, 2007; LUNDGREN, 2007).

Segundo Wilkinson (2004), as micro-ondas podem ser consideradas ondas de rádio de altíssima frequência, processando um campo elétrico que rapidamente reverte a sua direção em cerca de 2 bilhões de ciclos por segundo na frequência de 2,45 GHz.

O espectro eletromagnético apresentado na Figura 2 abrange uma vasta gama de ondas com propriedades diferentes dependendo da frequência (f) da onda. O comprimento de onda (λ) está relacionado com a frequência pela velocidade de propagação ($c = \lambda \cdot f$) em que c é igual à velocidade da luz no espaço livre (HANSSON, 2007).

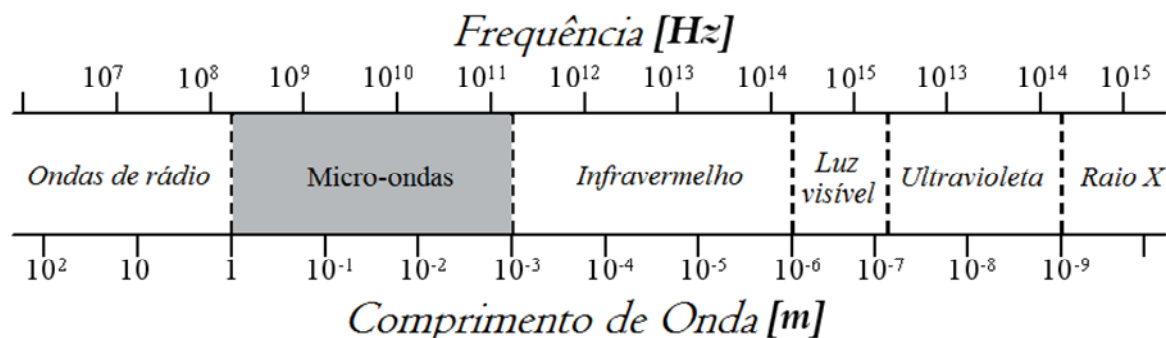


Figura 2 - Espectro eletromagnético em função do comprimento de onda no espaço livre

Fonte: Adaptado de Lundgren (2007).

As micro-ondas são absorvidas por todos os corpos líquidos ou sólidos cujas moléculas polares sejam sensíveis a um campo elétrico alternado. As moléculas polares, como a água, tentam se orientar na direção do campo elétrico e os rápidos ciclos do campo na direção oposta causam nessas moléculas um movimento brusco

para frente e para trás (WAUGH, 2005). Essas rápidas vibrações geram calor em função do atrito gerado entre as moléculas.

Quando se usa micro-ondas para aquecimento, ao contrário de outras fontes de calor, o feixe de energia atua diretamente no núcleo do substrato a ser aquecido, dando origem a um efeito causador de pressão osmótica, ou seja, uma pressão interna como se fosse um êmbolo empurrando a água do centro para a periferia (GHANDEHR, 2005). Com isto, a ação das micro-ondas origina em aumento da temperatura com mínima perda de energia para o ambiente, em função de não serem necessários trocadores de calor e outros equipamentos que acentuam as perdas e diminuem a eficiência da secagem em si (OLOYEDE; GROOMBRIDGE, 2000). Além de o processo ser mais rápido, há a possibilidade de ajustes instantâneos de potência.

As ondas eletromagnéticas de micro-ondas nas frequências de 0,922 GHz e 2,45 GHz são em geral, as mais utilizadas nos tratamentos de madeiras. De acordo com Resch (2006), a profundidade de penetração da onda eletromagnética na madeira depende da frequência da mesma. Quanto menor a frequência, maior a capacidade de penetração da radiação, ou por outro lado, quanto maior a umidade, menor a capacidade de penetração da onda eletromagnética.

2.2 Propriedades dielétricas da madeira

As propriedades dielétricas de um material não condutor assim como a madeira, descrevem a interação do material com campos elétricos. De acordo com James (1975), as duas interações de principal importância são a absorção e o armazenamento de energia potencial elétrica no sítio de polarização dentro da madeira, e a degradação ou perda de parte desta energia quando o campo elétrico é removido, sendo fatores que atuam por causa da constante dielétrica apresentada pela madeira em função dos seus elementos e constituintes.

O comportamento dielétrico da madeira para um campo elétrico alternado é regido por vários fatores, como temperatura, umidade, densidade, campo elétrico, direção da grã e frequência de emissão das ondas eletromagnéticas, (LIN, 1967; JAMES, 1975; TORGOVNIKOV, 1993; AFZAL; COLPITTS; GALIK, 2003). Esses

fatores por sua vez, regem o comportamento das ondas eletromagnéticas, que, por conseguinte, podem ser aplicadas para a avaliação não destrutiva das propriedades da madeira. Neste contexto, desenvolveram-se tecnologias de *scanners* baseando-se na transmissão de energia nas frequências de micro-ondas para avaliar a umidade e densidade, bem como a detecção de nós e medição do ângulo micro fibrilar (JAMES; YEN; KING, 1985; LUNDGREN, 2007).

2.3 Efeito das micro-ondas na madeira

Em relação à eficiência de pré-tratamentos por micro-ondas para secagem, Brodie (2008) obteve uma redução de 17% do tempo em secagem solar para peças com 30 mm de espessura de *Eucalyptus regnans* e 33% de redução do tempo para o *Populus alba*, sem causar qualquer alteração na qualidade visível da madeira seca. Essa aceleração foi atribuída a uma redução de 9% na densidade da madeira e um aumento substancial na permeabilidade associada às fraturas internas microscópicas geradas pelas micro-ondas, que foi alcançado aquecendo as amostras de madeira colocadas ao longo do diâmetro do prato de um forno de micro-ondas, operando a 2,45 GHz por 6 minutos em plena potência, sendo requerida energia para este processo de aproximadamente 104 kWh/m³.

Vinden e Torgovnikov (2000) obtiveram uma redução no tempo de secagem da madeira com micro-ondas na ordem de 2 a 10 vezes comparado à secagem convencional, e sem desenvolvimento de defeitos.

Oloyed e Groombridge (2000) estudaram o efeito de secagem de madeira de *Pinus caribaea* usando micro-ondas, e, concluíram que a secagem por micro-ondas poderia reduzir a resistência da madeira em 60%. Bem como Machado (2006), que encontrou para a madeira de carvalho (*Quercus pyrenaica*) em função da exposição à potência de 550 W, uma diminuição da resistência à compressão axial de 10 e 20% para 5 e 10 minutos de exposição respectivamente.

Terziev (2002), depois de comparar a secagem convencional, secagem a altas temperaturas (>100°C) em câmara de secagem, e secagem por micro-ondas, concluiu sobre a existência de alterações químicas e estruturais na madeira de *Pinus sylvestris* (mais severas nas amostras expostas às micro-ondas do que em

altas temperaturas), implicando que eventuais modificações das propriedades mecânicas deveriam ser estudadas.

3 METODOLOGIA

A pesquisa é classificada, quanto aos fins, como exploratória, pois busca esclarecer a interferência da aplicação de micro-ondas na madeira quanto a parâmetros de secagem, resistência e rigidez mecânica; como quantitativa, uma vez que busca quantificar a influência dos tratamentos nas propriedades do material. Quanto aos meios, classifica-se como experimental.

Todo o procedimento experimental do estudo foi realizado no Laboratório de Ciência da Madeira (LCM) do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira (DCFM) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), conforme as etapas apresentadas a seguir.

3.1 Obtenção da madeira e confecção dos corpos de prova

O material utilizado foi proveniente de um povoamento de *Eucalyptus grandis* localizado na Fazenda Paraíso Nosso Lar, 20° 32' 44,36" S e 41° 49' 30,03" W, a uma altitude de 1108 m no município de Espera Feliz, Estado de Minas Gerais. Foram utilizadas madeiras de duas idades, a primeira com oito e a segunda com 34 anos.

O material com oito anos foi abatido e levado para o DCFM para serem retirados (Figuras 3 e 4) os corpos de prova E – 1.1 nas dimensões nominais de 2 x 2 x 6 cm (maior dimensão no sentido axial) para os testes de resistência à compressão axial (f_{wco}) de acordo com a International Organization for Standardization - ISO 3787, e também para a produção dos corpos de prova E – 1.2 nas dimensões nominais de 2 x 5 x 27 cm (maior dimensão no sentido axial) para os testes do módulo de elasticidade dinâmico (MOE_d) de acordo com a Figura 4. Não foi possível seguir a instrução normativa da American Society for Testing and

Materials - ASTM D143 (2000) quanto às dimensões das amostras para os testes do MOE_d em função das dimensões do aparelho de micro-ondas empregado.

Após os corpos de prova serem produzidos, permaneceram acondicionados em uma sala durante 30 dias para equalizarem a umidade.



Figura 3 – Preparação dos corpos de prova E – 1.1 e E - 1.2 para ensaios de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade dinâmico

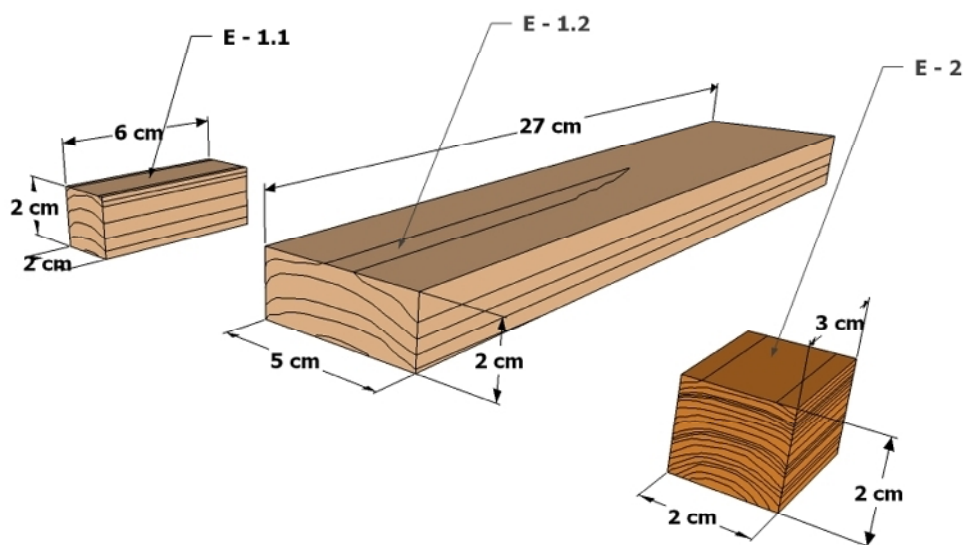


Figura 4 – Dimensões nominais das amostras com suas respectivas identificações

O material com 34 anos já encontrava-se desdobrado, portanto seguiu-se para obtenção dos corpos de prova de acordo com a amostra E - 2 da Figura 4 nas dimensões nominais de 2 x 2 x 3 cm (maior dimensão no sentido axial) para os

testes de compressão axial, em que são dimensões adaptadas da Norma Brasileira Regulamentadora - NBR 7190 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1997), essas dimensões foram estabelecidas em função da limitação de material para análise.

3.2 Tratamentos com micro-ondas

Foi utilizado um aparelho convencional de micro-ondas, com potência máxima de 700 Watts (W).

Foram aplicados diferentes tratamentos variando a potência de 460, 600 e 700 W, tempo de exposição de 5; 5,5 e 11 minutos, e material amostrado. Portanto, houve uma alocação dos tratamentos nas amostras designando grupos de condições experimentais.

O arranjo das amostras dentro do aparelho de micro-ondas foi definido com o objetivo de proporcionar uma distribuição homogênea da energia eletromagnética entre as amostras, da mesma forma, fazer com que não ocorresse o fenômeno denominado “*overheating*”, sendo traduzido em “superaquecimento”, pois ocorre quando há grande concentração de energia em um único ponto, desta forma, elevando rapidamente a temperatura naquela região, eventualmente dependendo do nível de energia e propriedades físicas da madeira como densidade, pode ser desenvolvido pirólise no interior da madeira (Figura 5).

Em função da necessidade inicial de evitar o desenvolvimento da pirólise nas amostras, foi determinado um *layout* que distribuía de forma simétrica as amostras, e os procedimentos foram realizados com o prato do aparelho de micro-ondas girando durante os tratamentos.



Figura 5 – Pirólise em amostras submetidas a inadequados *layouts* iniciais

3.2.1 Primeiro grupo de amostras

O primeiro grupo de amostras foi composto pelos corpos de prova do tipo E – 1.1 (Figura 6), sua amostragem está descrita de acordo com a Tabela 1, com quatro subgrupos nos quais estão as testemunhas (1º), as amostras submetidas a 460 W (2º), 600 W (3º) e 700 W (4º). Todos os subgrupos foram submetidos à radiação de micro-ondas durante 11 minutos.



Figura 6 – Amostras tipo E – 1.1 do primeiro grupo

Tabela 1 – Amostragem do primeiro grupo (E – 1.1).

| Tratamentos | Subgrupos | Potência | Amostras | Tempo |
|-------------|-----------|----------|----------|------------|
| Testemunha | 1º | - | 15 | 11 minutos |
| 1 | 2º | 460 W | 15 | |
| 2 | 3º | 600 W | 15 | |
| 3 | 4º | 700 W | 15 | |

3.2.2 Segundo grupo de amostras

O segundo grupo de amostras foi composto pelos corpos de prova do tipo E – 1.2 (Figura 7), e de acordo com a metodologia de avaliação adotada para esse grupo ser de caráter não destrutivo, as amostras iniciais de Testemunhas foram também as amostras dos tratamentos posteriores dentro do grupo.



Figura 7 – Amostras tipo E – 1.2 do segundo grupo

A amostragem para o segundo grupo está descrita de acordo com a Tabela 2, com três subgrupos nos quais estão as testemunhas (1^o), as amostras submetidas a 5,5 minutos (2^o) e 11 minutos (3^o). Foi mantida uma potência única de 460 W durante a exposição dos subgrupos à radiação de micro-ondas.

Tabela 2 – Amostragem do segundo grupo (E – 1.2).

| Tratamentos | Subgrupos | Potência | Amostras | Tempo (minutos) |
|-------------|----------------|----------|----------|-----------------|
| Testemunha | 1 ^o | - | | 0 |
| 1 | 2 ^o | 460 W | 12 | 5,5 |
| 2 | 3 ^o | | | 11 |

3.2.3 Terceiro grupo de amostras

O terceiro grupo de amostras foi composto pelos corpos de prova do tipo E –2 (Figura 8), sua amostragem está descrita de acordo com a Tabela 3, com três subgrupos nos quais estão as testemunhas (1^o), as amostras submetidas a 5 minutos (2^o) e 10 minutos (3^o). Foi mantida uma potência única de 460 W durante a exposição dos subgrupos à radiação de micro-ondas.



Figura 8 – Amostras tipo E – 2 do terceiro grupo

Tabela 3 – Amostragem do terceiro grupo (E – 2).

| Tratamentos | Subgrupos | Potência | Amostras | Tempo (minutos) |
|-------------|-----------|----------|----------|-----------------|
| Testemunha | 1º | - | 24 | 0 |
| 1 | 2º | 460 W | 24 | 5 |
| 2 | 3º | | 24 | 10 |

3.2.4 Ciclos de exposição

Os ciclos de exposição foram utilizados com o objetivo de atenuar a possibilidade de ocorrência do “*overheating*”. Para os corpos de prova do primeiro e segundo grupo, seguiu-se o ciclo de exposição de acordo com a Tabela 4, enquanto o terceiro grupo seguiu de acordo com a Tabela 5.

Tabela 4 – Ciclos de exposição do 1º e segundo grupo

| Grupos | Ciclos (minutos) | | | | | |
|--------|------------------|----|----|-----|----|----|
| | 1º | 2º | 3º | 4º | 5º | 6º |
| 1 | | | | | | |
| 2 | 1,5 | 2 | 2 | 1,5 | 2 | 2 |

Tabela 5 – Ciclos de exposição do terceiro grupo

| Grupo | Ciclos (minutos) | | | | | | | | | |
|-------|------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| | 1º | 2º | 3º | 4º | 5º | 6º | 7º | 8º | 9º | 10º |
| 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

O tempo entre ciclos foi fixado como decorrência da realização de mensurações de ordem física e mecânica nas amostras. No primeiro e terceiro grupo

as amostras apresentaram um intervalo entre ciclos de aproximadamente 10 minutos, já para o segundo grupo, em média de 20 minutos, em função de se tratarem de amostras maiores, e, portanto, demoram mais para alcançar a temperatura ambiente, para então permitir a realização de mensurações.

3.3 Métodos de avaliação

Foram utilizados métodos avaliativos de cunho quantitativo, com o emprego de equipamentos de determinação de propriedades físicas e mecânicas da madeira, de forma não destrutiva e destrutiva.

3.3.1 Propriedades físicas

Os procedimentos adotados na avaliação da densidade e umidade da madeira foram pelos métodos estereométrico e gravimétrico respectivamente, seguindo os parâmetros estabelecidos pela NBR 7190 da ABNT (1997).

As avaliações das propriedades físicas foram realizadas em todas as etapas do experimento, ou seja, contemplou as amostras dos tipos E – 1.1, E – 1.2 e E – 2, e a obtenção dos dados foram realizadas por meio de pesagens e medições de volume das amostras nos intervalos dos ciclos de secagem. As taxas de secagem foram obtidas por meio de subtração entre a umidade da amostra antes e depois de cada ciclo de secagem, dividido pela duração do ciclo.

A massa seca de todas as amostras foi obtida com a colocação das mesmas em estufa elétrica de laboratório, e a operação durou até que não houvesse variação superior a 1% da massa das amostras entre pesagens intercaladas por um dia.

3.3.2 Resistência mecânica pelo método destrutivo

Para avaliar o desempenho dos corpos de prova do primeiro e terceiro grupo sujeitos a esforços de compressão axial, após os tratamentos o material ficou

acondicionando por cerca de uma hora até chegar à temperatura ambiente, a partir daí foram realizados ensaios mecânicos nas amostras, e realizada a correção da resistência para o valor referência na umidade de 12% de acordo com a NBR 7190 da ABNT (1997), utilizando a Equação 1 para o ajuste. Foi utilizado para aferição dos ensaios mecânicos uma máquina de ensaios com capacidade de 10 kN e aquisição automática de dados (Figura 9).

$$f_{wc0\%} = f_{wc0U\%} \left| 1 + \frac{3 \times (U\% - 12)}{100} \right| \quad (1)$$

Onde:

$f_{wc012\%}$: resistência corrigida para a umidade de 12%;

$f_{wc0U\%}$: resistência para a umidade U%;

U%: umidade da madeira.



Figura 9 – Máquina de ensaio mecânico com aquisição automática de dados

Para efeito de comparações auxiliares, ao primeiro grupo foi também gerado com base em parâmetros estipulados por Green et al. (1999), a Equação 2, que modela o comportamento da f_{wc0} em função da umidade da madeira. O valor

característico de $U\%_p$ é tabelado de acordo com a espécie, mas na ausência deste valor, assume-se $U\%_p = 25$ (GREEN et al., 1999).

$$f_{wc0U\%} = f_{wc012\%} \times \left(\frac{f_{wc012\%}}{f_{wc0verde}} \right)^{\left(\frac{12-U\%}{U\%_p-12} \right)} \quad (2)$$

em que:

$f_{wc0U\%}$: Resistência à compressão axial na umidade escolhida;

$f_{wc012\%}$: Resistência à compressão axial a 12% de umidade;

$f_{wc0verde}$: Resistência à compressão axial em estado saturado de umidade;

$U\%$: Umidade escolhida para aquisição da resistência ajustada; e

$U\%_p$: Umidade na interseção de uma linha horizontal representando a resistência da madeira verde e uma linha inclinada representando o logaritmo da relação umidade e resistência para a madeira seca.

3.3.3 Rigidez pelo método não destrutivo

Para avaliar a rigidez da madeira do segundo grupo, as mesmas amostras foram utilizadas em todos os tratamentos, ou seja, as amostras iniciais de testemunhas foram também as amostras dos tratamentos posteriores dentro do grupo. Após as mensurações terem sido realizadas entre os ciclos, foi realizada a correção da rigidez para o valor referência na umidade de 12% de acordo com a NBR 7190 da ABNT (1997) com o auxílio da Equação 3.

$$MOE_{d12\%} = MOE_{dU\%} \left| 1 + \frac{2 \times (U\% - 12)}{100} \right| \quad (3)$$

em que:

$MOE_{d12\%}$: módulo de elasticidade dinâmico (rigidez) corrigido para umidade de 12%;

$MOE_{dU\%}$: módulo de elasticidade dinâmico para a umidade $U\%$; e

$U\%$: umidade da madeira.

Foram realizados testes não destrutivos com o método de aplicação de ondas acústicas para identificar o módulo de elasticidade dinâmico (MOE_d) através do uso do *Stress Wave Timer* (Figura 10).



Figura 10 – *Stress Wave Timer* (SWT)

Basicamente o equipamento opera com a mensuração do tempo de propagação de uma onda de tensão pela amostra. A onda de tensão é produzida por um pendulo fixado no conjunto de braçadeiras das bases metálicas onde são fixadas as amostras. O equipamento possui dois acelerômetros, o primeiro está na condição de *start* (na mesma base metálica do pendulo), no qual ele é responsável por verificar o pulso da onda e o transforma em um sinal elétrico, que é enviado para um console, que por sua vez inicia a contagem do tempo, a onda percorre toda a amostra até atingir o outro acelerômetro na condição de *stop*, que envia um sinal elétrico para o console que interrompe a contagem (DEL MENEZZI; SILVEIRA; SOUZA, 2010). O tempo da transmissão da onda de tensão é mostrado no *display* do console em microssegundos.

Com os valores da densidade e tempo de transmissão da onda de tensão de cada amostra, o MOE_d foi obtido utilizando a Equação 4 e 5, de acordo com especificações do manual do equipamento.

$$v_o = \frac{L}{t \times 10^{-6}} \quad (4)$$

$$MOE_d = \frac{(v_o^2 \times D)}{g} \times 10^{-5} \quad (5)$$

em que:

v_o : velocidade de propagação da onda (m/s);

MOE_d : módulo de elasticidade dinâmico (MPa);

L : distância percorrida pela onda (m);

t : tempo de trânsito da onda (μ s);

D : densidade da madeira (kg/m^3); e

g : aceleração da gravidade ($9,804 \text{ m/s}^2$).

3.3.4 Análise estatística

As amostras do primeiro e terceiro grupo foram analisadas estatisticamente por meio de uma análise de variância, seguida, caso houve-se necessidade, do teste de Tukey para determinar quais médias se diferenciam entre si.

No segundo grupo foi empregado uma análise de variância, seguida, caso houve-se necessidade, do Teste-t pareado para análise dos dados, neste tipo de análise são comparados os valores observados numa mesma amostra, ou seja, a amostra é controle de si mesma.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram segmentados de acordo com os grupos amostrados, havendo a discussão dos mesmos nas próprias segmentações.

4.1 Propriedades físicas do primeiro grupo

As amostras do primeiro grupo (E – 1.1) (Figura 11) com idade de 8 anos apresentaram umidade inicial em torno de 16%, e progrediram em ciclos de secagem até aproximadamente 0% de umidade, na qual suas propriedades físicas no decorrer dos tratamentos estão apresentadas na Tabela 6, bem como a variação de densidade, umidade e taxa de secagem de acordo com os tratamentos variando potência e tempos de exposição, onde estão apresentados nas Figuras 12 e 13, e Tabela 7 respectivamente. Na Figura 14 estão demonstrados graficamente os resultados da taxa de secagem em função das potências e do tempo de exposição, bem como demonstrado também pela Tabela 7.



Figura 11 – Amostras tipo E – 1.1 do primeiro grupo no arranjo físico utilizado no aparelho de micro-ondas

Tabela 6 – Propriedades físicas do primeiro grupo ao longo dos tratamentos

| Tratamento | Potência (W) | Densidade Aparente 16% (g/cm ³) | U(%) Inicial | 1º Perda de U% | U(%) 5,5 min | 2º Perda de U% | U(%) 11 min |
|------------|--------------|---|--------------|----------------|--------------|----------------|-------------|
| 1 | 460 | 0,586 | 16,35 | 9,32 | 7,03 | 3,72 | 3,31 |
| 2 | 600 | 0,576 | 16,13 | 12,18 | 4,17 | 2,97 | 1,20 |
| 3 | 700 | 0,580 | 16,46 | 14,00 | 2,35 | 1,94 | 0,41 |

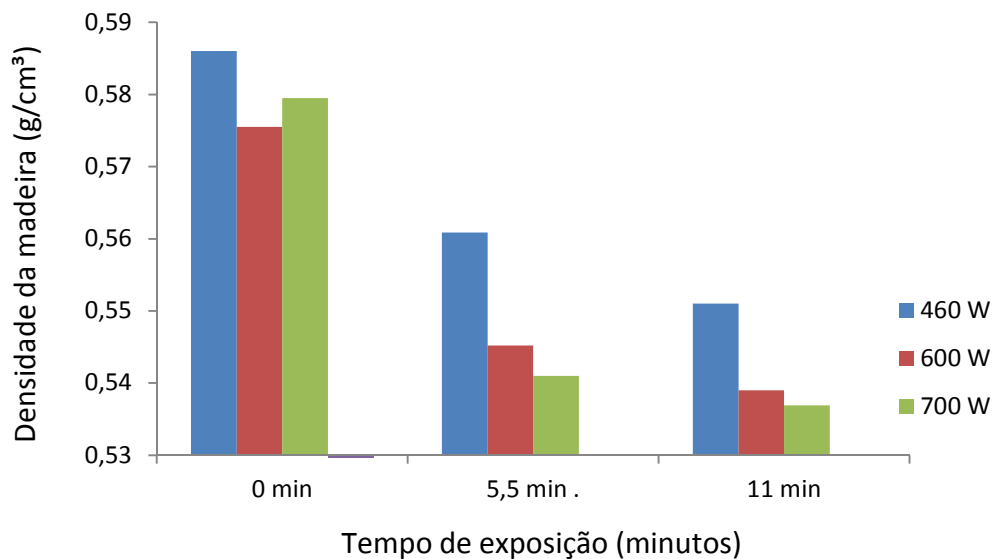


Figura 12 – Variação da densidade do primeiro grupo em função da potência e do tempo de exposição

É possível verificar que o comportamento da densidade da madeira (Figura 12) se comportou de maneira semelhante com o comportamento da umidade (Figura 13), quando submetida sob a energia de micro-ondas, e foram grandezas diretamente proporcionais para essas amostras, ou seja, quanto menor a densidade, menor a umidade. A partir das médias de densidade e umidade apresentadas na Tabela 1, realizou-se uma análise da correlação de Pearson () entre essas propriedades físicas, sendo obtido um $r = 0,979$, indicando forte correlação entre os resultados para a densidade e umidade da madeira.

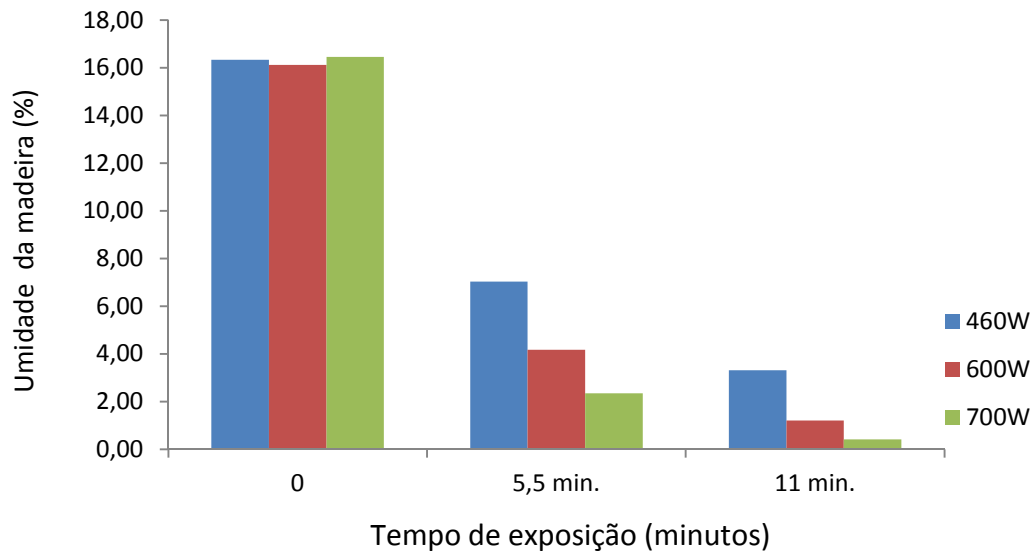


Figura 13 – Variação da umidade em função da potência e do tempo de exposição do primeiro grupo.

Tabela 7 - Taxa de secagem em função da potência e do tempo de exposição de cada ciclo do primeiro grupo

| Tratamento | Potência (W) | Taxa de Secagem (%/min) | | | | | |
|------------|--------------|-------------------------|-------|-------|---------|-------|-------|
| | | 1,5 min | 2 min | 2 min | 1,5 min | 2 min | 2 min |
| 1 | 460 | 1,434 | 1,407 | 2,178 | 0,487 | 0,943 | 0,549 |
| 2 | 600 | 2,308 | 2,621 | 1,627 | 0,359 | 0,765 | 0,449 |
| 3 | 700 | 3,552 | 2,967 | 1,424 | 0,673 | 0,220 | 0,246 |

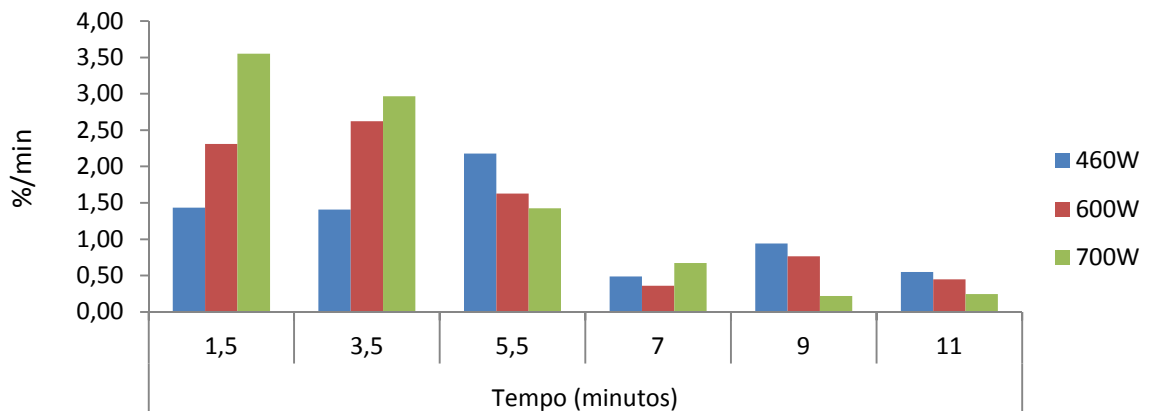


Figura 14 – Taxa de secagem em função da potência e do tempo de exposição do primeiro grupo

Conforme apresentado na Figura 14, as taxas de secagem foram maiores para as maiores potências (700, 600 e 460 W) – (Tratamento 3, 2 e 1) até o 3º minuto, a partir daí, os tratamentos 3 e 2 apresentaram amostras com uma condição de umidade muito baixa em relação às amostras do tratamento 1 (2,35 e 4,17% contra 7,03% de umidade, respectivamente), portanto, a partir do 3º minuto as amostras do tratamento 1 tinham condições de apresentar taxas de secagem superiores aos dos outros tratamentos, pois ainda tinham mais umidade para perder, e também por causa da alta constante dielétrica da água (umidade) ainda presente na madeira, na qual facilita a transformação de energia eletromagnética em calor.

Tendo em vista que houve uma pequena distorção da taxa de secagem no 7º minuto de acordo com a Figura 14, de fato, as amostras tiveram um intervalo superior de tempo em comparação aos outros ciclos, em função de mensurações mais específicas naquele ponto do ciclo, e que também o programa definiu a exposição de 1,5 minutos (Tabela 4), desta forma, eventualmente pode não ter havido tempo suficiente para o aquecimento promover uma maior distinção entre as taxas de secagem.

4.2 Propriedades mecânicas do primeiro grupo

Após serem mensuradas todas as propriedades físicas, foram realizados os ensaios mecânicos de compressão axial nas amostras E – 1.1, com isso, foram obtidos os valores de f_{wc0} para o primeiro grupo. As médias de f_{wc0} estão apresentadas na Tabela 8, sendo relacionada na Tabela 9 e demonstrada na Figura 15.

Tabela 8 – Resultados da f_{wc0} do primeiro grupo

| | Resistência à compressão axial (MPa) | | | |
|---------------|--------------------------------------|---------|----------|---------|
| | Testemunha | 460 W | 600 W | 700 W |
| Média | 48,10 ab | 49,85 a | 47,15 ab | 44,51 b |
| Desvio Padrão | 3,87 | 4,78 | 5,32 | 5,11 |
| C.V.% | 8,05 | 9,58 | 11,29 | 11,49 |

As médias seguidas por uma mesma letra na horizontal, não diferem estatisticamente (Tukey, $p > 0,05$).

Para auxiliar nas comparações entre os valores de resistência obtidos diretamente para cada amostra dos tratamentos, foi utilizada uma relação de acordo com Machado (2006), na qual é expressa pela Equação 6. As comparações da f_{wc0} do primeiro grupo estão apresentadas na Tabela 9.

$$SV_{t,p} = \frac{f_{wc0} 2^\circ}{f_{wc0} 1^\circ} \quad (6)$$

em que:

$SV_{t,p}$: Variação de resistência para um determinado período de tempo e potência;

$f_{wc0} 2^\circ$: Resistência à compressão axial após o tratamento por um período de tempo e potência; e

$f_{wc0} 1^\circ$: Resistência à compressão axial das Testemunhas.

Tabela 9 - Fator de modificação da f_{wc0} do primeiro grupo em comparações de tratamentos

| Amostras | $SV_{t,p}$ | | |
|---------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | Testemunha → 460 W | Testemunha → 600 W | Testemunha → 700 W |
| 1 | 1,03 | 0,94 | 0,90 |
| 2 | 1,02 | 0,91 | 0,89 |
| 3 | 1,03 | 0,94 | 0,90 |
| 4 | 1,04 | 0,94 | 0,91 |
| 5 | 1,05 | 1,00 | 0,91 |
| 6 | 0,99 | 0,94 | 0,89 |
| 7 | 1,00 | 0,97 | 0,90 |
| 8 | 1,03 | 0,97 | 0,92 |
| 9 | 1,02 | 1,01 | 0,91 |
| 10 | 1,02 | 1,01 | 0,92 |
| 11 | 1,02 | 0,98 | 0,89 |
| 12 | 1,04 | 0,97 | 0,90 |
| 13 | 1,06 | 1,03 | 1,00 |
| 14 | 1,11 | 1,05 | 1,01 |
| 15 | 1,07 | 1,01 | 0,99 |
| Média | 1,04 a | 0,98 ab | 0,92 b |
| Desvio padrão | 0,03 | 0,05 | 0,03 |
| C.V.% | 2,72 | 4,91 | 3,58 |

As médias seguidas por uma mesma letra na horizontal, não diferem estatisticamente (Tukey, $p>0,05$).

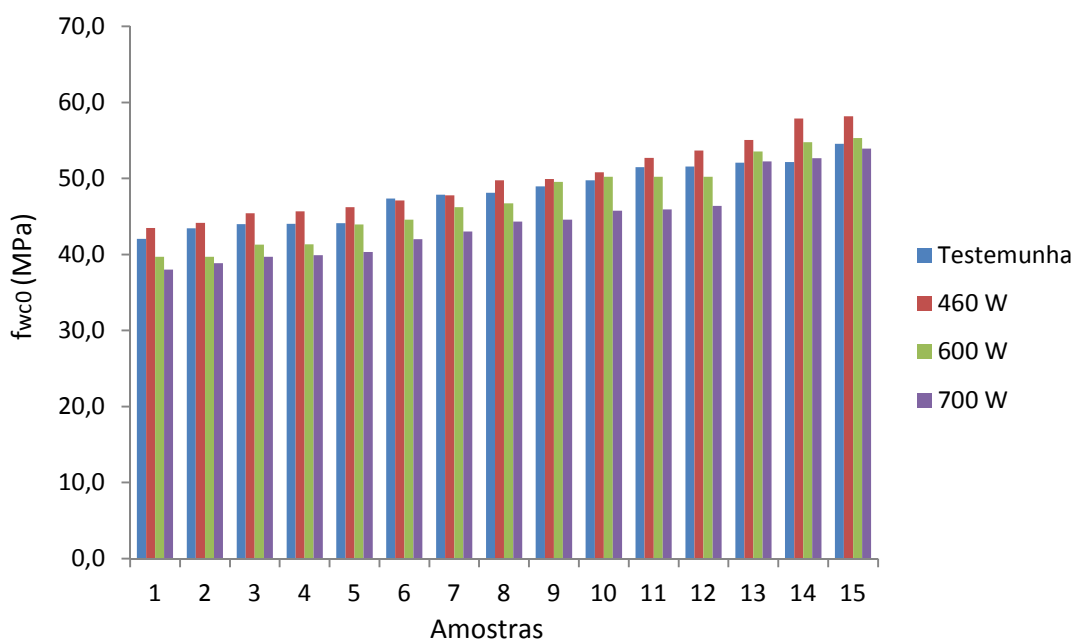


Figura 15 - Resultados da f_{wc0} em comparativo após todos os tratamentos do primeiro grupo

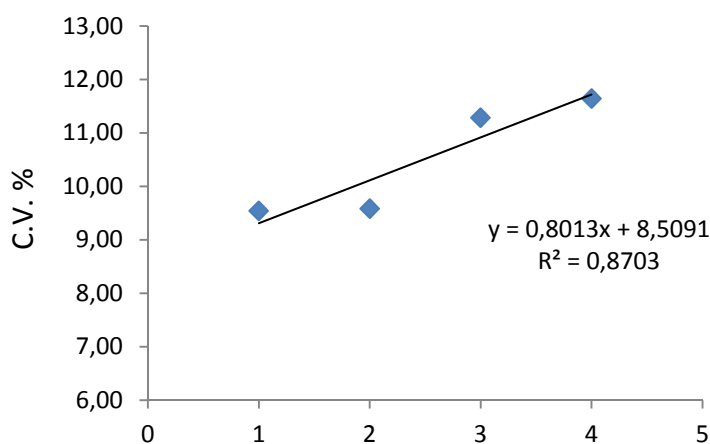


Figura 16 – Coeficiente de variação após tratamentos do primeiro grupo

Houve variação significativa entre os tratamentos a 5% de significância na análise de variância (Apêndice A), ou seja, as médias diferiram entre si.

Isto significa que para os ciclos de secagem em micro-ondas de 11 minutos nas potências de 460, 600 e 700 W para a madeira de *Eucalyptus grandis* de densidade básica de 580 kg.m⁻³, com amostras nas dimensões de 2 x 2 x 6 cm e umidade inicial de 16,31%, alcançando umidade final de 0,41%, houve interferência

da secagem por micro-ondas na resistência mecânica à compressão axial da madeira. Na qual, por meio do teste de Tukey a 5% de significância, verificou-se que a média do tratamento 1 (460 W) foi significativamente maior que a da testemunha, no entanto, o tratamento 3 (700 W) apresentou média inferior à testemunha, enquanto a média do tratamento 2 (600 W) não foi diferente, estatisticamente, da testemunha.

Em função dos resultados, verificou-se que o tratamento 1 (460 W) foi a exposição que apresentou resultados mais satisfatórios, pois além de secar a madeira da umidade inicial de 16,35% até a umidade final de 3,31%, de acordo com a Tabela 6, ainda elevou em 4% a resistência a compressão axial do primeiro grupo.

De acordo com a Figura 16, o coeficiente de variação apresentou comportamento diretamente proporcional em função do tempo de exposição e potência, sendo explicado em 87,03% pelo ajuste linear, mostrando que o processo no aparelho convencional de micro-ondas não é bem controlado.

A relação de ajuste da f_{wc0} em função da umidade para as amostras do tipo E – 1.1, foi realizada mediante o uso da Equação 2, em que, empregando-se as propriedades de f_{wc0} da madeira do primeiro grupo, de 48,78MPa para a $f_{wc0_{1\% U\%}}$ e 30,77MPa para $f_{wc0_{verde}}$ obtidos experimentalmente em paralelo, definiu-se a curva da f_{wc0} em relação à umidade da madeira (Figura 17).

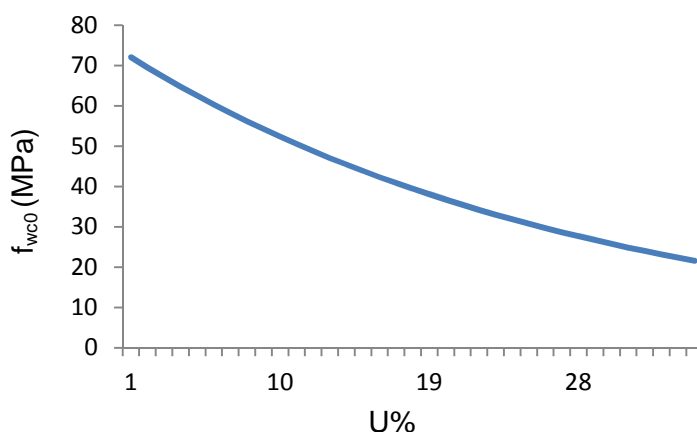


Figura 17 – Curva da f_{wc0} em relação à umidade da madeira do primeiro grupo

A partir da curva característica obtida para a f_{wc0} em relação à umidade da madeira do primeiro grupo, foi possível comparar todos os resultados da f_{wc0} medidos após a exposição às micro-ondas, sendo estimados de acordo com a

umidade da amostra. A comparação entre a f_{wC0} medida experimentalmente e a f_{wC0} estimada para a testemunha (sem tratamento) de acordo com a variação de umidade está apresentada nas Figuras 18, 19, 20 e 21.

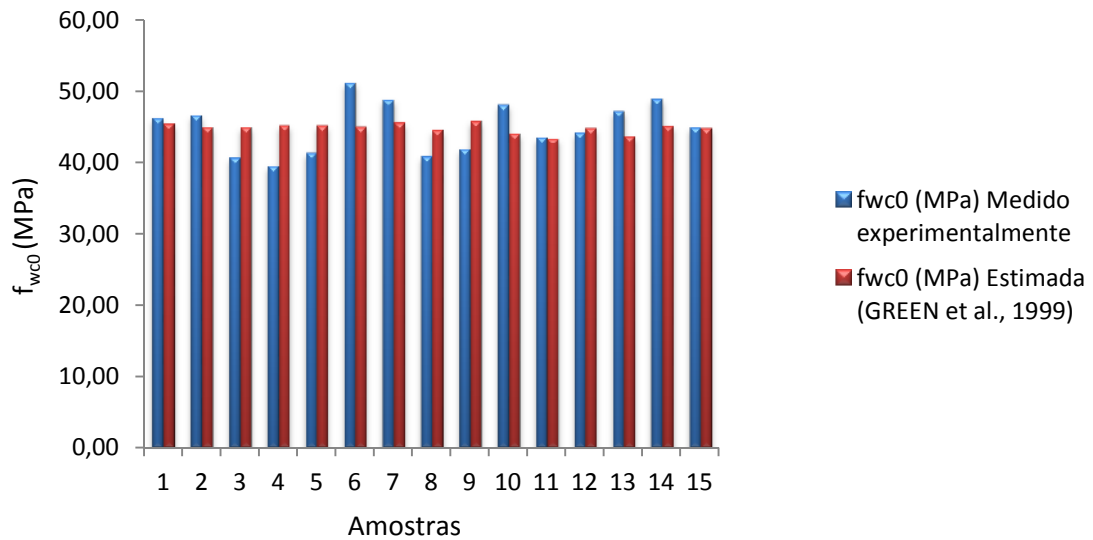


Figura 18 - Comparações das f_{wC0} da Testemunha do primeiro grupo

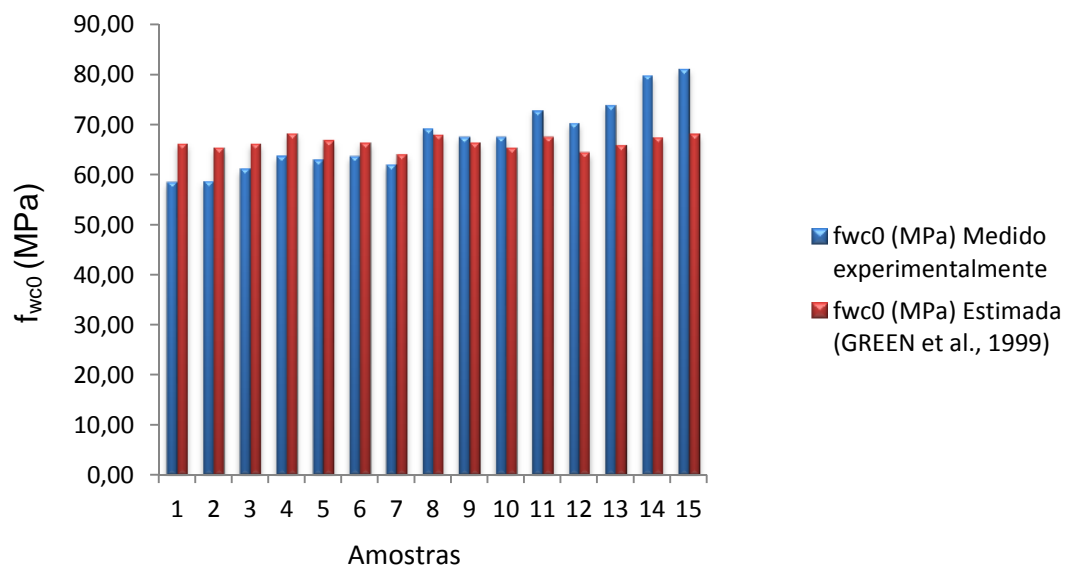


Figura 19 - Comparações das f_{wC0} após tratamento em 460W do primeiro grupo

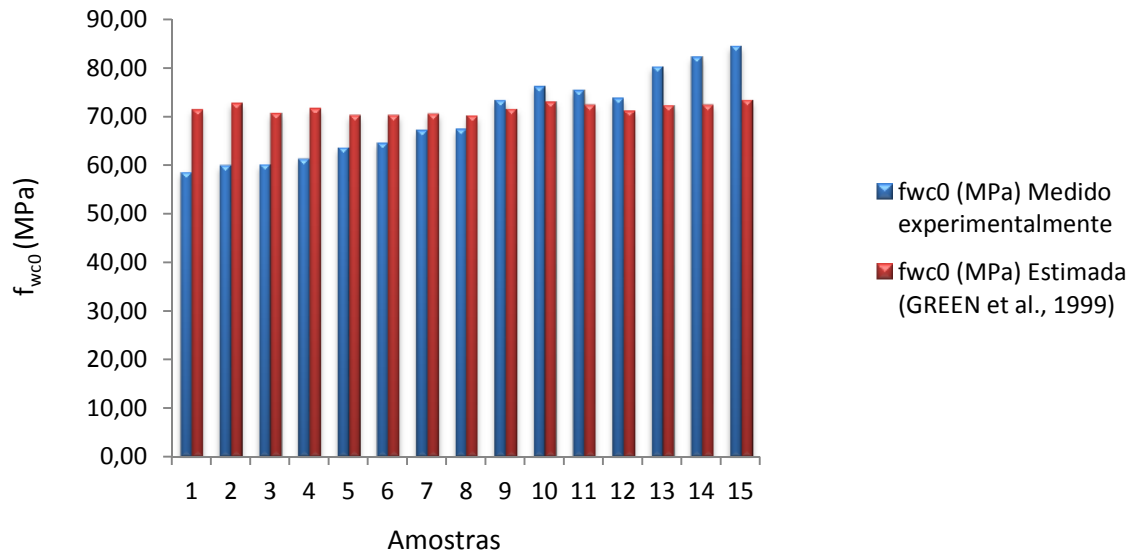


Figura 20 - Comparações das f_{wc0} após tratamento em 600W do primeiro grupo

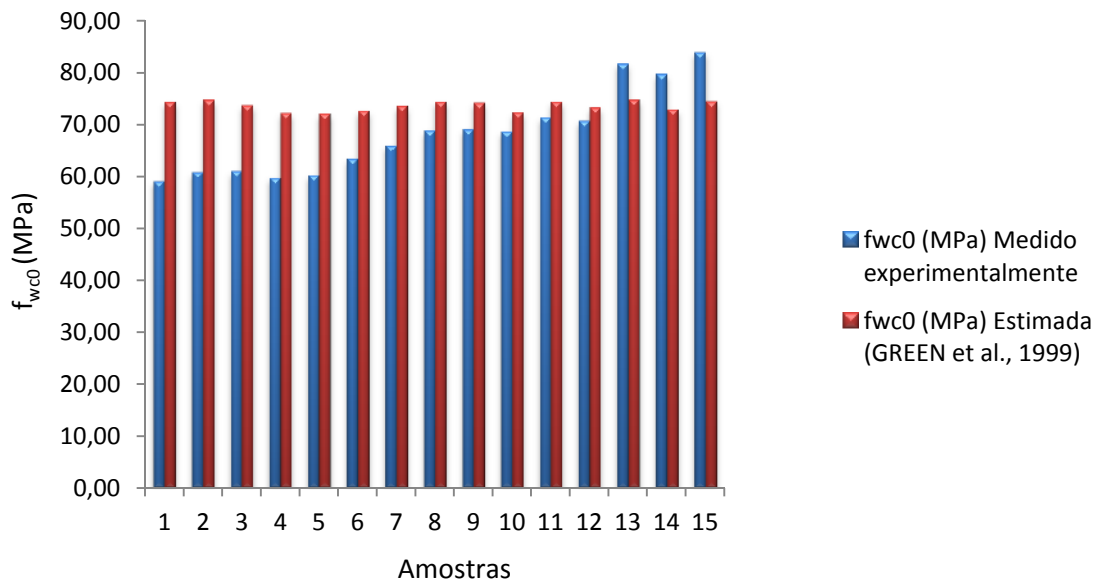


Figura 21 - Comparações das f_{wc0} após tratamento em 700W do primeiro grupo

4.3 Propriedades físicas do segundo grupo

As amostras do segundo grupo (E – 1.2) (Figura 22) com idade de 8 anos apresentaram umidade inicial em torno de 19%, e progrediram em ciclos de secagem até aproximadamente 4% de umidade, na qual suas propriedades físicas no decorrer dos tratamentos estão apresentadas na Tabela 10, bem como a variação da umidade (Figura 23), densidade (Tabela 11 e Figura 24) e taxa de secagem (Tabela 12 e Figura 25) de acordo com os tratamentos variando os tempos de exposições.



Figura 22 – Amostras do tipo E – 1.2 do segundo grupo

Tabela 10 – Propriedades físicas da madeira ao longo dos tratamentos do segundo grupo

| Tratamento | Potência (W) | Densidade Aparente 12% (g/cm ³) | U(%) Inicial | 1º Perda de U% | U(%) 5,5 min | 2º Perda de U% | U(%) 11 min |
|------------|--------------|---|--------------|----------------|--------------|----------------|-------------|
| 1 | 460 | 0,590 | 19,191 | 12,083 | 7,108 | 2,733 | 4,375 |

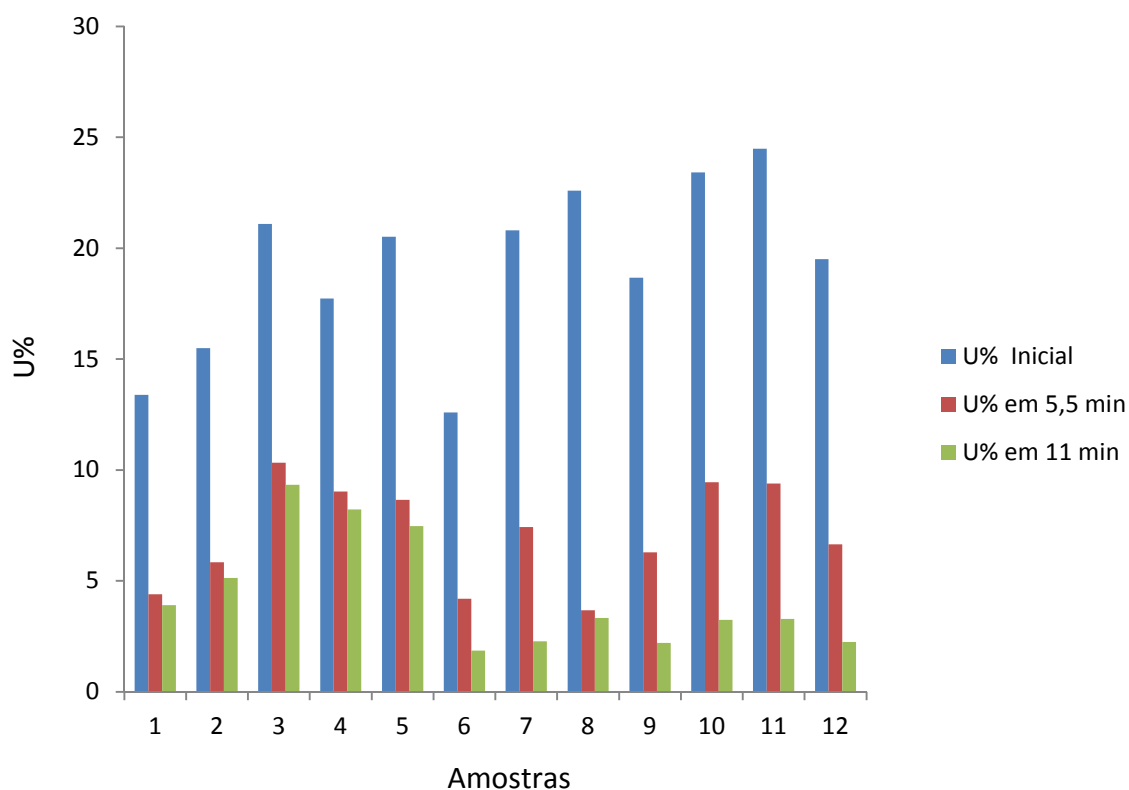


Figura 23 – Umidade do segundo grupo ao longo do tempo de exposição

A partir das Figuras 23 e 24 que demonstram respectivamente o comportamento da umidade e densidade ao longo da exposição, verificou-se novamente uma forte correlação de Pearson () na análise entre essas propriedades físicas, em que foi obtido um $r = 0,987$, indicando forte correlação entre os resultados para a densidade e umidade da madeira. Essa informação corrobora ainda mais para a consistência das observações realizadas para o primeiro grupo, uma vez que, foi utilizado o mesmo tipo de madeira (material genético) para o segundo grupo.

Tabela 11 – Variação da densidade em função do tempo de exposição do segundo grupo

| Grupo | Potência (W) | Densidade (g/cm ³) | | |
|-------|--------------|--------------------------------|-------------|------------|
| | | Inicial | 5,5 minutos | 11 minutos |
| 1 | 460 | 0,677 | 0,550 | 0,548 |

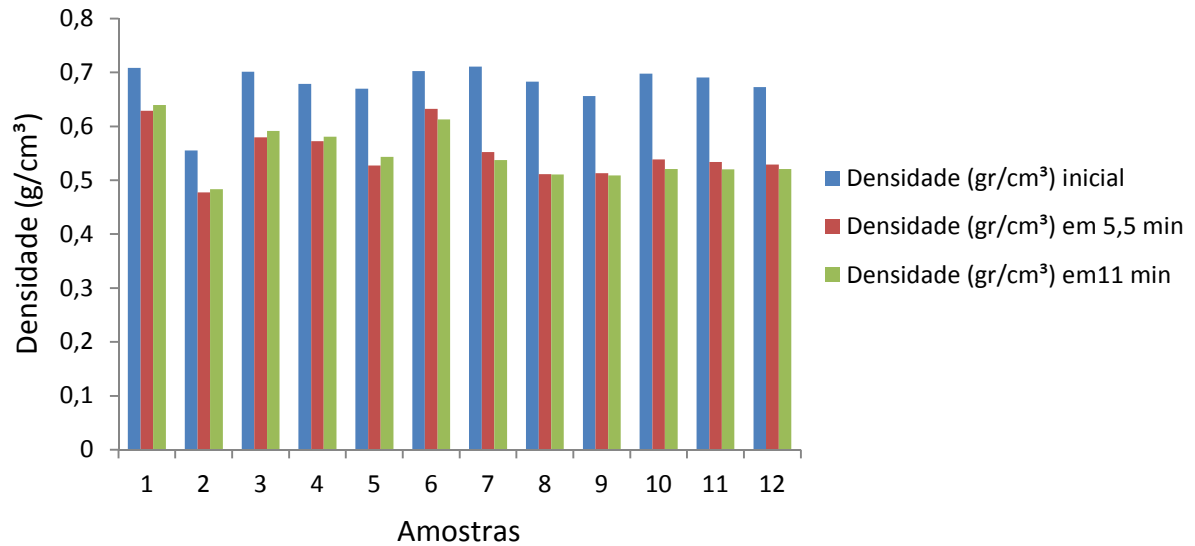


Figura 24 – Densidade do segundo grupo ao longo do tempo de exposição

Tabela 12 - Taxa de secagem em função das potências e do tempo de exposição do segundo grupo

| Grupo | Potência (W) | Taxa de Secagem (%/min) / Ciclos | | | | | |
|-------|--------------|----------------------------------|-------|-------|---------|-------|-------|
| | | 1,5 min | 2 min | 2 min | 1,5 min | 2 min | 2 min |
| 1 | 460 W | 2,212 | 2,021 | 1,922 | 0,422 | 0,815 | 1,135 |

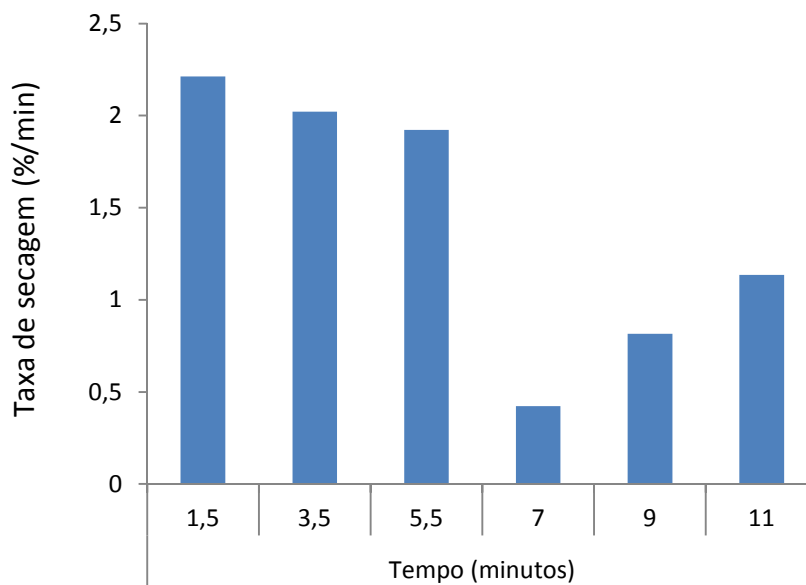


Figura 25 – Taxas de secagem do segundo grupo

As taxas de secagem do segundo grupo apresentadas na Figura 25, demonstram que os maiores valores foram obtidos no início da secagem, e isto é compreendido pelo fato de que a água possui grande constante dielétrica, ou seja, interage facilmente com as micro-ondas, portanto, quanto menos quantidade de água nas amostras nos ciclos sucessores, menor a taxa de secagem.

A partir do 7º minuto houve inversão do padrão inicial verificado na Figura 25, em função de que após o 5º minuto as amostras foram testadas no STW para aferição do MOE_d , estando as amostras à temperatura ambiente e com pouca umidade (~7%). Portanto, ao continuar nos ciclos a partir do 7º minuto, apresentou taxas de secagem crescentes, consequência da capacidade não limitante de aumento da entalpia nas amostras. Uma explicação para o fenômeno, é que elas ainda estavam aquecendo em função da lenta absorção de energia das micro-ondas de acordo com a reduzida quantidade de água, que é a principal fonte de transformação de energia eletromagnética em aquecimento.

4.4 Propriedades mecânicas do segundo grupo

Durante os tratamentos e os períodos de aquisição das informações relacionadas às propriedades físicas, foram também realizados testes não destrutivos para obtenção da rigidez das amostras do segundo grupo por meio do SWT. As informações relacionadas ao MOE_d das amostras E – 1.2 estão apresentadas nas Tabelas 13 e 14, bem como na Figura 26.

Tabela 13 – Variação da rigidez ao longo do tempo de exposição do segundo grupo.

| Amostras | MOE_d (MPa) | | |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | Testemunha | 5,5 minutos | 11 minutos |
| Média | 13792,21 a | 11134,88 b | 10639,23 b |
| Desvio padrão | 1130,34 | 1064,66 | 1280,29 |
| C.V.% | 8,20 | 9,56 | 12,03 |

As médias seguidas por uma mesma letra na horizontal, não diferem estatisticamente (Teste-t, $p>0,05$)

De acordo com a análise estatística gerada pela aplicação do Teste-t pareado (Apêndice B), verificou-se que houve diferença significativa entre os tratamentos, em

que, para a propriedade mecânica de rigidez os tratamentos de 5,5 e 11 minutos diminuiriam significativamente em 19 e 23%, respectivamente o MOE_d das amostras do segundo grupo. Foi encontrado por Machado (2006) uma diminuição da resistência mecânica à compressão axial de 10 e 20% para a madeira de carvalho, nas exposições a 550 W em 5 e 10 minutos, respectivamente. Embora, não exista boa correlação entre as propriedades de resistência à compressão e módulo de elasticidade.

Independente do método utilizado para secar a madeira, o mesmo deve ser ajustado aos fatores limitantes do material, desta forma, foi relatado que mesmo em uma pequena variação do tamanho das peças (E - 1.1 comparado ao E - 1.2), houve resultados expressivamente diferentes, e isto pode estar associado ao maior tempo que os gases voláteis e o vapor da umidade em alta temperatura levam para sair da amostra, eventualmente modificando a estrutura e os componentes anatômicos durante esse tempo, muitas vezes promovendo microfissuras internamente às amostras (MIURA, 2004).

Tabela 14 – Fator de modificação do MOE_d do segundo grupo.

| Amostras | $SV_{t,p}$ | |
|---------------|--------------------------|-------------------------|
| | Testemunha → 5,5 minutos | Testemunha → 11 minutos |
| 1 | 0,95 | 0,96 |
| 2 | 0,81 | 0,80 |
| 3 | 0,86 | 0,88 |
| 4 | 0,83 | 0,87 |
| 5 | 0,81 | 0,84 |
| 6 | 0,85 | 0,77 |
| 7 | 0,77 | 0,67 |
| 8 | 0,68 | 0,67 |
| 9 | 0,76 | 0,70 |
| 10 | 0,80 | 0,71 |
| 11 | 0,82 | 0,73 |
| 12 | 0,77 | 0,70 |
| Média | 0,81 b | 0,77 b |
| Desvio padrão | 0,07 | 0,10 |
| C.V.% | 8,04 | 12,33 |

As médias seguidas por uma mesma letra na horizontal, não diferem estatisticamente (Teste-t, $p > 0,05$)

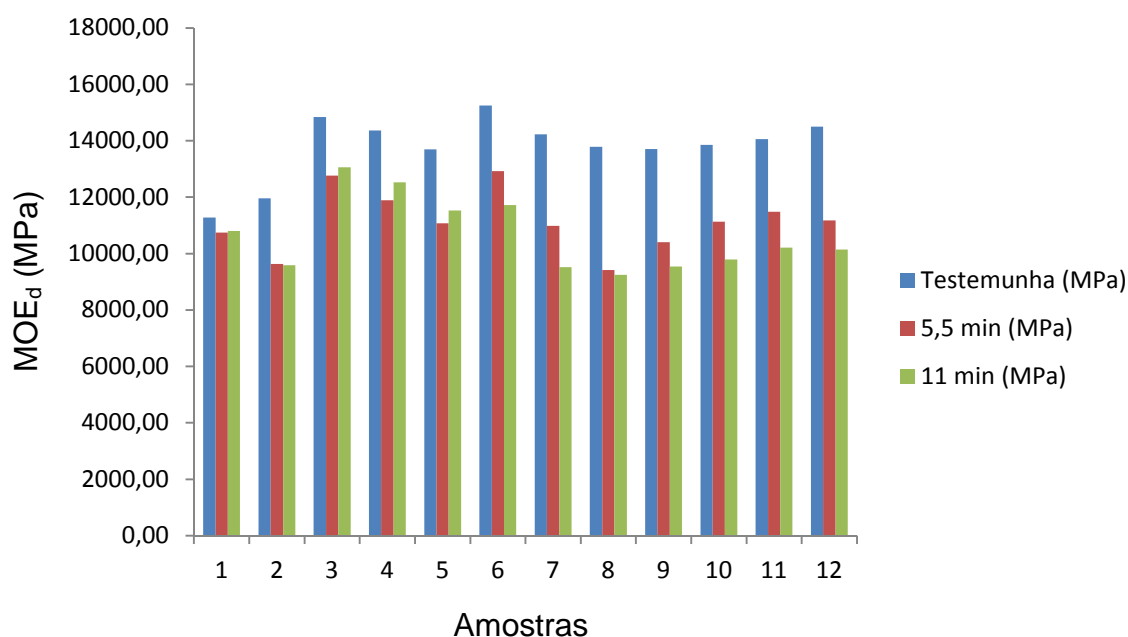


Figura 26 – MOE_d do segundo grupo ao longo do tempo de exposição

4.5 Propriedades físicas do terceiro grupo

As amostras do terceiro grupo (E – 2) (Figura 27) com idade de 34 anos apresentaram umidade inicial em torno de 12%, e progrediram em ciclos de secagem até aproximadamente 5% de umidade, na qual suas propriedades físicas no decorrer dos tratamentos estão apresentadas na Tabela 15, bem como a taxa de secagem em função dos tempos de exposições estando representados na Tabela 16 e nas Figuras 28 e 29.

As taxas de secagem dos subgrupos de 5 e 10 min de exposição (Figuras 28 e 29), obtiveram seus comportamentos explicados em 94,60% e 90,96%, respectivamente.



Figura 27 - Amostras do tipo E – 2 do terceiro grupo

Tabela 15 – Propriedades físicas da madeira ao longo dos tratamentos do terceiro grupo

| Tratamento | Potência (W) | Densidade Aparente 12% (g/cm ³) | U(%) Inicial | 1º Perda de U% | U(%) 5 min | 2º Perda de U% | U(%) 10 min |
|------------|--------------|---|--------------|----------------|------------|----------------|-------------|
| 1 | - | | 12,35 | - | - | - | - |
| 2 | 460 | 0,81 | 12,55 | 4,15 | 8,40 | - | - |
| 3 | | | 12,60 | 4,18 | 8,43 | 2,59 | 5,83 |

Tabela 16 - Taxa de secagem em função do tempo de exposição do terceiro grupo

| Subgrupo | Tempo (min) | Taxa de Secagem (%/min) | | | | | | | | | |
|----------|-------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | | 1 min | 2 min | 3 min | 4 min | 5 min | 6 min | 7 min | 8 min | 9 min | 10 min |
| 1 | 5 | 0,98 | 0,97 | 0,83 | 0,76 | 0,61 | - | - | - | - | - |
| 2 | 10 | 0,95 | 0,99 | 0,95 | 0,76 | 0,51 | 0,47 | 0,43 | 0,37 | 0,28 | 0,32 |

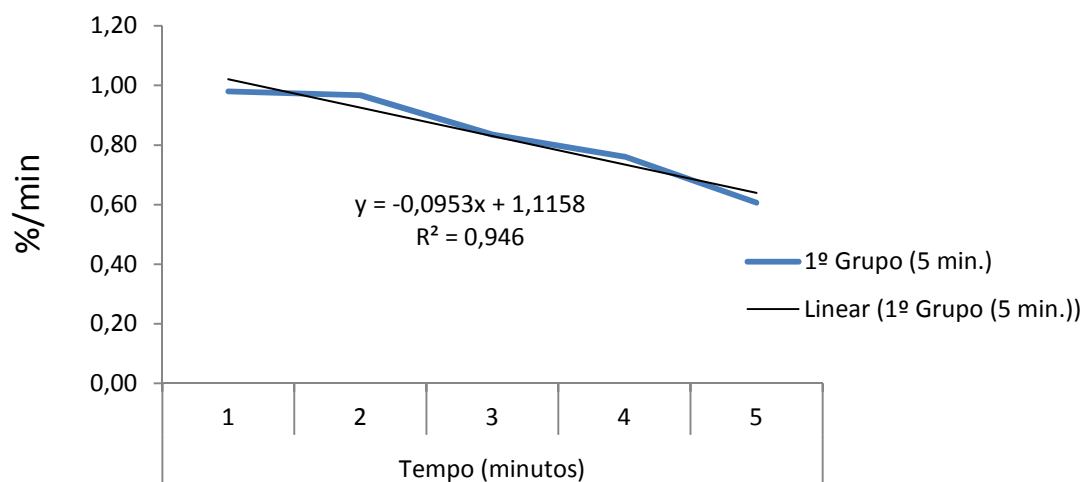


Figura 28 – Taxa de secagem do 1º Subgrupo do terceiro grupo

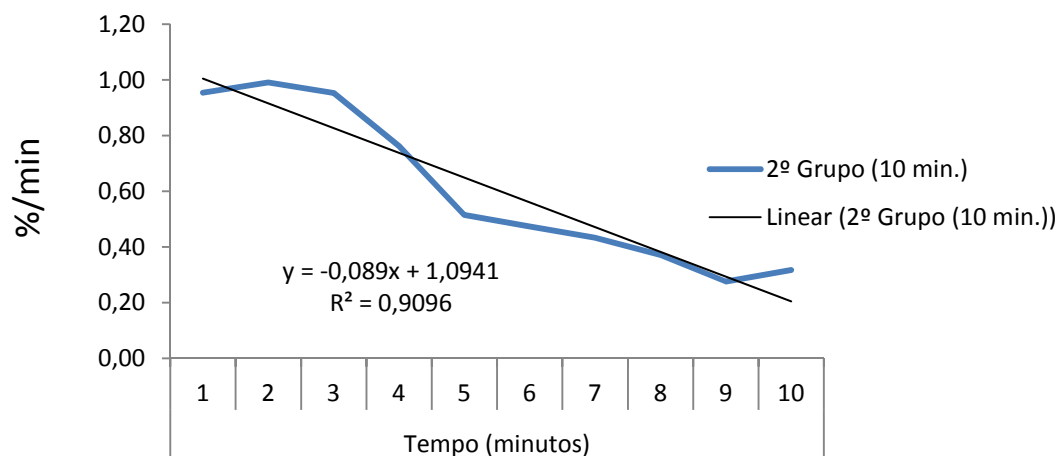


Figura 29 – Taxa de secagem do 2º Subgrupo do terceiro grupo

4.6 Propriedades mecânicas do terceiro grupo

Após serem mensuradas todas as propriedades físicas, foram realizados os ensaios mecânicos de compressão axial nas amostras E – 2, com isso, foram obtidos os valores de f_{wc0} para o primeiro grupo. As médias de f_{wc0} estão apresentadas nas Tabelas 17, bem como na Figura 30.

Tabela 17 – Resultados da f_{wco} do terceiro grupo

| Amostras | Testemunha | f_{wco} (MPa) | |
|---------------|------------|-----------------|------------|
| | | 5 minutos | 11 minutos |
| Média (MPa) | 72,54 | 73,05 | 73,72 |
| Desvio padrão | 2,95 | 4,13 | 6,00 |
| C.V.% | 4,06 | 5,65 | 8,14 |

Os valores de resistência obtidos para os tratamentos do terceiro grupo foram comparados com os valores de resistência obtidos para as testemunhas, estando apresentados na Tabela 18, sendo possível notar que as razões entre a resistência antes e depois dos tratamentos não se alteram, ou seja, o $SV_{t,p}$ foi de aproximadamente 1.

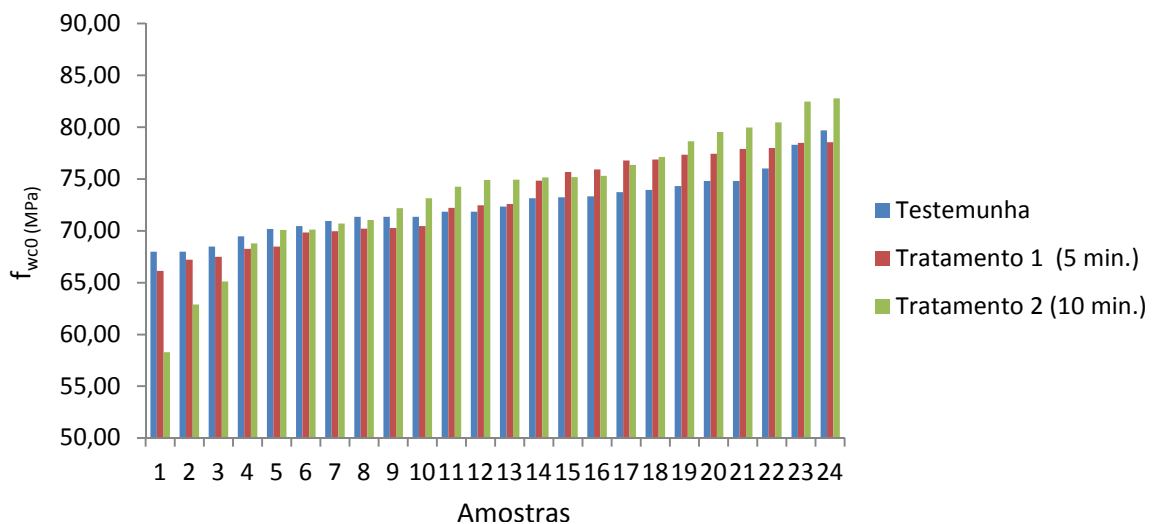


Figura 30 – Comparações das f_{wco} entre os tratamentos ao longo da exposição do terceiro grupo

Tabela 18 - Fator de modificação da f_{wC0} do terceiro grupo em comparações de tratamentos

| Amostras | $SV_{t,p}$ | |
|---------------|------------------------|-------------------------|
| | Testemunha → 5 minutos | Testemunha → 10 minutos |
| 1 | 0,973 | 0,881 |
| 2 | 0,989 | 0,936 |
| 3 | 0,986 | 0,965 |
| 4 | 0,983 | 1,008 |
| 5 | 0,976 | 1,024 |
| 6 | 0,991 | 1,004 |
| 7 | 0,986 | 1,010 |
| 8 | 0,984 | 1,012 |
| 9 | 0,985 | 1,027 |
| 10 | 0,987 | 1,038 |
| 11 | 1,005 | 1,028 |
| 12 | 1,008 | 1,034 |
| 13 | 1,003 | 1,032 |
| 14 | 1,023 | 1,004 |
| 15 | 1,033 | 0,993 |
| 16 | 1,035 | 0,992 |
| 17 | 1,041 | 0,994 |
| 18 | 1,040 | 1,003 |
| 19 | 1,040 | 1,017 |
| 20 | 1,035 | 1,027 |
| 21 | 1,041 | 1,027 |
| 22 | 1,026 | 1,032 |
| 23 | 1,003 | 1,051 |
| 24 | 0,986 | 1,054 |
| Média | 1,007a | 1,008a |
| Desvio padrão | 0,02 | 0,04 |
| C.V.% | 2,41 | 3,72 |

As médias seguidas por uma mesma letra na horizontal, não diferem estatisticamente (Tukey, $p>0,05$).

Não houve variação significativa entre os tratamentos (Apêndice C), ou seja, as médias não diferem entre si. Isso quer dizer que, para esses ciclos de secagem em micro-ondas de 5 e 10 minutos, na potência de 460 W para a madeira de *Eucalyptus grandis* de densidade básica de 810 kg.m^{-3} , com amostras nas dimensões de $2 \times 2 \times 3 \text{ cm}$ e umidade inicial de aproximadamente 12%, alcançando umidade final em torno de 5%, não houve interferência da secagem por micro-ondas na resistência mecânica à compressão axial das amostras.

5 CONCLUSÕES

A madeira de eucalipto de idade adulta (34 anos) não sofreu alterações significativas de suas propriedades de resistência mecânica à compressão paralela. Já a madeira do eucalipto com oito anos (lenho jovem), teve suas propriedades afetadas significativamente, no qual em geral, todos os tratamentos apresentaram uma diminuição da rigidez, e para a resistência à compressão axial, o primeiro tratamento (460 W) apresentou diferença significativa maior que a testemunha, no entanto, para o tratamento 3 (700 W), foi obtido uma diminuição significativa da resistência, por outro lado, tratamento 2 (600W) não apresentou variação significativa entre a testemunha.

Os resultados obtidos devem-se eventualmente a alguns fatores da madeira e condições experimentais (ciclos de exposição):

- A madeira adulta apresentava densidade superior de 810 kg.m^{-3} contra 600 kg.m^{-3} da madeira jovem, esse fator em geral promove maior resistência da parede celular da madeira mais densa, tornando-a mais resistente as alterações morfológicas das estruturas, em função do tratamento às micro-ondas promover aumento de pressão e temperatura no interior da madeira;

- A madeira jovem passou por um ciclo de variação de umidade mais agressiva, tornando-a mais sensível a variações das propriedades em função da variabilidade genética intrínseca do material, e, do processo não ser muito bem controlado, pois os coeficientes de variações sempre aumentaram em função da exposição às micro-ondas.

Foi verificado também, que o tamanho das peças influencia expressivamente na utilização dos ciclos de secagem, desta forma, para a utilização racional da secagem em micro-ondas, deve-se ter os parâmetros muito bem definidos de: potência, tempo, propriedades dielétricas e dimensões das peças para o material a ser seco. Não sendo um procedimento muito distinto ao qual é aplicado em processos de secagem convencional atualmente.

Em geral, o resultado mais satisfatório observado em função das peculiaridades do processo de secagem em micro-ondas, foi a secagem da madeira de 34 anos de idade com densidade de 810 kg.m^{-3} , e com os ciclos de duração de 1 minuto entre intervalos.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE - ABIMCI. **Implicações do uso do eucalipto para produtos de madeira sólida**. p. 1-6. 2004. (Artigo Técnico, 29).

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. Standard Test Methods for small clear specimens of timber. West Conshohocken. **D143**. 2000.

AFZAL, M. T.; COLPITTS, B.; GALIK, K. **Dielectric properties of softwood species measured with an open-ended coaxial probe**. The 8th International IUFRO Wood Drying Conference. 24–29 Ago., Brasov, Romênia, p. 110–115. 2003.

ANANIAS, R. A.; DIAZ, C.; LEANDRO, L. Estudio preliminar de la contracción y el colapso en *Eucalyptus nitens*. **Maderas, Ciencia y tecnología**, Concepción, v. 11, n. 3, 2009.

BRODIE, G. I. **Innovative Wood Drying: Applying microwave and solar technologies to wood drying**. Saarbrücken: VDM Verlag. 2008.

CARMO, A. G. O. **Avaliação do potencial preservativo dos extratos do cerne no alburno da madeira de *Corymbia citriodora* (Hook.) K.d. Hill & I.a.s. Johnson**. 2008. 24 f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) - Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica. 2008.

CRC. **CRC Wood Innovations: torgvin e vintorg**. 2005. Disponível em: <<http://www.crcwood.unimelb.edu.au/science/torgvin.html> >. Acesso em: 11 set. 2011.

DEL MENEZZI, C. H. S.; SILVEIRA, R. R.; SOUZA, M. R. Estimativa das propriedades de flexão estática de seis espécies de madeiras amazônicas por meio da técnica não- destrutiva de ondas de tensão. **Acta Amazonica**. Manaus, v.40, n.2, 2010. p 325 - 332.

GARCIA, J. N. Técnicas de desdobro de eucalipto. In: Seminário internacional de utilização de madeira de eucalipto para serraria, 1995, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IPEF, 1995. p. 59-67.

GHANDEHR. **Ghandehr tecnologia avançada: o uso de micro-ondas e do Wawdry System na indústria madeireira**. 2005. Disponível em: <<http://www.ghandehr.com.br>>. Acesso em: 01 ago. 2011.

GREEN, D. W.; WINANDY, J. E.; KRETSCHMANN, D. E. **Mechanical properties of wood**. Wood handbook: wood as an engineering material. Madison, WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999.

HANSSON, L.; ANTTI, L. **Design and performance of an industrial microwave drier for on-line drying of wood components**. The 8th International IUFRO Wood Drying Conference. 24–29 Ago., Brasov, Romênia, p. 156–158. 2003.

HANSSON, L. **Microwave Treatment of Wood**. 2007. 137 f. Tese (Doutorado em Física da Madeira) - Skellefteå Campus, Luleå University of Technology, Skellefteå.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO 3787. **Wood – Determination of ultimate stress in compression parallel to grain**. International Organization for Standardization. 1976.

JAMES, W. L. **Dielectric properties of wood and hardboard**: variation with temperature, frequency, moisture content and grain orientation. USDA, Forest Service, Research Paper FPL-245. 1975.

JAMES, W. L.; YEN, Y. H.; KING, R. J. **A microwave method for measuring moisture content, density and grain angle of wood**. USDA, Forest Products Laboratory, Research Note FPL-0250. 1985.

LIN, R. T. Review of the dielectric properties of wood and cellulose. **Forest Products Journal**, v. 17, n. 7, 1967. p. 61-66.

LUNDGREN, N. **Microwave sensors for scanning of sawn timber**. 2007. 115 f. Tese (Doutorado em Física da Madeira) - Skellefteå Campus, Luleå University of Technology, Skellefteå. 2007.

MACHADO, J. S. Effect of microwave treatment on oak compression strength. **Silva Lusitana**, v. 14, n 1, p. 51-58. 2006.

MIURA, M. *et al.* Rapid pyrolysis of wood block by microwave heating. **J. Anal. Appl. Pyrolysis**, v. 71, 2004. p.187-199.

RESCH, H. High-frequency electric current for drying of wood - historical perspectives. **Maderas, Cienc. tecnol.**, Concepción, v. 8, n. 2, 2006. Disponível em: <http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2006000200001&lng=es&nrm=iso>. Acesso em: 30 out. 2011.

OLOYEDE, A.; GROOMBRIDGE, P. The influence of microwave heating on the mechanical properties of wood. **J. Mater. Process. Technol.** v. 100, s.n, 2000. p. 67-73.

SANTINI, E. J.; TOMASELLI, I. **Colapso na madeira e algumas experiências brasileiras**. Curitiba: FUPEF, 1980. 21p. (Série Técnica, 3).

SMITH, W.B., SCHNEIDER, P.F., RESCH, H. Rapid fixation of CCA wood preservative with electromagnetic energy. **Forest Product Journal**, v. 46, 1996. p. 47-51.

TERZIEV, N. **Effect of high temperature and microwave treatment on microstructure of softwoods**. In 4th COST E15 Workshop on Methods for improving drying quality of wood, Santiago de Compostela, Espanha. 2002.

TORGOVNIKOV, G. **Dielectric properties of wood and wood-based materials**. Springer-Verlag. New York. 1993.

TORGOVNIKOV, G.; VINDEN, P. J. R. **Advances in microwave and radio frequency processing**. Alemanha: Springer – Verlag, 2002. p. 303-311.

TORGOVNIKOV, G.; VINDEN, P. J. R. Microwave Wood Modification Technology and Its Applications. **Forest Products Journal**. v. 60, n. 2, p. 84-92. 2010.

VINDEN, P.; TORGOVNIKOV, G. **The physical manipulation of wood properties using microwave**. Proceedings, International Conference of IUFRO, The Future of Eucalypts for Wood Production, 19–24 Março, Tasmania, Australia, p.240–247. 2000.

VINDEN, P. J. R.; TORGOVNIKOV, G. **A method for increasing the permeability of wood**. U.S. Patent No. 6,596,975. 2003.

WAUGH, G. **CRC Wood Innovations: removing growth stresses in fast-grown plantation hardwoods**. 2005. Disponível em: <<http://www.crcwood.unimelb.edu.au/research/growth.html>>. Acesso em: 10 set. 2011.

WILKINSON, N. **Microwaves and wood processing: uso de micro-ondas no setor industrial madeireiro e demais setores**. 2004. Disponível em: <<http://www.crcwood.unimelb.edu.au/docs/factsheets/microwaves.pdf>>. Acesso em: 30 set. 2011.

ZHAO, X.; YAN, L.; HUANG, K. **Review of numerical simulation of microwave heating process**: Advances in Induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials, Stanisław Grundas (Ed.), InTech, Disponível em: <<http://www.intechopen.com/articles/show/title/review-of-numerical-simulation-of-microwave-heating-process>>. 2011.

APÊNDICES

Apêndice A – Análise estatística da resistência mecânica entre as amostras do primeiro grupo

| Fontes de Variação | Graus de Liberdade | Soma de Quadrados | Quadrados Médios | F |
|--------------------|--------------------|-------------------|------------------|--------|
| Tratamentos | 3 | 224,1213 | 74,70712 | 3,239* |
| Resíduos | 56 | 1291,735 | 23,06670 | |

* Significativo a 5% de probabilidade

Apêndice B – Análise estatística da rigidez entre as amostras do segundo grupo

Apêndice B.1 - Análise de variância entre a Testemunha e o Tratamento 1 (5,5 min.).

| Fontes de Variação | Graus de Liberdade | Soma de Quadrados | Quadrados Médios | F |
|--------------------|--------------------|-------------------|------------------|---------|
| Tratamentos | 1 | .4236831E+08 | .4236831E+08 | 35,143* |
| Resíduos | 22 | .2652288E+08 | 1205585 | |

* Significativo a 5% de probabilidade;

Apêndice B.1.1 – Médias para o Teste-t pareado entre a Testemunha e o Tratamento 1 (5,5 min.).

| Tratamentos | Dados | Média (MPa) | Desvio | Erro padrão |
|-----------------|-------|-------------------|---------|-------------|
| Testemunha | 12 | 13792,21 a | 1130,34 | 326,31 |
| (1) 5,5 minutos | 12 | 11134,88 b | 1064,65 | 307,34 |

As médias seguidas por uma mesma letra, em cada coluna, não diferem estatisticamente (Teste-t, $p > 0,05$)

Apêndice B.1.2 – Teste-t pareado entre a Testemunha e o Tratamento 1 (5,5 min.).

| Variâncias | T | GL | Probabilidade | F | GL 1 | GL 2 | Probabilidade |
|---------------|--------|------|---------------|---------|------|------|---------------|
| Homogênea | 5,9282 | 22,0 | .0000 | 1,0617* | 11 | 11 | 0,4613 |
| Não homogênea | 5,9282 | 21,9 | .0000 | | | | |

* Significativo a 5% de probabilidade

Apêndice B.2 - Análise de variância entre a Testemunha e o Tratamento 2 (11 min.).

| Fontes de Variação | Graus de Liberdade | Soma de Quadrados | Quadrados Médios | F |
|--------------------|--------------------|-------------------|------------------|---------|
| Tratamentos | 1 | .5964752E+08 | .5964752E+08 | 40,899* |
| Resíduos | 22 | .3208491E+08 | 1458405 | |

* Significativo a 5% de probabilidade;

Apêndice B.2.1 – Médias para o Teste-t pareado entre a Testemunha e o Tratamento 2 (11 min.).

| Tratamentos | Dados | Média (MPa) | Desvio | Erro padrão |
|----------------|-------|-------------|---------|-------------|
| Testemunha | 12 | 13792,21 a | 1130,34 | 326,302 |
| (2) 11 minutos | 12 | 10639,23 b | 1280,29 | 369,587 |

As médias seguidas por uma mesma letra, em cada coluna, não diferem estatisticamente (Teste-t, $p > 0,05$)

Apêndice B.2.2 – Teste-t pareado entre a Testemunha e o Tratamento 2 (11 min.).

| Variâncias | T | GL | Probabilidade | F | GL 1 | GL 2 | Probabilidade |
|---------------|--------|------|---------------|---------|------|------|---------------|
| Homogênea | 6,3952 | 22,0 | .0000 | 1,1327* | 11 | 11 | 0,4200 |
| Não homogênea | 6,3952 | 21,7 | .0000 | | | | |

* Significativo a 5% de probabilidade

Apêndice B.3 - Análise de variância entre o Tratamento 1 e o Tratamento 2.

| Fontes de Variação | Graus de Liberdade | Soma de Quadrados | Quadrados Médios | F |
|--------------------|--------------------|-------------------|------------------|---------------------|
| Tratamentos | 1 | 1474007 | 1474007 | 1,063 ^{ns} |
| Resíduos | 22 | .3049890E+08 | 1386314 | |

* Significativo a 5% de probabilidade; ^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade pelo Teste t.

Apêndice B.3.1 – Médias para o Teste-t pareado entre o Tratamento 1 e o Tratamento 2.

| Tratamentos | Dados | Média (MPa) | Desvio | Erro padrão |
|----------------|-------|-------------------|----------|-------------|
| (1) 5 minutos | 12 | 11134,88 b | 1064,663 | 307,342 |
| (2) 11 minutos | 12 | 10639,23 b | 1280,29 | 369,587 |

As médias seguidas por uma mesma letra, em cada coluna, não diferem estatisticamente (Teste-t, $p > 0,05$)

Apêndice B.3.2 – Teste-t pareado entre o Tratamento 1 e o Tratamento 2.

| Variâncias | T | GL | Probabilidade | F | GL 1 | GL 2 | Probabilidade |
|---------------|--------|------|---------------|----------------------|---------|---------|---------------|
| Homogênea | 1,0311 | 22,0 | .1568 | 1,2035 ^{ns} | 11 | 11 | 0,3826 |
| Não homogênea | 1,0311 | 21,3 | .1571 | | | | |

* Significativo a 5% de probabilidade; ^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade pelo Teste t.

Apêndice C – Análise estatística da resistência mecânica entre as amostras do terceiro grupo

| Fontes de Variação | Graus de Liberdade | Soma de Quadrados | Quadrados Médios | F |
|--------------------|--------------------|-------------------|------------------|---------------------|
| Tratamentos | 2 | 16,8972 | 8,4486 | 0,410 ^{ns} |
| Resíduos | 69 | 1420,324 | 20,5844 | |

* Significativo a 5% de probabilidade; ^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste de tukey.