

AYLSON COSTA OLIVEIRA

SECAGEM DE TORAS DE EUCALIPTO

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2015

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

T

O48s
2015

Oliveira, Aylson Costa, 1986-

Secagem de toras de eucalipto / Aylson Costa Oliveira. –
Viçosa, MG, 2015.

viii, 71f. : il. ; 29 cm.

Orientador: Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Eucalipto. 2. Madeira - Secagem. 3. Métodos de
secagem. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Engenharia Florestal. Programa de Pós-graduação em Ciência
Florestal. II. Título.

CDD 22. ed. 634.973766

AYLSON COSTA OLIVEIRA

SECAGEM DE TORAS DE EUCALIPTO

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

APROVADA: 09 de janeiro de 2015.


Daniel Camara Barcellos


Marcela Freitas Andrade


Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho
(Coorientadora)


Angélica de Cássia Oliveira Carneiro
(Coorientadora)


Benedito Rocha Vital
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

A Deus, que sempre ilumina meu caminho e guia minhas ações.

Aos meus pais, Olício e Creusa; aos meus irmãos, Álisson, Adriene e Aline; ao meu cunhado, Waldemir; e aos meus sobrinhos, Luiz Otávio e Maria Clara, por todo carinho, amor, apoio e por entenderem minhas ausências.

À minha eterna namorada Bárbara por todo amor, compreensão, ajudas e pelo exemplo de dedicação. Ao nosso filho Bernardo pelo amor, alegrias, paciência e momentos de distração e felicidade. Sem eles, a caminhada seria mais difícil.

Aos professores Benedito Rocha Vital, Angélica de Cássia Oliveira Carneiro e Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho, exemplos de caráter e profissionalismo, pela amizade, oportunidades, ensinamentos e confiança durante todos esses anos de LAPEM/LPM.

Aos Doutores Daniel Camara Barcellos e Marcela Freitas Andrade pelas contribuições e amizade.

Aos amigos Aline, Arthur, Clarissa, Éder, Leila, Lucas, Mateus, Miguel, Paula, Paulo Victor, Ramon, Wagner e Welliton, pela ajuda imprescindível durante todo desenvolvimento do trabalho.

Aos professores Hélio Garcia e Márcio Arêdes pelo auxílio na análise dos dados.

Aos estudantes e funcionários do Departamento de Engenharia Florestal, especialmente do LAPEM e LPM, pela amizade, auxílios e por tornarem todos os anos de UFV inesquecíveis.

A CAPES pela concessão da bolsa de estudos e a FAPEMIG/SECTES/Polo de Excelência em Florestas pelo financiamento da pesquisa.

À EMBRAPA Florestas pela concessão de bolsas de iniciação científica para os estudantes de graduação que auxiliaram a pesquisa.

Ao grupo temático em carvão vegetal - G6, pelo incentivo ao experimento.

À Universidade Federal de Viçosa, pela formação acadêmica e oportunidade de capacitação no mestrado e doutorado.

À Universidade Federal de Mato Grosso pela oportunidade profissional que se inicia.

SUMÁRIO

RESUMO	v
ABSTRACT	vii
INTRODUÇÃO GERAL	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	3
CAPÍTULO I - INFLUÊNCIA DA CASCA E DO DIÂMETRO NA SECAGEM NATURAL DE TORAS DE <i>Eucalyptus urophylla</i>	4
1. INTRODUÇÃO	5
2. MATERIAL E MÉTODOS	7
2.2. Determinação das propriedades da madeira	8
2.3. Secagem da madeira	10
2.4. Delineamento estatístico	11
2.4.1. Propriedades da madeira	11
2.4.2. Secagem da madeira	12
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	13
3.1. Propriedades da madeira	13
3.2. Secagem da madeira	17
4. CONCLUSÃO	25
5. REFERÊNCIAS	26
CAPÍTULO II - SECAGEM DA MADEIRA EM TORAS DE EUCALIPTO A ALTAS TEMPERATURAS	29
1. INTRODUÇÃO	30
2. MATERIAL E MÉTODOS	32
2.1. Preparo das amostras	32
2.2. Secagem em estufa	33
2.3. Delineamento estatístico	34
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4. CONCLUSÃO	45
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
CAPÍTULO III - FLUXO DE AR ENTRE TORAS DE MADEIRA COMO SUBSÍDIO PARA PROJETOS DE SECADORES ARTIFICIAIS	48
1. INTRODUÇÃO	49
2. MATERIAL E MÉTODOS	51
2.1. Preparo das amostras	51
2.2. “Túnel de Vento”	52

2.3.	Volume ocupado pelas toras de eucalipto dentro do tambor metálico.....	53
2.4.	Fluxo de ar entre toras de eucalipto.....	53
2.5.	Delineamento estatístico.....	56
2.5.1.	Volume ocupado pelas toras de eucalipto dentro do tambor metálico.....	56
2.5.2.	Fluxo de ar entre toras de eucalipto	56
3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
3.1.	Volume ocupado pelas toras de eucalipto dentro do tambor metálico.....	57
3.2.	Fluxo de ar entre toras de eucalipto.....	59
3.2.1.	Velocidade do ar na entrada do tambor.....	59
3.2.2.	Velocidade do ar na saída do tambor	61
3.2.3.	Redução da velocidade do ar.....	64
4.	CONCLUSÃO	69
5.	REFERÊNCIAS	70
	CONCLUSÕES GERAIS	71

RESUMO

OLIVEIRA, Aylson Costa, D. Sc. Universidade Federal de Viçosa, janeiro de 2015. **Secagem de toras de eucalipto**. Orientador: Benedito Rocha Vital. Coorientadores: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro e Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho.

A secagem da madeira de eucalipto é uma das fases mais importantes para a produção de carvão vegetal. Considerando a necessidade de pesquisas que subsidiem a elaboração de projetos de secadores para madeira em tora, desenvolveu-se este trabalho, estruturado em três capítulos. O Capítulo I teve como objetivo avaliar a influência das propriedades da madeira, do diâmetro e da casca na secagem natural de toras de *Eucalyptus urophylla*. Foram utilizadas toras com 1,5 m de comprimento, separadas em três classes de diâmetro: 8-12 cm; 12,1-16 cm e 16,1-20 cm. Avaliou-se em cada classe a porcentagem de casca, relação Cerne/Alburno (C/A), densidade básica da madeira, morfologia dos poros e permeabilidade da madeira, além de monitorar durante 175 dias a secagem de toras com e sem casca disposta em um galpão coberto. Concluiu-se que toras de menores diâmetros apresentam menor tempo de secagem natural em relação às toras de maiores diâmetros, a presença de casca influencia na secagem, aumentando o tempo de secagem e maiores proporções de madeira de alburno, devido sua permeabilidade, favorecem a saída de água do interior da madeira. O objetivo do Capítulo II foi avaliar a velocidade de secagem de toras de *Eucalyptus urophylla* a altas temperaturas e a influência da presença ou ausência de casca e do diâmetro da madeira na taxa de secagem. Os toretes com 60 cm de comprimento das três classes diamétricas foram submetidos à secagem em estufa com circulação forçada de ar, na presença ou ausência de casca em cinco temperaturas: 50, 75, 100, 125 e 150°C. O tempo de secagem e a perda de água foram acompanhados até os toretes atingirem umidade média de 20%, sendo então calculada a taxa de secagem, através da relação entre perda total de umidade e tempo em horas. Concluiu-se que o aumento da temperatura promove o aumento da taxa de secagem, sendo maior para as toras de menor diâmetro em relação às toras de maior diâmetro. Em temperaturas superiores a 100°C, o efeito da casca não foi significativo. As melhores condições de operação de secadores artificiais para a madeira em tora seria em temperaturas de 125°C, com toras com presença de casca separadas em classes diamétricas. No Capítulo III o objetivo deste trabalho foi avaliar o fluxo de ar entre toras de madeira de *Eucalyptus urophylla*, em diferentes condições de diâmetro, presença ou ausência de casca e diferentes velocidades do ventilador,

buscando subsidiar projetos de secadores artificiais. Utilizou-se um equipamento denominado “Túnel de Vento” composto por um ventilador centrífugo e um tambor metálico. O tambor foi preenchido com toras de diferentes classes diamétricas (8-12 cm; 12,1-16 cm e 16,1-20 cm e Mistura), na presença ou ausência de casca e em seguida o ventilador era acionado em diferentes rotações do motor (900, 1200, 1500 e 1800 RPM), insuflando ar sobre as toras empilhadas. Determinou-se o volume ocupado pelas toras e o fluxo de ar entre as toras por meio de medições da velocidade de entrada e saída do ar utilizando um anemômetro, além de determinar a redução da velocidade do ar. Concluiu-se que os projetos de secadores devem contemplar ventiladores com rotações iguais ou acima de 1800 RPM, que a mistura toras de diferentes diâmetros apresenta maior volume ocupado e menor perda de velocidade do ar, mesmo efeito verificado pela presença de casca nas toras de *Eucalyptus urophylla*.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Aylson Costa, D. Sc. Universidade Federal de Viçosa, January 2015.

Drying of eucalyptus logs. Advisor: Benedito Rocha Vital. Co-Advisors: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro and Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho.

Drying of eucalyptus wood is one of the most important phases for the charcoal production. This work was developed due to the need for research that support the development of dryers projects for wood logs. Chapter I aimed to evaluate the influence of the properties of wood, diameter and bark in natural drying logs of *Eucalyptus urophylla*. Logs 1.5 m long were divided into three diameter classes: 8-12 cm; 12.1 to 16 cm; 16.1 to 20 cm. In each class diameter, bark percentage, Heartwood/Sapwood ratio, basic wood density, pore morphology and permeability of wood were evaluated. The logs drying with and without bark arranged in a covered shed was monitored during 175 days. Lower natural drying times were observed for smaller diameter logs. The presence of the dry bark influenced with increasing drying time. Higher proportions of sapwood favored the wood drying, due to its high permeability. Chapter II aimed at evaluating the *Eucalyptus* logs drying speed and at high temperatures influence of the presence or absence of bark, and diameter of the wood in the drying rate. Logs with 60 cm length of the three diameter classes were dried in an oven with forced air circulation, in the presence or absence of bark at five temperatures: 50, 75, 100, 125 and 150 ° C. The drying time and the loss of water was observed until the logs reach an average moisture of 20%. The drying rate was calculated using the ratio between total loss of moisture and time in hours. It was concluded that the increase of temperature provoked increase in drying rate being higher in the logs of smaller diameter in relation to large diameter logs. At temperatures above 100 ° C, the bark effect was not significant. The best artificial dryers operating conditions for wood logs would be 125 ° C temperatures, with presence of bark and separated diameter classes. In Chapter III, the objective was to evaluate the airflow between logs of *Eucalyptus urophylla* with different diameter, presence or absence of bark and different air velocities. It is therefore possible subsidize artificial dryers projects for logs. It was used a equipment called "wind tunnel" consisting of a centrifugal fan and a metal drum. The drum was filled with logs of different diameter classes (8-12 cm; 12.1-16 cm; 16.1- 20 cm and mixing) in the presence or absence of bark, and then the fan was driven at different speeds of motor

(900, 1200, 1500 and 1800 RPM). It was determined the volume occupied by the timber. The flow of air between the logs and reduction of air speed were measured with an anemometer. It was concluded that the dryers projects should include fans with 1800 RPM speed or above. Furthermore, the mixture of logs of different diameters provide higher and lower occupied volume loss of air speed. The same effect is observed when the bark is present.

INTRODUÇÃO GERAL

No ano de 2013, o consumo brasileiro de madeira originária de plantios florestais com o gênero eucalipto para uso industrial foi de 138,2 milhões de metros cúbicos. Deste total, 41% foram consumidos pela indústria de celulose e papel; 30% utilizados como lenha industrial; 17% convertidos em carvão vegetal e 12% destinados às demais indústrias: madeira tratada, painéis reconstituídos e serrados (IBÁ, 2014).

Para a produção de carvão vegetal, a forma usual de secar a madeira consiste no empilhamento das toras no campo, próximo ao local de colheita. A saída de água da madeira ocorre de forma natural, em função das condições ambientais locais de temperatura, umidade relativa e circulação de ar. Segundo Santos et al. (2012), na secagem ao ar livre, o teor de umidade da madeira é bastante variável, devido à posição na pilha e diâmetro das toras. Este método de secagem apresenta baixo custo de execução, mas necessita de grandes áreas e requer longo período de tempo para atingir teores de umidade, entre 30 e 40%, aceitos como adequados para conversão em carvão.

Visando a redução dos espaços ocupados pela madeira e do longo tempo de secagem, menor heterogeneidade dos teores de umidade e obtenção de valores de umidade inferiores a 30%, a cadeia produtiva de carvão vegetal tem buscado alterações no processo de secagem da madeira. Uma alternativa promissora é o desenvolvimento de secadores artificiais de madeira em toras que utilizem como fonte de calor a energia térmica gerada pelas fornalhas que realizam a combustão dos gases de carbonização. Esta tecnologia está em franco desenvolvimento, sendo adotada pelos produtores de carvão vegetal.

Na secagem artificial podem-se obter maiores velocidades de secagem e menores teores de umidade pela possibilidade de controle das condições ao qual a madeira estará exposta, via sistemas de aquecimento e circulação forçada do ar. No entanto, não há na literatura estudos sobre a secagem artificial da madeira em toras, havendo carência de informações que subsidiem a elaboração de projetos de secadores ou estufas de secagem.

Dessa forma, considerando a necessidade de pesquisas que subsidiem a elaboração de projetos de secadores para madeira em tora, desenvolveu-se este estudo cujos principais objetivos foram: avaliar a influência das propriedades da madeira, presença ou ausência de casca e diâmetro das toras na secagem natural e artificial; avaliar o efeito do empilhamento e da velocidade do ventilador na circulação de ar entre toras; e, avaliar a velocidade de secagem da madeira em tora em temperaturas elevadas.

Assim, os resultados obtidos nesta tese foram estruturados em três capítulos, conforme apresentado a seguir:

- **Capítulo I:** “Influência da casca e do diâmetro na secagem natural de toras de *Eucalyptus urophylla*”.

- **Capítulo II:** “Secagem da madeira em toras de eucalipto a altas temperaturas”.

- **Capítulo III:** “Fluxo de ar entre toras de madeira como subsídio para projetos de secadores artificiais”.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. 2014. **Indicadores de desempenho do setor nacional de árvores plantadas referentes ao ano de 2013.** Brasília, 2014. 100p.

SANTOS, J. R. S.; ROCHA, L. C. S.; FONSECA, A. C. L.; ANDRADE, H. B. Estudo do efeito do empilhamento na secagem natural da madeira. In: Fórum Brasil sobre Biomassa e Energia, 1., 2012, Viçosa. **Anais...** Viçosa: UFV, 2012.

CAPÍTULO I

INFLUÊNCIA DA CASCA E DO DIÂMETRO NA SECAGEM NATURAL DE TORAS DE *Eucalyptus urophylla*

Resumo - O tempo de secagem ao ar livre para a madeira atingir umidade adequada é variável, dependendo das condições ambientais e características da madeira. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência das propriedades da madeira, do diâmetro e da presença de casca na secagem natural de toras de *Eucalyptus urophylla*. Utilizou-se 9 árvores seccionadas em toras de 1,5 m de comprimento, que posteriormente foram separadas em três classes de diâmetro: 8-12 cm; 12,1-16 cm e 16,1-20 cm. Avaliou-se em cada classe a porcentagem de casca, relação Cerne/Alburno (C/A), densidade básica da madeira, morfologia dos poros e permeabilidade da madeira. Para o monitoramento da secagem, selecionou-se 18 toras de cada classe, metade permanecendo com casca e as demais descascadas. As toras foram dispostas horizontalmente dentro de um galpão coberto, acompanhando durante 175 dias a perda de água e consequentemente, a redução do teor de umidade através de pesagens periódicas. Concluiu-se que o tempo de secagem natural das toras de menores diâmetros foi inferior ao das toras de maior diâmetro. A presença de casca influencia a secagem da madeira em tora de *Eucalyptus urophylla*, elevando o tempo de secagem. Maior proporção de madeira da região de alburno influencia a secagem, pois favorece a saída de água do interior da madeira devido sua maior permeabilidade.

Palavras-chave: Classe Diamétrica; Permeabilidade; Tempo de Secagem.

1. INTRODUÇÃO

A madeira de eucalipto oriunda de florestas plantadas é imprescindível para o desenvolvimento e sustentabilidade da indústria de carvão vegetal, por ser uma matéria-prima disponível em volume suficiente e propriedades adequadas. Visando o aumento da produção de carvão e melhoria na qualidade deste produto, vem sendo conduzidas pesquisas envolvendo a qualidade da madeira (NEVES et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2012; PEREIRA et al., 2012), tecnologias dos sistemas de conversão e controle da carbonização (ARRUDA et al., 2011; CARVALHO et al. 2012; CARNEIRO et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2013).

Segundo Pinheiro (2013) a secagem da madeira de eucalipto é uma das fases mais importantes para a produção de carvão, proporcionando a redução da massa de água presente na madeira diminuindo o custo com transporte, aumento do rendimento gravimétrico, redução no tempo de carbonização e da geração de finos, além da redução na emissão de gases poluentes.

A secagem ao ar livre ou natural é o principal método utilizado pelas empresas produtoras de carvão vegetal para a redução do teor de umidade da madeira anteriormente a sua carbonização. Segundo Zanuncio et al. (2013b), este método apresenta baixo custo, mas requer longo período de tempo para se obter o teor de umidade desejado. Na secagem ao ar livre, as toras de eucalipto são empilhadas no campo, próximas às áreas de colheita, ficando expostas aos fatores climáticos locais, como temperatura, umidade relativa do ar e circulação do ar.

No início do processo de secagem, a perda de água é bastante rápida, pois a madeira apresenta umidade elevada. À medida que a umidade da madeira vai aproximando-se da umidade de saturação das fibras, em torno de 30%, a perda de água torna-se mais difícil e conseqüentemente a secagem torna-se mais lenta (JANKOWSKY, 1990).

O tempo de secagem da madeira destinada à produção de carvão, normalmente varia entre 90 e 150 dias, ou seja, a madeira colhida deve ficar estocada durante este período para atingir valores adequados de umidade, em média 30% (CARNEIRO e OLIVEIRA, 2013). Contudo, os autores ressaltam que o tempo de secagem ou o teor de umidade dependem das condições ambientais da época do ano e do local em que se realiza a colheita e de características inerentes da madeira, dentre as quais, destacam-se as dimensões da tora e estrutura anatômica.

As empresas produtoras de carvão vegetal relatam que a umidade média da madeira de eucalipto seca ao ar livre varia de 30 a 45% no momento de carregamento dos fornos de carbonização (ARRUDA et al., 2011), no entanto, este valor consiste de uma média para toras com dimensões diamétricas variáveis. Conforme atestado por Pinheiro (2013), toras com maior diâmetro apresentarão maior quantidade de água quando comparada a toras de menor diâmetro expostas as mesmas condições e tempo de secagem, logo, haverá grande variabilidade do teor de umidade da madeira enfiada para produção de carvão vegetal.

Logo, conhecendo a influência das características da madeira, pode-se propor alterações na condução da secagem natural, otimizando o tempo de permanência no campo, visto que as condições ambientais locais não podem ser alteradas. Assim, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar o efeito das propriedades da madeira, relação cerne/alburno, densidade básica, diâmetro e frequência dos poros e permeabilidade na secagem natural de toras de *Eucalyptus urophylla* destinadas à produção de carvão vegetal. Objetivou-se também, avaliar a influência do diâmetro e presença de casca na velocidade de secagem.

2. MATERIAL E MÉTODOS

As toras de madeira utilizadas neste estudo foram colhidas em um plantio de *Eucalyptus urophylla*, com idade de 5 anos, cultivados em espaçamento de 3 x 2 m, localizados na cidade de Viçosa-MG. Esse município apresenta altitude média de 650 m, o clima, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cwb, mesotérmico, com inverno seco e verão chuvoso. A precipitação média anual é de 1200 mm e a temperatura média anual é de 20,5°C, com mínima de 14,6°C e máxima de 26,3°C (ZUCOLOTO et al., 2011).

2.1. Preparo das amostras

Foram coletadas 9 árvores com diâmetro à altura do peito (DAP) médio de 18 cm e altura média de 25 m. Cada árvore foi seccionada em toras com 1,5 m de comprimento até o diâmetro mínimo de 8 cm.

As toras foram levadas para o Laboratório de Propriedades da Madeira – LPM da Universidade Federal de Viçosa, onde foram determinadas a circunferência da base e topo das toras para cálculo do diâmetro médio. Posteriormente, elas foram separadas em 3 classes de diâmetro, sendo o número e a frequência em cada classe diamétrica apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Diâmetro mínimo e máximo, número de toras de *Eucalyptus urophylla* e frequência por classe de diâmetro

Classe Diamétrica	Centro de Classe (cm)	Diâmetro (cm)		Frequência	
		Mínimo	Máximo	Nº Toras	%
1	10	8	12	58	40,85
2	14	12,1	16	45	31,69
3	18	16,1	20	39	27,46
Total				142	100

A Classe 1 foi composta pelas toras obtidas na parte superior das árvores; a Classe 2 pelas toras obtidas na região intermediária da altura da árvore e a Classe 3 pelas toras obtidas mais próximas à base das árvores.

De cada classe de diâmetro foram selecionadas aleatoriamente 5 toras para a retirada de amostras para a determinação da porcentagem de casca, relação Cerne/Alburno (C/A), densidade básica, análise morfológica dos poros e permeabilidade da madeira.

2.2. Determinação das propriedades da madeira

De cada tora foram seccionados 3 discos, de 5 cm de espessura, para a determinação da porcentagem de casca e relação cerne/alburno (C/A).

Para determinação da porcentagem de casca, mediu-se a circunferência do disco com casca e sem casca. A porcentagem de casca foi determinada segundo a Equação 1:

$$\% \text{ Casca} = \frac{\text{Acc}-\text{Asc}}{\text{Acc}} * 100 \quad (1)$$

Sendo,

Acc: Área Seccional com casca, em cm²; e,

Asc: Área Seccional sem casca, em cm².

Os procedimentos utilizados para determinação da relação cerne/alburno (C/A) estão de acordo com a metodologia descrita por Evangelista (2007). Inicialmente, com o auxílio de uma lupa com aumento de dez vezes, identificou-se, em cada disco, a região do cerne periférico, região limite entre cerne e alburno, observando-se a alteração na cor e ocorrência de poros obstruídos por tilos no cerne.

Em cada disco foram traçadas duas diagonais perpendiculares entre si e passando pela medula. Foi medido o diâmetro total e o diâmetro do cerne com uma régua de 0,1 cm de precisão. A relação cerne/alburno (C/A) foi calculada através da Equação 2:

$$C/A = \frac{Dc^2}{D^2-Dc^2} \quad (2)$$

Sendo,

Dc: Diâmetro do cerne, em cm; e,

D: Diâmetro do disco sem casca, em cm.

Para determinação da densidade básica foram selecionados 2 discos de cada tora, retirando-se duas cunhas opostas em cada disco. Em cada cunha realizou-se a separação do cerne e alburno para determinação da densidade básica de cada região que foi

determinada pelo método de imersão em água, de acordo com a norma ABNT NBR 11941 (ABNT, 2003).

Para medição do diâmetro e da frequência de poros foram utilizadas amostras da região do cerne e do alburno de um disco retirado de cada uma das 5 toras selecionadas por classe de diâmetro.

Os cortes anatômicos foram feitos com espessura média de 16 μm , utilizando um micrótomo de deslize horizontal. De cada amostra foi realizado corte no plano transversal. Com o auxílio do software Axio-Vision 4.3, foram realizadas as medições do diâmetro de 30 poros para cada região (cerne e alburno) e a frequência foi mensurada em 5 micrografias por região (IAWA, 1989).

Para determinação da permeabilidade da madeira ao ar atmosférico, foram utilizadas amostras das regiões de cerne e alburno provenientes de 5 toras de cada classe de diâmetro.

Inicialmente, os toretes foram cortados em peças com dimensões de 3 x 3 cm e comprimento variável, realizando-se a separação das peças provenientes das regiões de cerne e alburno. Em seguida, as peças foram torneadas até atingir 2 cm de diâmetro e, por fim, foram cortadas com 5 cm de comprimento. As laterais das amostras foram impermeabilizadas com selador e parafina para evitar a passagem de ar transversalmente.

A permeabilidade foi determinada através da metodologia descrita por Baraúna (2010), com modificações. O equipamento utilizado para o ensaio da permeabilidade ao ar atmosférico era dotado de quatro rotâmetros conectados em série nas seguintes escalas e sequência: 0,04 a 0,5 LPM (Litros Por Minuto); 0,2 a 2,5 LPM; 0,4 a 5,0 LPM e 2,0 a 25,0 LPM. A leitura de vazão de ar foi obtida pelo rotâmetro de menor escala e, quando não foi possível a leitura neste, prosseguia-se para o subsequente até que a leitura fosse obtida.

Para determinar a permeabilidade, os corpos de prova foram colocados em um dispositivo, em que, uma das extremidades estava ligada aos medidores de vazão e a outra extremidade ligada a uma bomba de vácuo, onde se aplicava uma sucção de ar, a 0,1035 atm. Para cada corpo de prova, coletaram-se os valores de vazão de ar pela amostra e a pressão de saída indicada pela bomba de vácuo. Estes valores foram coletados quando o fluxo se tornou constante, o qual foi, em média, 30 segundos após o acionamento da bomba de vácuo.

A determinação da permeabilidade gasosa da madeira de *Eucalyptus urophylla* foi realizada, seguindo a lei de Darcy, através da Equação 3 descrita a seguir:

$$K_g = \frac{Q.L.P_i}{A.\Delta P.P_m} \quad (3)$$

Sendo,

K_g: permeabilidade ao gás (cm³/cm.atm.s);

Q: volume do fluxo de gás que percorre a espécie (cm³/s);

L: comprimento da amostra (cm);

P_i: pressão de entrada na amostra (ambiente), (atm);

A: área da seção transversal (cm²);

ΔP: diferença de pressão (atm);

P_m : média da pressão no corpo-de-prova (atm).

2.3. Secagem da madeira

A secagem natural das toras de eucalipto foi conduzida em um galpão coberto e as toras foram dispostas em estrutura elevada a 0,5 m do chão para que houvesse uma maior circulação do ar entre elas.

Para monitoramento da secagem selecionou-se aleatoriamente 18 toras de cada classe (Tabela 1), com comprimento de 1,5m. Nove toras permaneceram com casca e as demais foram descascadas manualmente.

A umidade inicial das toras foi determinada por uma fração de serragem retirada de toda a região radial da tora (sentido casca-medula) com auxílio de uma furadeira elétrica, sendo a umidade da serragem determinada em balança determinadora de umidade com lâmpada de halogêneo de acordo com metodologia descrita por Donato (2013). As toras foram pesadas individualmente em balança mecânica com capacidade de 150 kg para determinação da massa úmida. A partir dos valores de umidade e massa úmida da madeira, estimou-se a massa seca de cada tora.

Durante o período entre Agosto/2013 a Janeiro/2014, as toras foram pesadas em intervalos de 10 dias até o 120º dia e em intervalos de 15 dias até o período final de avaliação (175 dias). A umidade de cada tora ao longo do tempo foi calculada a partir dos dados de massa úmida obtida e massa seca estimada de cada tora.

Na Tabela 2 são apresentados os valores médios de temperatura e umidade relativa do ar para a cidade de Viçosa-MG, no período de experimentação.

Tabela 2 – Valores médios de temperatura (°C) e umidade relativa do ar (%) para a cidade de Viçosa-MG, entre os meses de Agosto/2013 a Janeiro/2014

	Ago/2013	Set/2013	Out/2013	Nov/2013	Dez/2013	Jan/2014
Temperatura do ar (°C)*	17,3	19,7	19,7	21,1	22,4	23,4
Umidade Relativa (%)*	74,2	74,3	77,4	76,5	84,6	72,2

* Dados obtidos na Estação Meteorológica da Universidade Federal de Viçosa.

Nas condições climáticas da cidade de Viçosa-MG na época de realização deste estudo (Tabela 2), a umidade de equilíbrio higroscópico (UEH) para os meses de Agosto e Setembro seria de 14%, para Outubro 15,5%, Novembro 15%, em Dezembro ocorreria o maior valor de UEH, 17,5% e em Janeiro, o menor valor, 13,5%. Assim, o valor médio de umidade de equilíbrio higroscópico foi igual a 15%.

2.4. Delineamento estatístico

2.4.1. Propriedades da madeira

Para avaliar a porcentagem de casca, a relação cerne/alburno e a permeabilidade da madeira, considerou-se um delineamento inteiramente casualizado, com três tratamentos (classes diamétricas), em cinco repetições, totalizando 15 unidades amostrais.

Para avaliar o efeito das diferentes regiões do tronco (cerne e alburno) e classes diamétricas na densidade da madeira, frequência e diâmetro dos vasos, considerou-se um delineamento inteiramente casualizado, em que foram comparadas duas regiões da madeira e três classes diamétricas, com cinco repetições, totalizando seis tratamentos e 30 observações.

Os dados foram submetidos aos testes de Lilliefors para testar a normalidade e de Cochran para testar a homogeneidade das variâncias e, em seguida, submetidos à análise de variância (ANOVA). Observando-se diferenças significativas, os tratamentos foram comparados entre si, por meio do teste de Tukey a 5% de probabilidade e 95% de significância.

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do programa Statistica 8.0 (2007).

2.4.2. Secagem da madeira

Para avaliar o efeito da classe diamétrica (8-12; 12,1-16; 16,1-20 cm) e a presença ou ausência de casca no tempo de secagem foi considerado um delineamento inteiramente casualizado, com 9 repetições, totalizando 54 unidades amostrais.

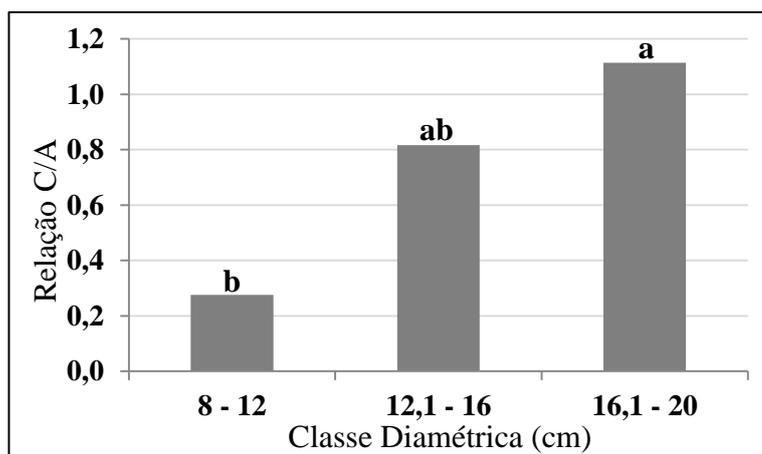
Com o auxílio do programa CurveExpert 1.4., definiu-se modelos que poderiam explicar os dados, selecionando-se entre eles os melhores, baseado no coeficiente de determinação (R^2), no erro padrão residual e na distribuição dos resíduos.

Para verificar a significância da regressão, procedeu-se a análise de variância, a 5% de probabilidade. Com base no coeficiente de determinação (R^2), significância dos coeficientes da equação, testados pelo teste F e pela significância dos coeficientes da regressão, testados pelo teste “t” de Student, foram escolhidos os modelos que melhor explicaram as variáveis, utilizando-se o software Statistica 8.0 (2007).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Propriedades da madeira

A distribuição das médias da relação Cerne/Alburno (C/A) para as diferentes classes diamétricas: Classe 1, diâmetros de 8 a 12 cm; Classe 2, diâmetros de 12,1 a 16 cm; Classe 3, diâmetros de 16,1 a 20 cm, é apresentada na Figura 1. Os valores obtidos variaram de 0,28 a 1,11.



Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Tukey.

Figura 1 – Relação Cerne/Alburno (C/A) para madeira de *Eucalyptus urophylla* em diferentes classes de diâmetro.

Observa-se na Figura 1, aumento da relação C/A à medida que se aumenta o diâmetro da tora de madeira. As toras de madeira provenientes da Classe 3, toras de maior diâmetro obtidas mais próxima à base da árvore, apresentaram maior relação C/A, igual a 1,11. A Classe 2 apresentou valor intermediário, igual a 0,82 e para a classe 1, menores diâmetros e toras próximas ao topo, foi encontrado a menor relação C/A, 0,28. Os valores encontrados neste trabalho estão de acordo com o verificado por Pinheiro (2013), que ao determinar as propriedades da madeira de *Eucalyptus urophylla*, aos 5 anos de idade, no sentido base-topo, verificou a redução do valor da relação C/A à medida que se aumentava a altura da árvore. A autora observou valor igual a 1,36 para toras obtidas a 0% de altura e 0,20 para as toras obtidas a 100% da altura total comercial das árvores avaliadas. Segundo Evangelista (2010), toras de madeira de menor diâmetro e obtidas nas partes superiores das árvores apresentam menor quantidade de cerne e maior de alburno, conseqüentemente, menores relações C/A, pois apresentam maior proporção de madeira mais jovem, que ainda não sofreu o processo de cernificação.

Visando favorecer a secagem da madeira, devem-se buscar espécies ou clones que apresentem maior proporção de madeira de alburno em relação à madeira de cerne, ou seja, menor relação C/A. O cerne constitui a região impermeável do tronco, enquanto que no alburno os vasos não estão obstruídos, facilitando o fluxo de gases e líquidos, favorecendo a saída de água da madeira de eucalipto.

A análise de variância (ANOVA) da porcentagem de casca para os diferentes diâmetros mostrou que não houve efeito significativo a 5% de probabilidade. A porcentagem média de casca para as classes diamétricas foi igual a 7,94%, com valores compreendidos entre 7,31 e 9,55%. Mauri (2010), avaliando clones de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, aos 6 anos, encontrou valores de porcentagem de casca variando de 11,02 a 17,61%. Ressalta-se que o percentual de casca varia com a idade da árvore e com a espécie ou clone.

A análise de variância (ANOVA) indicou que para a densidade básica da madeira de *Eucalyptus urophylla*, não houve efeito significativo a 5% de probabilidade da classe diamétrica e região do tronco: cerne e alburno.

A densidade básica média foi igual a 0,45 g/cm³, com valores mínimo e máximo, respectivamente, iguais a 0,34 e 0,51 g/cm³. De acordo com Pereira et al. (2012), para produção de carvão vegetal valores de densidade básica da madeira maiores que 0,50 g/cm³ são recomendados, visando assim, a obtenção de carvão com maior densidade.

No entanto, menores densidades da madeira favorecem o processo de secagem, pois apresenta maior conteúdo de espaços vazios, representado pelos lumes dos vasos e fibras. Na árvore viva provocará maior acúmulo de água no tronco, refletindo no elevado teor de água na árvore recém-colhida. Mas, durante a secagem, a baixa densidade associada à alta permeabilidade da madeira apresentará elevada taxa de saída de água, reduzindo o tempo de secagem.

Na Tabela 3 são apresentados os valores médios de frequência (%) e diâmetro (µm) dos vasos da madeira para as diferentes regiões do tronco: cerne e alburno. Ao nível de 5% de probabilidade, não houve efeito significativo da classe diamétrica sobre o diâmetro e frequência dos vasos, sendo significativas somente as regiões de cerne e alburno.

Tabela 3 – Valores médios de frequência (%) e diâmetro (μm) dos vasos da madeira de *Eucalyptus urophylla* na região de cerne e alborno

Frequência dos vasos (%)		Diâmetro dos vasos (μm)	
Cerne	Alborno	Cerne	Alborno
13,11 a	8,45 b	94,87 b	128,92 a

Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha para cada fator não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Tukey.

De acordo com a Tabela 3, observa-se que a região de cerne apresentou maior frequência média (13,11%) e menor diâmetro médio dos vasos (94,87 μm), enquanto que para a madeira da região do alborno, a frequência média observada foi menor, 8,45% e o diâmetro médio maior, igual a 128,92 μm . Diversos trabalhos relatam a tendência de redução da frequência dos vasos e aumento do seu diâmetro no sentido medula-casca para madeira de eucalipto (ROCHA et al., 2004; EVANGELISTA et al., 2010; PINHEIRO, 2013).

Visando a secagem da madeira em tora, maiores frequências dos vasos associadas aos maiores diâmetros seriam interessantes, pois favoreceriam a movimentação da água, facilitando a saída de água da madeira. No entanto, a maior frequência dos vasos foi observada para a madeira de cerne (Tabela 3), que devido à obstrução por tilose é impermeável ao fluxo de água. Em relação ao diâmetro dos vasos, verificou-se a ocorrência dos maiores diâmetros no alborno, que associado à permeabilidade dessa região, favorece o fluxo de água no interior da madeira, o que conseqüentemente, elevará a velocidade de secagem.

Assim, devem-se selecionar espécies ou clones que apresentem maior proporção de madeira de alborno, mesmo esta região apresentando menor frequência de poros, pois, a permeabilidade à passagem de líquidos associada aos maiores diâmetros médios dos vasos favorecerem a saída de água da madeira, resultando em menores tempos de secagem.

Para a determinação da permeabilidade da madeira de *Eucalyptus urophylla* em diferentes classes diamétricas, não foi possível obter amostras para a região de cerne para a Classe 1 (diâmetros de 8 a 12 cm), pois estas apresentavam madeira tanto da região de alborno quanto da medula o que afetaria os resultados obtidos. Para as Classes 2 e 3, não houve fluxo gasoso nas amostras de madeira da região do cerne, sendo, portanto, a permeabilidade igual a 0 $\text{cm}^3/\text{cm}.\text{atm}.\text{s}$, confirmando a impermeabilidade do cerne de eucalipto. A impermeabilidade do cerne é devido à ocorrência de tilos e extrativos que se depositam nas células dessa região, obstruindo parcial ou totalmente o

lume dos vasos, impedindo ou reduzindo o fluxo de gases ou líquidos (SILVA, 2007). Ressalta-se que durante o preparo das amostras e análise morfológica dos componentes anatômicos, observou-se a presença de tilos no lume dos vasos da região do cerne.

Os vasos da região de alburno não apresentaram obstrução, logo, observou-se fluxo gasoso nas amostras obtidas nesta região da madeira, independente da classe diamétrica. De acordo com a análise de variância (ANOVA), a 5% de probabilidade, não houve efeito significativo da classe de diâmetro sobre a permeabilidade da madeira na região de alburno, sendo encontrado o valor médio igual a 469,54 cm³/cm.atm.s, com valores variando de 396,53 a 523,76 cm³/cm.atm.s.

Os valores encontrados neste trabalho foram superiores ao verificado por Pinheiro (2013), que obteve o valor médio de 216,97 cm³/cm.atm.s para a permeabilidade da madeira de alburno de *Eucalyptus urophylla* aos 5 anos de idade. Provavelmente, os maiores valores de permeabilidade observados neste trabalho deve-se a variação genética e conseqüente diferenças anatômicas entre os materiais avaliados. A presença de maiores diâmetros dos vasos contribui para o fluxo gasoso na madeira, aumentando sua permeabilidade, Pinheiro (2013) observou diâmetro médio dos vasos igual a 108,80 µm, enquanto que o diâmetro médio dos vasos presente no alburno para a madeira avaliada neste trabalho foi de 128,92 µm.

Assim como verificado neste trabalho, Silva (2007) e Pinheiro (2013) ao avaliarem a permeabilidade da madeira de eucalipto, constataram que entre as regiões de cerne e alburno, a passagem de fluídos (ar ou água) ocorre somente no alburno. Logo, visando o menor tempo de secagem da madeira de eucalipto, deve-se optar pelas espécies ou clones que apresentam maior proporção de madeira de alburno, ou seja, madeira com menor relação C/A.

A permeabilidade influencia a saída de água do interior da madeira durante a secagem, que se inicia logo após a colheita da árvore. Toras de madeira com maior proporção de madeira de alburno em relação à madeira de cerne, ou mesmo maior valor de permeabilidade do alburno apresentarão maior facilidade de saída de água, refletindo em menores períodos de secagem. Além disso, o processo de secagem da madeira em tora também será influenciado pelas dimensões das peças, visto que, quanto maior o caminho a ser percorrido pela água até a superfície da madeira, maior será o tempo de secagem. Assim, além da região e permeabilidade da madeira, o diâmetro das toras deve ser avaliado.

3.2. Secagem da madeira

O teor de umidade inicial médio das toras com casca para a Classe 1 foi igual a 114,93% e 108,45% para toras sem casca. Para a Classe 2 os teores de umidade médios foram 124,10% e 112,17, respectivamente, para tora com casca e sem casca. Para a Classe 3, o teor médio inicial foi igual a 144,51% para tora com casca e 146,22% para tora sem casca.

O modelo matemático que melhor descreveu a redução no teor de umidade nos diferentes tratamentos (classe diamétrica e presença/ausência de casca) em função do tempo de secagem foi o Modelo de Harris, $y = 1/(a+b.x^c)$, em que:

y = valor da umidade estimada da tora de *Eucalyptus urophylla* (%)

a, b, c = parâmetros do modelo

x = tempo de secagem (dias)

Na Tabela 4 são apresentadas as equações e os respectivos coeficientes de determinação (R^2) para a estimativa do teor de umidade média da madeira em tora de *Eucalyptus urophylla* para as três classes diamétricas e presença ou ausência de casca em função do tempo de secagem.

Tabela 4 – Equações e coeficientes de determinação (R^2) para estimativa do teor de umidade das toras de *Eucalyptus urophylla* para as três classes diamétricas e presença ou ausência de casca em função do tempo de secagem

Classe Diamétrica	Casca	Equação	R^2
1 (8-12 cm)	Presente	$y = 1/(0,00880 + 0,00014.x^{1,22768})$	0,9984
	Ausente	$y = 1/(0,00922 + 0,00088.x^{0,93065})$	0,9968
2 (12,1-16 cm)	Presente	$y = 1/(0,00809 + 0,00009.x^{1,12511})$	0,9986
	Ausente	$y = 1/(0,00895 + 0,00052.x^{0,91047})$	0,9987
3 (16,1 e 20 cm)	Presente	$y = 1/(0,00676 + 0,00011.x^{0,95864})$	0,9965
	Ausente	$y = 1/(0,00705 + 0,00019.x^{0,90})$	0,9963

As equações obtidas neste trabalho (Tabela 4) foram consideradas satisfatórias, pois os valores de R^2 para as equações de Harris foram superiores a 99%. Rezende (2009) avaliando a secagem ao ar livre de toras de diferentes clones de eucalipto

encontrou valores de R^2 variando de 82 a 98% para as equações utilizadas para estimar o teor de umidade da madeira ao longo do tempo.

Na Figura 2 são apresentados os valores médios de umidade, observados e estimados, durante o período de secagem, para toras com casca e toras sem casca nas diferentes classes diamétricas: Classe 1, diâmetros de 8 a 12 cm; Classe 2, diâmetros de 12,1 a 16 cm; Classe 3, diâmetros de 16,1 a 20 cm. Na Figura 2A são apresentados os valores obtidos para as toras com casca e na Figura 2B, os valores de umidade para toras sem casca.

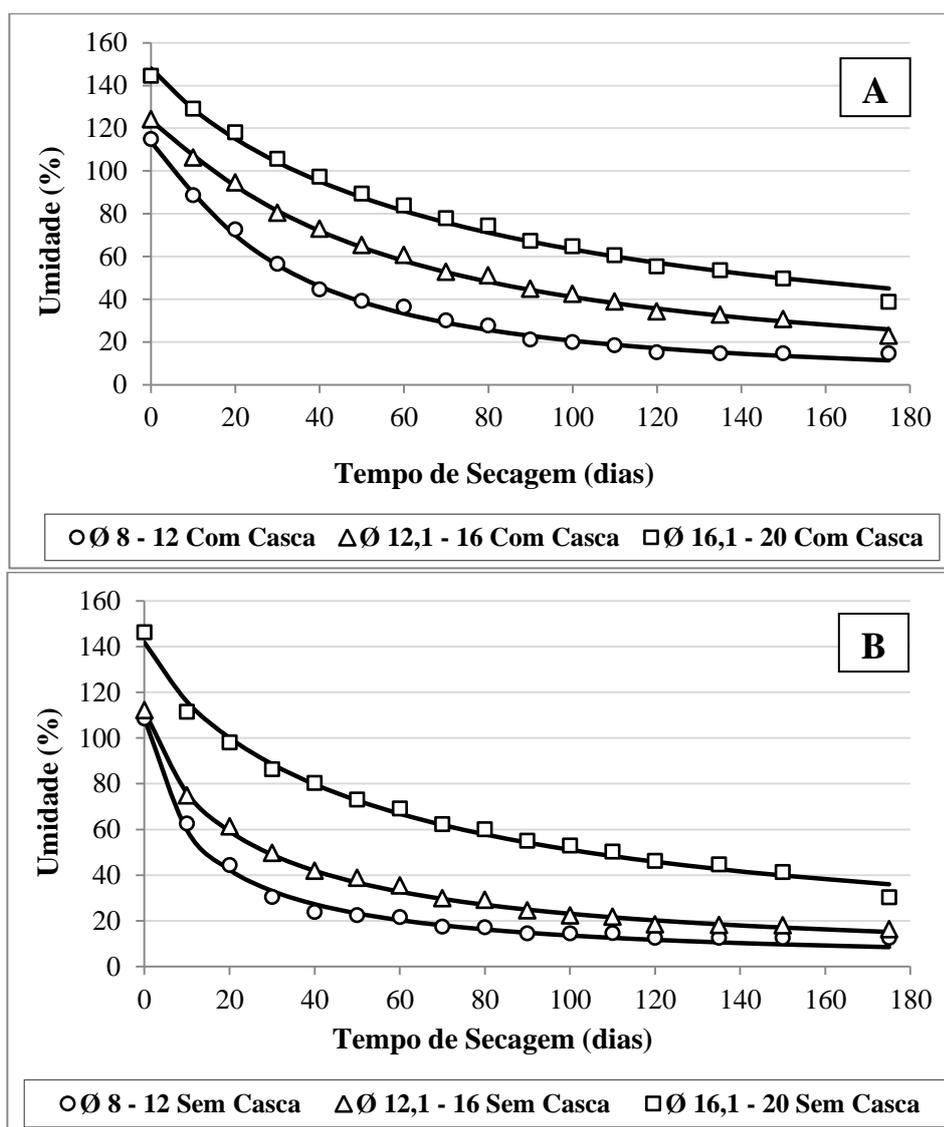


Figura 2 - Valores médios, observados e estimados, de umidade da madeira de *Eucalyptus urophylla* em toras em função do tempo de secagem, por classes diamétricas. A – Toras com casca; B – Toras sem casca.

Para toras com casca a taxa de secagem no primeiro mês de secagem foi igual a 1,92%/dia para a Classe 1; 1,41%/dia para a Classe 2 e 1,46%/dia para a Classe 3.

Enquanto que para as toras sem casca verificou-se taxas iguais a 2,51; 2,09 e 1,77%/dia, respectivamente, para as Classes 1, 2 e 3. Observa-se nas Figuras 2A e 2B que as toras de madeira apresentaram maiores reduções no teor de umidade nos primeiros trinta dias de secagem, reflexo das taxas de secagem superiores a 1%/dia. Este fato deve-se ao elevado teor de umidade inicial da madeira em relação ao ambiente à que está exposta e a presença de água livre na madeira que segundo Skaar (1972), ocupa as cavidades dos componentes anatômicos e espaços, movimentando-se de acordo com os fenômenos de capilaridade.

A saída de água livre pode ser dificultada pela redução da permeabilidade da madeira, e, conforme verificado neste trabalho, a região do cerne é impermeável, sendo somente a madeira da região de alburno permeável ao fluxo de água. Como não houve diferença no valor de permeabilidade do alburno dos diferentes diâmetros, uma das razões para a diferença de velocidade de secagem entre as toras, em ambas as condições de casca, deve-se a proporção de madeira de alburno em relação ao cerne. De acordo com a Figura 1, as toras da Classe 1 apresentaram maior proporção de madeira de alburno, favorecendo a saída de água; enquanto que para a Classe 3, as toras eram constituídas com maior proporção de madeira de cerne, dificultando a secagem. Segundo Pinheiro (2013) além das da relação C/A, o diâmetro das toras também influencia a secagem da natural da madeira, por isso, as diferenças verificadas nas curvas de secagem entre as toras de diferentes diâmetros.

Verifica-se do 30° ao 60° dia, que as taxas de secagem reduziram a metade do valor verificado nos trinta dias iniciais de secagem, com valores variando de 0,67 a 0,78%/dia para toras com casca e valores entre 0,43 e 0,58%/dia para toras sem casca. Dessa forma, observa-se menor inclinação das curvas de secagem nas Figuras 2A e 2B e menor redução do teor de umidade neste período de secagem.

Abaixo da umidade de saturação das fibras, a saída de água torna-se mais difícil e a secagem torna-se mais lenta, pois se faz presente na madeira somente a água de adesão que está adsorvida à parede celular através de ligações de hidrogênio entre a molécula de água e a estrutura polissacarídica (celulose e hemiceluloses). Por isso, para todas as classes diamétricas, na presença ou ausência de casca (Figura 2) houve expressiva redução na taxa de secagem quando as toras aproximaram-se do teor de umidade de 30%, passando a apresentar valores inferiores a 0,4%/dia.

Observa-se que para as toras com casca pertencentes à Classe 1 e toras sem casca das Classes 1 e 2, que a madeira entrou em equilíbrio higroscópico com o ambiente, igualando a perda e o ganho de água, ficando a umidade da madeira

estabilizada próximo a 15%, condição de umidade de equilíbrio higroscópico média em razão da umidade relativa do ar e temperatura local na época da secagem (Tabela 2). Para as demais classes, o tempo de secagem de 175 dias não foi suficiente para que as toras atingissem a umidade de equilíbrio higroscópico.

Ainda na Figura 2A verifica-se efeito do diâmetro sobre a redução da umidade das toras de madeira em função do tempo. A Classe 1, menor diâmetro, atingiu o teor de umidade igual a 30%, após 70 dias de secagem e aos 175 dias a umidade média era igual a 14,7%; a Classe 2 alcançou ao teor de umidade médio de 30% aos 150 dias, reduzindo para 22% decorridos mais 25 dias de secagem e a Classe 3 não alcançou a umidade desejada (30%) ao final do período avaliado, apresentando umidade média igual a 38% após 175 dias de secagem ao ar livre.

Todas as toras de madeira sem casca (Figura 2B), independente da classe diamétrica, atingiram umidade inferior a 30%. Sendo a Classe 1 aos 30 dias; a Classe 2 aos 70 dias e a Classe 3 ao serem decorridos 175 dias de secagem ao ar livre. No 100º dia de secagem, as toras das Classes 1 e 2 passaram a apresentar pequenas diferenças no valor médio de umidade, alcançando umidades de 12,6 e 16,4%, respectivamente, ao final do período de avaliação da secagem ao ar livre (175 dias).

Segundo Vital et al. (1985), a secagem natural de madeira em toras é influenciada pelo diâmetro da tora, que está relacionado à distância a ser percorrida pelas moléculas de água do interior para a superfície da madeira. Por isso, observou-se maiores taxas de secagem das toras, independente da presença de casca, para a Classe 1 em relação à Classe 2 e esta, em relação à Classe 3.

Por não haver influencia da classe diamétrica das toras na permeabilidade da madeira da região de alburno e no diâmetro dos vasos do alburno, cujos valores médios foram, respectivamente, 469,54 cm³/cm.atm.s e 128,92 µm, as diferenças verificadas nas taxas de secagem, além do efeito do diâmetro, foram decorrentes das diferenças verificadas nas proporções de madeira de cerne e alburno (Figura 1). Pois, o cerne apresenta menor diâmetro dos vasos e é impermeável, enquanto que o alburno apresenta permeabilidade ao fluxo de água e maiores diâmetros dos vasos, favorecendo a secagem da madeira.

Portanto, o menor diâmetro da Classe 1 associada à maior proporção de alburno, refletindo na relação cerne/alburno igual a 0,28 provocaram a maior redução do teor de umidade em menor período de tempo para esta classe. Enquanto que as toras da Classe 3 por apresentarem maior diâmetro e maior relação C/A (1,11), apresentaram menor

redução do teor de umidade durante o período de avaliação da secagem natural para toras de *Eucalyptus urophylla*.

O efeito do diâmetro na secagem da madeira em tora de eucalipto também foi verificado por diversos autores (Vital et al., 1985; Rezende et al., 2010; Pinheiro, 2013; Zanuncio et al. 2013ab), que ao avaliarem a secagem ao ar livre de toras de eucalipto de diferentes espécies verificaram ao final do tempo de exposição às condições ambientais locais que as toras de menor diâmetro apresentavam menores teores de umidade em relação ao verificado para as toras de maior diâmetro.

Dessa forma, durante o empilhamento da madeira de eucalipto no campo para secagem natural, sugere-se a separação das toras por classe de diâmetro para obtenção de menor heterogeneidade dos teores de umidade e melhor planejamento florestal. As toras de menor diâmetro que apresentam maior taxa de secagem e conseqüentemente demandam de menos tempo para atingir menores teores de umidade devem ser transportadas para as unidades de produção de carvão vegetal antecipadamente às toras de maior diâmetro, que necessitam de maior tempo de secagem para redução do teor de umidade.

Na Figura 3 são apresentados os valores médios observados e estimados, de umidade da madeira de *Eucalyptus urophylla* em toras em função do tempo de secagem, para cada classe diamétrica, Classe 1, diâmetros de 8 a 12 cm; Classe 2, diâmetros de 12,1 a 16 cm; Classe 3, diâmetros de 16,1 a 20 cm, na presença ou ausência de casca.

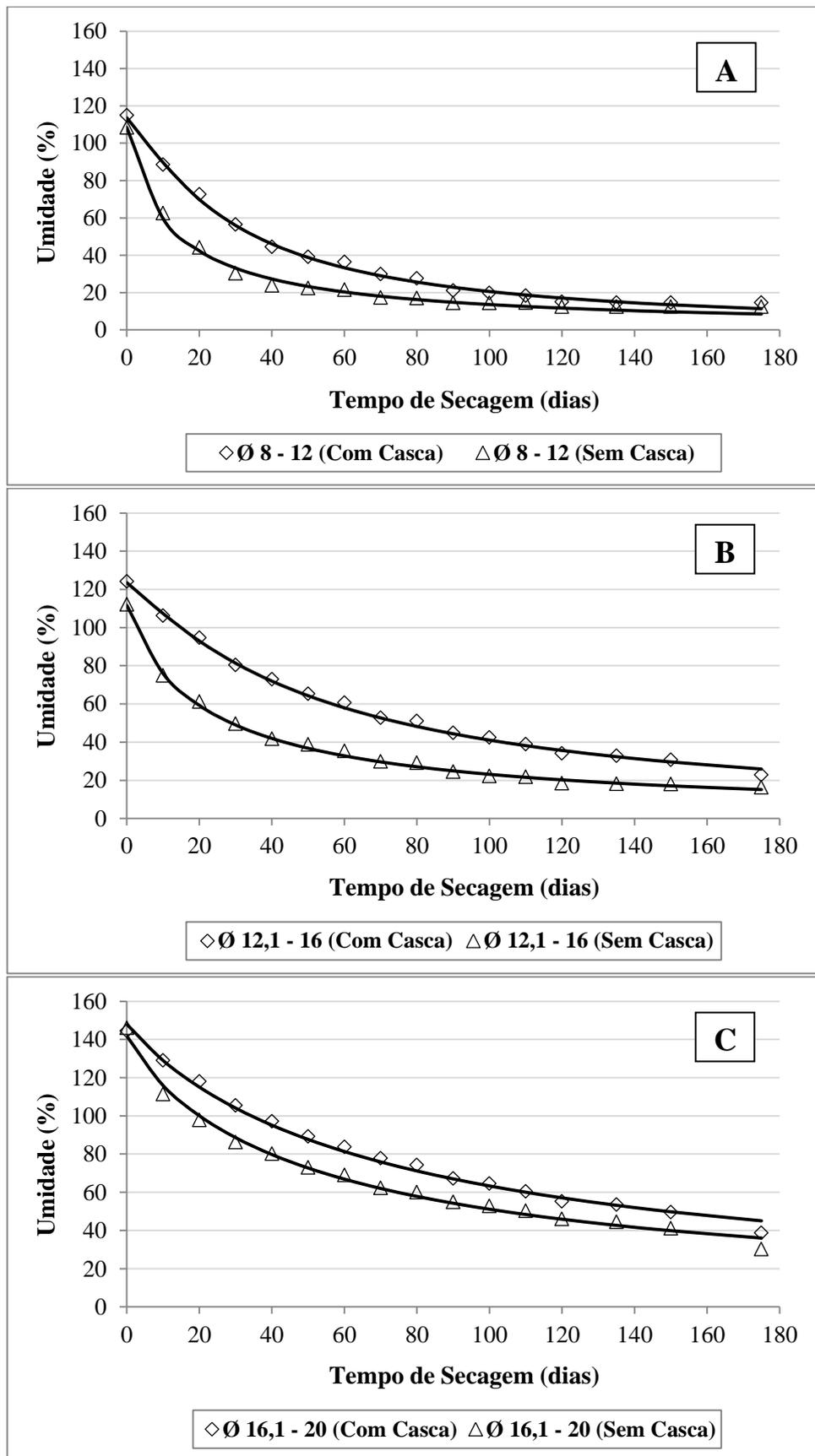


Figura 3 – Valores médios observados e estimados, de umidade da madeira de *Eucalyptus urophylla* em toras em função do tempo de secagem, por classe diamétrica na presença ou ausência de casca.

Verificou-se, para as 3 classes diamétricas (Figura 3), que as toras sem casca apresentaram maior velocidade de secagem, alcançando teor de umidade igual a 30% em período de tempo menor que as toras com casca. Isso se deve ao impedimento físico que a casca oferece e a redução da área superficial exposta do lenho, afetando a saída de água e conseqüentemente, a secagem da madeira, além da maior impermeabilidade da casca em relação à madeira, por esta conter suberina.

Para a Classe 1 (Figura 3A), a diferença de umidade entre as toras com e toras sem casca foi mais pronunciada nos primeiros 40 dias de secagem. Após 80 dias de secagem, quando as toras apresentavam umidade próxima a 25%, as curvas de secagem se igualaram, reduzindo o efeito da presença de casca. Para esta classe, a umidade de 30% foi alcançada após 30 e 70 dias, respectivamente, para toras sem casca e com casca. Ao final do período de secagem (175 dias), a umidade média das toras com casca foi igual a 14,7% e das toras sem casca foi 12,6%.

Para a Classe 2 (Figura 3B), verificou-se maior efeito da ausência de casca sobre a secagem das toras em comparação à Classe 1, sendo este efeito maior nos 100 primeiros dias. Enquanto as toras sem casca da Classe 2 atingiram umidade média igual a 30% após 70 dias, as toras com casca apresentaram esta mesma umidade somente 150 dias após o início da secagem. No entanto, ao final do tempo de secagem, observou-se a redução na diferença entre os valores médios de umidade, que foi igual a 22,8% para toras com casca e 16,4% para toras sem casca.

Foi constatado para as Classes 1 e 2, a redução de umidade mais acentuada para as toras sem casca nos primeiros 30 dias de secagem em relação às toras com casca, reflexo da diferença média de 75% nas taxas de secagem, cujos maiores valores ocorreram para as toras sem casca. A partir deste período, as diferenças nas curvas de secagem decrescem reflexo da redução das diferenças nas taxas de secagem, cujo maior valor passa a ocorrer para as toras com casca, visto que as toras sem casca apresentam teor de umidade próximo a 30%.

O efeito da casca sobre a secagem foi menor para as toras da Classe 3, conforme observado na Figura 6C. Os teores médios de umidade verificados apresentaram diferenças entre 15 e 20% durante a maior parte do tempo avaliado. Somente a partir do 100º dia, a diferença de umidade reduziu para cerca de 10%, assim permanecendo até o final da avaliação da secagem, quando as toras sem casca apresentaram umidade igual a 30,3% e as toras com casca, 38,8%. Ressalta-se, que neste trabalho, somente as toras da Classe 3 com casca não alcançaram umidade igual a 30% durante o período avaliado.

Vital et al. (1985); Rezende et al. (2010) e Pinheiro (2013), avaliando a secagem ao ar livre de toras de eucalipto de diferentes diâmetros e comprimentos, com ausência ou presença de casca, observaram de maneira geral, que as toras sem casca apresentaram menor teor de umidade que as toras com casca durante todo o tempo de secagem, assim como verificado neste trabalho. Os mesmos autores afirmaram que a presença de casca teve maior influência na perda de água pela madeira nas primeiras semanas de secagem e que a diferença no teor de umidade torna-se menos acentuada, transcorrido maior tempo de secagem, quando a umidade das toras aproxima-se de 30%.

4. CONCLUSÃO

A secagem natural promove a redução do teor de água da madeira a níveis adequados de umidade, no entanto após longo período de tempo de exposição às condições ambientais.

A secagem natural da madeira em toras de *Eucalyptus urophylla*, com 1,5 metros de comprimento, durante 175 dias e nas condições ambientais locais, promoveu a redução da umidade a um valor próximo a 30% somente para as toras das menores classes de diâmetro com casca e para todas as classes sem casca.

O tempo de secagem das toras de menores diâmetros foi inferior ao necessário para as toras de maior diâmetro atingir o mesmo teor de umidade, indicando que a separação da madeira em relação ao seu diâmetro é uma prática eficiente e que favorece a secagem da madeira em toras.

A casca influenciou a velocidade de secagem da madeira de *Eucalyptus urophylla* em toras. As toras com casca apresentam maior tempo de secagem natural em relação às toras sem casca. No entanto, a decisão de realizar o descascamento deve considerar o fator econômico e outros fatores técnicos, tais como disponibilidade de maquinário e mão de obra.

Devem-se selecionar espécies ou clones que apresentem maiores proporções de madeira de alburno, visto que sua permeabilidade e maiores diâmetros dos vasos influenciam a secagem da madeira, favorecendo a saída de água.

5. REFERÊNCIAS

- ARRUDA, T. P. M.; PIMENTA, A. S.; VITAL, B. R.; LUCIA, R. M. D.; ACOSTA, F. C. Avaliação de duas rotinas de carbonização em fornos retangulares. 2011. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.35, n.4, p.949-955, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941: Madeira: determinação da densidade básica**. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.
- BARAÚNA, E. E. P. **Permeabilidade das madeiras de Amapá** (*Brosimum parinarioides* Ducke) e **Faveira** (*Parkia gigantocarpa* Ducke). 2010. 69 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.
- CARNEIRO, A. C. O.; OLIVEIRA, A. C. **Produção Sustentável de Carvão Vegetal**. 1 ed. Viçosa: SIF, 2013. v.1. 39p.
- CARNEIRO, A. C. O. ; VITAL, B. R. ; OLIVEIRA, A. C. ; PEREIRA, B. L. C. . Pirólise Lenta da Madeira para Produção de Carvão Vegetal. In: Santos, F.; Colodette, J.; Queiroz, J. H.. (Org.). **Bioenergia & Biorrefinaria: Cana-de-Açúcar & Espécies Florestais**. 1ed.Visconde do Rio Branco: Suprema, 2013, v. 1, p. 429-458.
- CARVALHO, S. R.; BORGES, V. L.; MULINA, B. H. O.; OLIVEIRA, R. L. M.; FIGUEIRA JÚNIOR, E. A.; PESSOA FILHO, J. S. Instrumentação térmica aplicada ao processo de produção de carvão vegetal em fornos de alvenaria. 2012. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.36, n.4, p.787-796, 2012.
- DONATO, D. B. **Métodos de amostragem e de determinação do teor de umidade da madeira em tora**. 2013. 70p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2013.
- EVANGELISTA, W. V. **Caracterização da madeira de clones de Eucalyptus camaldulensis Dehnh. e Eucalyptus urophylla S.T. Blake, oriunda de consórcio agrossilvipastoril**. 2007. 120p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.
- EVANGELISTA, W. V.; SILVA, J. C.; VALLE, M. L. A.; XAVIER, B. A. Caracterização anatômica quantitativa da madeira de clones de Eucalyptus camaldulensis Dehnh. e Eucalyptus urophylla S.T. Blake. 2010. **Scientia Forestalis**, Piracicaba-SP, v. 38, n. 86, p. 273-284, 2010.
- IAWA COMMITTEE. **List of microscopic features for hardwood identification**. IAWA Bulletin, Leuven, v. 10, n. 2, p. 219-332, 1989.
- JANKOWSKY, I. P. **Fundamentos de secagem de madeiras**. Piracicaba: ESALQ, 1990. 13p.
- MAURI, R. **Anatomia e densidade do lenho de clones de Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis, com variação de altitude e de topografia, no estado de Minas Gerais**. 2010. 117p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro-ES, 2010.

- NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; VIEIRA, C. M. M. Avaliação de clones de Eucalyptus em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. 2011. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo-PR, v.31, n. 68, p.319-330, 2011.
- OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; PEREIRA, B. L. C.; VITAL, B. R.; CARVALHO, A. M. M. L.; TRUGILHO, P. F.; DAMÁSIO, R. A. P. Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. 2013. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.37, n.3, p.557-566, 2013.
- PEREIRA, B. L.C.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; SANTOS, L.C.; VITAL, B. R. Quality of wood and charcoal from Eucalyptus clones for ironmaster use. 2012. **International Journal of Forestry Research**, v. 1, n. 2, p. 1-8, 2012.
- PINHEIRO, M. A. **Influência das dimensões da madeira na secagem e nas propriedades do carvão vegetal**. 2013. 80p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2013.
- PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; NEVES, T. A.; VIEIRA, C. M. M. Análise de correlação canônica entre características da madeira e do carvão vegetal de Eucalyptus. 2012. **Scientia Forestalis**, Piracicaba-SP, v. 40, n. 95, p. 317-326, 2012.
- REZENDE, R. N.; LIMA, J. T. PAULA, L. E. R.; FARIA, A. L. R. Secagem ao ar livre de toras de Eucalyptus grandis em Lavras, MG. 2010. **Cerne**, Lavras, v.16, Suplemento, p. 41-47, 2010.
- REZENDE, R. N. **Secagem de toras de clones de Eucalyptus empregados na produção de carvão**. 2009. 186p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, 2009.
- ROCHA, F. T.; FLORSHEIM, S. M. B.; COUTO, H. T. Z. Variação das dimensões dos elementos anatômicos da madeira de árvores de Eucalyptus grandis Hill ex Maiden aos sete anos. 2004. **Rev. Inst. Flor.**, São Paulo-SP, v. 16, n. 1, p. 43-55, 2004.
- SILVA, M. R. **Determinação da permeabilidade em madeiras brasileiras de florestas plantadas**. 2007. 120 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2007.
- SKAAR, C. J. **Water in wood**. Syracuse: Syracuse University, 1972. 218 p.
- STATSOFT INC. **Statistica data analysis system version 8.0**. Tulsa: Statsoft Inc., 2007.
- VITAL, B. R.; DELLA LUCIA, R. M.; VALENTE, O. F. Estimativa do teor de umidade de lenha para carvão em função do tempo de secagem. **Revista Árvore**, v.9, s/n, p.10-27, 1985.
- ZANUNCIO, A. J. V.; LIMA, J. T.; MONTEIRO, T. C.; LIMA, J. T.; TRUGILHO, P. F. Secagem de toras de Eucalyptus e Corymbia para uso energético. 2013a. **Scientia Forestalis**, Piracicaba-SP, v. 41, n. 99, p. 353-360, 2013.

ZANUNCIO, A. J. V.; MONTEIRO, T. C.; LIMA, J. T.; ANDRADE, H. B.;
CARVALHO, A. G. Drying biomass for energy use of *Eucalyptus urophylla* and
Corymbia citriodora Logs. 2013b. **BioResources**, v.8, n. 4, p. 5159-5168, 2013.

ZUCOLOTO, M.; COSTA, M. G.; CARVALHO, L. M.; SANTOS, D.; SIQUEIRA, D.
L. Estimativa da produção de sementes de porta-enxertos cítricos por meio da massa de
frutos. 2011. **Rev. Ceres**, Viçosa-MG, v. 58, n. 1, p. 126-128, 2011.

CAPÍTULO II

SECAGEM DA MADEIRA EM TORAS DE EUCALIPTO A ALTAS TEMPERATURAS

Resumo - O objetivo deste trabalho foi avaliar a velocidade de secagem de toras de *Eucalyptus urophylla* a altas temperaturas e a influência da presença ou ausência de casca e do diâmetro da madeira na taxa de secagem. Utilizaram-se toretes de *Eucalyptus urophylla* com 60 cm de comprimento, em três classes diamétricas: 8-12 cm; 12,1-16 cm e 16,1-20 cm. Os toretes foram submetidos à secagem em estufa com circulação forçada de ar, na presença ou ausência de casca em cinco temperaturas: 50, 75, 100, 125 e 150°C. Determinou-se a massa e a umidade inicial de cada torete e com pesagens periódicas acompanhou-se a perda de água, encerrando o processo de secagem quando os toretes de madeira atingiam a umidade de 20%. A taxa de secagem foi calculada por meio da relação entre a perda total de umidade e o tempo total em horas para que as toras atingissem a umidade estabelecida. Concluiu-se que o aumento da temperatura promove o aumento da taxa de secagem, sendo maior para as toras de menor diâmetro em relação às toras de maior diâmetro e na secagem das toras de eucalipto em temperaturas superiores a 100°C, o efeito da casca não foi significativo. Concluiu-se, também, que as melhores condições de operação de secadores artificiais para a madeira em tora seria em temperaturas de 125°C, com toras com presença de casca separadas em classes diamétricas.

Palavras-chave: Taxa de Secagem; Teor de Umidade; Secadores Artificiais.

1. INTRODUÇÃO

Os produtores nacionais de carvão vegetal visando o aumento da produção e maior qualidade do produto têm adotado as melhores tecnologias disponíveis e acessíveis no mercado, tais como fornos retangulares de grandes dimensões com mecanização das atividades de carregamento e descarregamento (GUIMARÃES NETO et al., 2007; ARRUDA et al., 2011); controle da carbonização baseado na temperatura interna do forno (CARVALHO et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2013); e fornalhas para combustão dos gases da carbonização que minimizam as emissões de gases poluentes para o ambiente (CARDOSO et al., 2010; COSTA, 2012).

Segundo Yang et al. (2007) durante a carbonização da madeira são gerados diversos compostos gasosos ricos em carbono e hidrogênio, sendo os principais CO, CO₂, H₂ e CH₄. Em condições adequadas de temperatura, estes gases podem sofrer reações químicas na presença de oxigênio, sendo as emissões constituídas somente de CO₂ e vapor de água e liberando energia na forma de calor (CARDOSO et al., 2010). As temperaturas dos gases liberados para o ambiente pela chaminé, após a combustão no interior da fornalha, podem atingir temperaturas variando de 200 a 500°C (OLIVEIRA et al., 2013).

Uma forma de aproveitamento do calor gerado pelas fornalhas no processo produtivo do carvão vegetal seria o seu direcionamento para a secagem das toras de madeira por meio de secadores industriais. Visto que, a secagem da madeira ao ar livre, principal método adotado atualmente, segundo Zanuncio et al. (2013) demanda elevado período de tempo para redução da umidade da madeira a níveis satisfatórios para a carbonização, entre 30 e 40%, além de apresentar grande heterogeneidade do teor de umidade em relação às dimensões das toras e posição na pilha.

Em ambos os métodos de secagem, as características da madeira juntamente com as condições de temperatura, umidade relativa e circulação do ar do ambiente influenciam a velocidade de saída da água. No entanto, na secagem ao ar livre as condições ambientais serão as verificadas no local onde a madeira está exposta, enquanto que na secagem artificial, torna-se possível a alteração do ambiente utilizando ventiladores para circulação e renovação do ar e sistemas de aquecimento para aumento da temperatura, além do controle da umidade relativa.

Segundo Galvão e Jankowsky (1985), temperaturas mais elevadas favorecem o processo de secagem da madeira, fornecendo mais energia para evaporação da água e

elevando o potencial do ar em receber maior quantidade de vapor de água. Deste modo, a utilização de secadores industriais utilizando como fonte de calor os gases combustos da carbonização possibilitará a homogeneização da umidade de grandes volumes de madeira, redução do tempo de secagem e obtenção de menores teores de umidade em relação ao normalmente verificado na secagem ao ar livre.

Na literatura são encontrados diversos estudos sobre a secagem artificial para diversos produtos madeireiros: partículas, lâminas e principalmente madeira serrada (ALBUQUERQUE, 2000; JANKOWSKY, 2000; SANTINI E HASELEIN, 2002). No entanto não há estudos sobre a aplicação deste método de secagem para madeira em toras destinadas a carbonização.

Portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a velocidade de secagem da madeira em toras de *Eucalyptus urophylla* a altas temperaturas, como subsídio aos futuros projetos de secadores industriais. Objetivou-se também avaliar a influência da presença ou ausência de casca e do diâmetro da madeira na velocidade de secagem em diferentes temperaturas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

As toras de madeira utilizadas neste estudo foram provenientes de um plantio de *Eucalyptus urophylla*, com idade de 7 anos, cultivados em espaçamento de 3 x 2 m, localizados na cidade de Viçosa-MG. Esse município apresenta altitude média de 650 m, o clima, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cwb, mesotérmico, com inverno seco e verão chuvoso. A precipitação média anual é de 1200 mm e a temperatura média anual é de 20,5°C, com mínima de 14,6°C e máxima de 26,3°C (ZUCOLOTO et al., 2011).

2.1. Preparo das amostras

Foram coletadas 7 árvores de eucalipto, com diâmetro à altura do peito (DAP) médio de 18 cm e altura média de 25 m. Cada árvore foi seccionada em toras com 1,3 m de comprimento até o diâmetro mínimo de 8 cm.

As toras foram levadas para o Laboratório de Painéis e Energia da Madeira – LAPEM da Universidade Federal de Viçosa, onde foram determinadas as circunferências da base e topo das toras para cálculo do diâmetro médio. Posteriormente, elas foram separadas em 3 classes de diâmetro.

A Classe 1 foi composta pelas toras obtidas na parte superior das árvores com diâmetros de 8 a 12 cm; a Classe 2 composta por toras obtidas na região intermediária da altura da árvore, com diâmetros de 12,1 a 16 cm e a Classe 3, toras de 16,1 a 20 cm, obtidas mais próximas à base das árvores.

Após a separação por diâmetro, as toras foram seccionadas em toretes de 60 cm, retirando um disco central, com cerca de 10 cm de espessura de cada tora para determinação da umidade inicial de cada torete pelo método gravimétrico. Em seguida, metade dos toretes de cada classe de diâmetro permaneceu com casca e a outra metade foi descascada manualmente.

Posteriormente, os toretes foram dispostos sobre uma estrutura elevada a 0,5 m do chão para que houvesse uma maior circulação do ar entre eles dentro de um galpão coberto para secagem natural até teor médio de umidade igual a 60% ($\pm 10\%$). Determinou-se a massa inicial de cada torete, cuja umidade inicial foi estimada em função da umidade verificada nos discos correspondentes. Seguiu-se com pesagens periódicas dos toretes até a massa correspondente a umidade estabelecida. Neste momento, cessava-se a secagem natural e os toretes eram acondicionados em sacos

plásticos com tetraborato de sódio deca hidratado, para reduzir a perda de água e ataque de organismos decompositores da madeira até que todos os toretes atingissem a umidade de $60 \pm 10\%$, para posteriormente realizar a secagem em estufa.

Estabeleceu-se a umidade de 60% ($\pm 10\%$) como umidade inicial das toras para secagem em estufa, pois a árvore recém-colhida apresenta elevada quantidade de água preenchendo seu espaço vazio, correspondendo à água livre, cuja saída apresenta pouco gasto energético, verificando-se uma elevada taxa de perda de água mesmo com a secagem realizada em condições de campo. Abaixo de 60% de umidade, mesmo ainda havendo água livre na tora de madeira, a taxa de secagem reduz em cerca de 5 vezes, elevando o tempo de secagem.

Com a secagem inicial ocorrendo em campo, reduz-se o peso de madeira a ser transportada e a quantidade de água a ser retirada da madeira, reduzindo o consumo energético e o tempo de permanência no secador artificial.

2.2. Secagem em estufa

Após todos os toretes atingirem a umidade de 60% e ficaram armazenados em sacos plásticos, de cada torete retirou-se uma fração de serragem de toda a região radial da tora (sentido casca-medula) com auxílio de uma furadeira elétrica de cada torete de acordo com metodologia descrita por Donato (2013). Para estimar a umidade inicial de cada torete, determinou-se a umidade da serragem em uma balança determinadora de umidade com lâmpada de halogêneo da marca OHAUS MB35 Halogen.

Em seguida, determinou-se a massa inicial de cada torete e antes de realizar a secagem em estufa, as extremidades dos toretes foram impermeabilizadas com tinta metálica visando minimizar a perda de água na direção longitudinal da madeira, fazendo com que a secagem ocorresse preferencialmente na direção radial da madeira para avaliar o efeito do diâmetro e da presença ou ausência de casca.

Posteriormente, os toretes foram levados para secagem em estufa, avaliando-se o efeito do diâmetro, presença ou ausência de casca e diferentes temperaturas de secagem, 50, 75, 100, 125 e 150°C, na velocidade de secagem da madeira de eucalipto.

Foi utilizada uma estufa laboratorial com circulação forçada de ar no sentido horizontal, com controle de temperatura até 200°C, da marca Marconi, com capacidade de 480 litros. A estrutura interna da estufa é de aço inox AISI430 com câmara dupla para circulação do ar e a estrutura externa em chapa de aço 1020 com tratamento anticorrosivo, tendo a mesma, as seguintes dimensões internas: largura de 800 mm;

profundidade de 600 mm e altura de 1000 mm, com suporte para 5 prateleiras de aço, onde as toras foram dispostas. O sensor de temperatura utilizado foi do tipo PT100.

Para avaliar a velocidade de secagem, os toretes foram pesados individualmente em intervalos regulares de tempo que variaram conforme o tratamento avaliado, encerrando a secagem em estufa quando os toretes atingiam a massa correspondente a 20% ($\pm 2\%$) de umidade. A partir dos dados de massa úmida e massa seca estimada de cada torete calculou-se a umidade da madeira ao longo do tempo.

A partir dos valores médios de umidade das toras ao longo do tempo e do tempo total necessário para os toretes atingirem 20% de umidade procedeu-se a confecção das curvas de secagem em função da classe diamétrica, presença ou ausência de casca e temperatura de secagem na estufa.

Por meio da relação existente entre a perda total de umidade e o tempo total, em horas, necessário para as toras de eucalipto atingirem a umidade final próxima a 20% após secagem em estufa, calculou-se a taxa de secagem, % de umidade reduzida por hora, em função dos tratamentos, conforme a equação abaixo:

$$\text{Taxa de Secagem (\%/hora)} = \frac{U_i - U_f}{t} \times 100$$

Em que,

U_i = Umidade inicial do torete de madeira (%);

U_f = Umidade final do torete de madeira (%);

T = Tempo necessário para atingir 20% de umidade (horas).

2.3. Delineamento estatístico

Para avaliar o efeito da classe diamétrica (8-12; 12,1-16; 16,1-20 cm), a presença ou ausência de casca e a temperatura da estufa (50, 75, 100, 125 e 150°C) na secagem das toras de eucalipto, foi considerado um delineamento inteiramente casualizado, com 3 repetições, totalizando 90 unidades amostrais.

Com o auxílio do programa CurveExpert 1.4., definiu-se modelos que poderiam explicar a redução da umidade em função do tempo ou as curvas de secagem, selecionando-se entre eles os melhores, baseado no coeficiente de determinação (R^2), no erro padrão residual e na distribuição dos resíduos.

Para verificar a significância da regressão, procedeu-se a análise de variância, a 5% de probabilidade. Com base no coeficiente de determinação (R^2), significância da regressão, testados pelo teste F e pela significância dos coeficientes da regressão, testados pelo teste “t” de Student, foram escolhidos os modelos que melhor explicaram as variáveis, utilizando-se o software Statistica 8.0 (2007).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo matemático que melhor descreveu a redução no teor de umidade das toras nos diferentes tratamentos (presença ou ausência de casca, diâmetro das toras e temperatura de secagem, exceto para 150°C, Classes 1 e 2) ao longo do tempo foi um modelo exponencial de dois parâmetros:

$$y = a * \exp(-bx)$$

Em que:

y = valor estimado de umidade para toras de eucalipto (%)

x = tempo de secagem (dias)

a, b = parâmetros do modelo

Para a temperatura de 150°C com presença ou ausência de casca para toras com diâmetro variando entre 8 e 12 cm (Classe 1) e entre 12,1 e 16 cm (Classe 2), o modelo que melhor se adequou aos valores de redução da umidade ao longo do tempo foi um modelo linear com dois parâmetros:

$$y = ax + b$$

Em que:

y = valor estimado de umidade para toras de eucalipto (%)

x = tempo de secagem (dias)

a, b = parâmetros do modelo

As equações ajustadas para a estimativa do teor de umidade médio da madeira em tora de eucalipto ao longo do tempo apresentaram coeficientes de determinação (R^2) superiores a 99%, demonstrando assim, que o modelo foi satisfatório na modelagem da secagem da madeira em tora. As estimativas dos parâmetros *a* e *b* para as curvas de secagem nas diferentes condições de temperatura, diâmetro e casca estão apresentadas nas Tabelas 1, 2 e 3.

Tabela 1 – Parâmetros dos modelos ajustados para redução do teor de umidade das toras ao longo do tempo para a Classe 1 - diâmetro de 8 a 12 cm.

Classe Diamétrica	Temperatura	Casca	a	b	R²
Classe 1 (Ø 8 - 12 cm)	50°C	Presente	71,75	0,07	0,9955
		Ausente	65,462	0,059	0,9991
	75°C	Presente	58,253	0,325	0,9963
		Ausente	55,576	0,355	0,9961
	100°C	Presente	55,258	0,666	0,9965
		Ausente	57,502	0,87	0,9929
	125°C	Presente	51,932	1,931	0,9675
		Ausente	50,879	1,889	0,9987
	150°C*	Presente	- 55,007	44,666	0,9973
		Ausente	- 49,957	47,071	0,9992

*Modelo Linear

Tabela 2 – Parâmetros dos modelos ajustados para redução do teor de umidade das toras ao longo do tempo para a Classe 2 - diâmetro de 12,1 a 16 cm.

Classe Diamétrica	Temperatura	Casca	a	b	R²
Classe 2 (Ø 12,1 - 16 cm)	50°C	Presente	50,127	0,044	0,9958
		Ausente	46,148	0,068	0,9889
	75°C	Presente	55,668	0,151	0,9951
		Ausente	53,464	0,192	0,9949
	100°C	Presente	48,964	0,474	0,9940
		Ausente	50,673	0,551	0,9908
	125°C	Presente	45,005	0,907	0,9774
		Ausente	55,615	0,908	0,9871
	150°C*	Presente	- 40,144	53,597	0,9865
		Ausente	- 37,963	48,947	0,9942

*Modelo Linear

Tabela 3 – Parâmetros dos modelos ajustados para redução do teor de umidade das toras ao longo do tempo para a Classe 3 - diâmetro de 16,1 a 20 cm.

Classe Diamétrica	Temperatura	Casca	<i>a</i>	<i>b</i>	R²
Classe 3 (Ø 16,1 - 20 cm)	50°C	Presente	54,693	0,040	0,9963
		Ausente	50,128	0,059	0,9959
	75°C	Presente	79,600	0,086	0,9978
		Ausente	78,455	0,095	0,9981
	100°C	Presente	68,930	0,420	0,9957
		Ausente	59,546	0,420	0,9984
	125°C	Presente	67,466	0,674	0,9894
		Ausente	74,060	0,739	0,9903
	150°C	Presente	71,451	0,618	0,9823
		Ausente	69,161	0,607	0,9922

Nas Figuras 1 e 2 são apresentados os valores médios estimados de umidade das toras de eucalipto ao longo do tempo, nas diferentes temperaturas de secagem na estufa para cada classe diamétrica, na presença e ausência de casca.

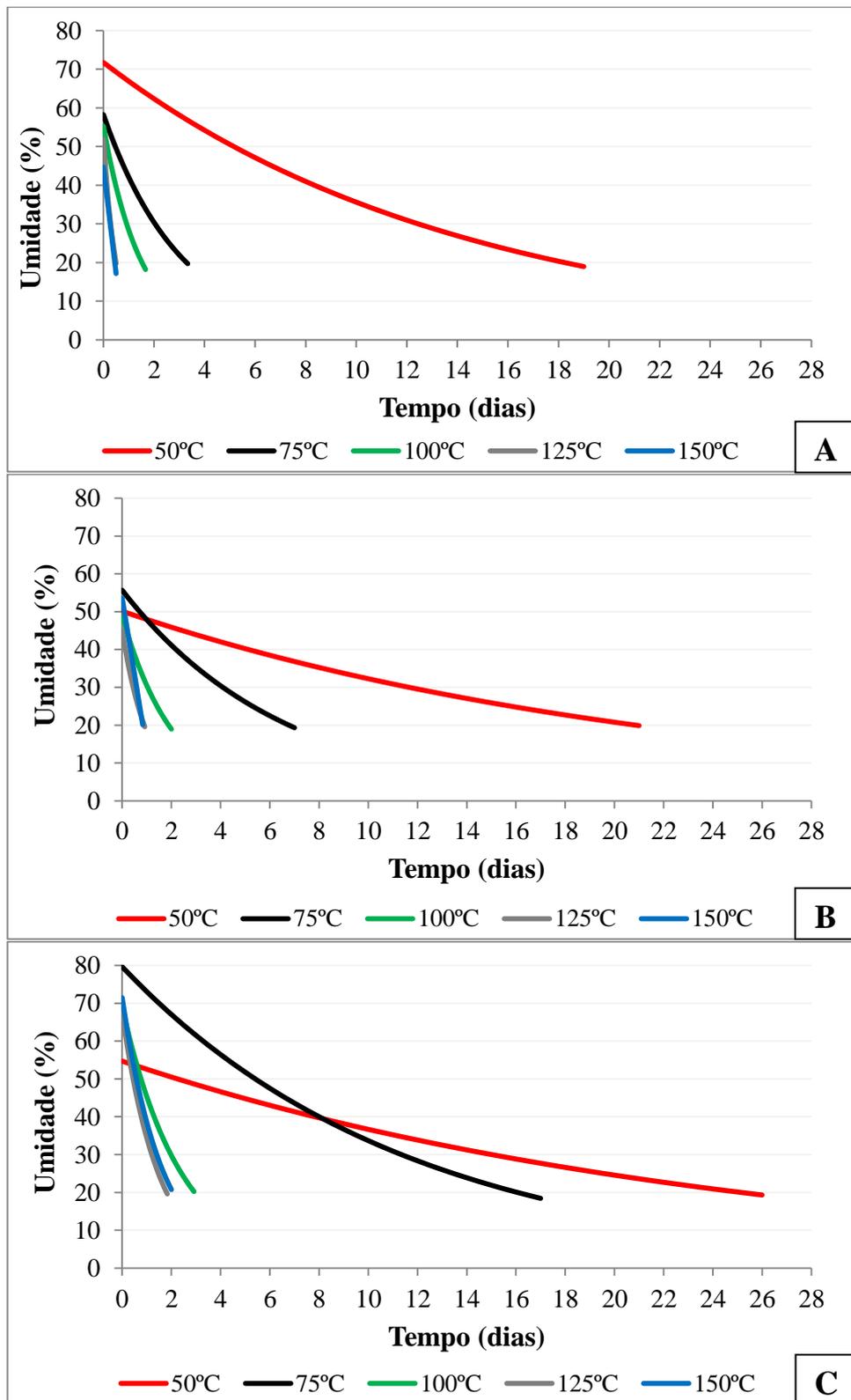


Figura 1 – Valores médios estimados de umidade das toras de eucalipto com casca em função da temperatura de secagem. **(A)** Classe 1 (Ø 8-12 cm); **(B)** Classe 2 (Ø 12,1-16 cm); **(C)** Classe 3 (Ø 16,1-20 cm).

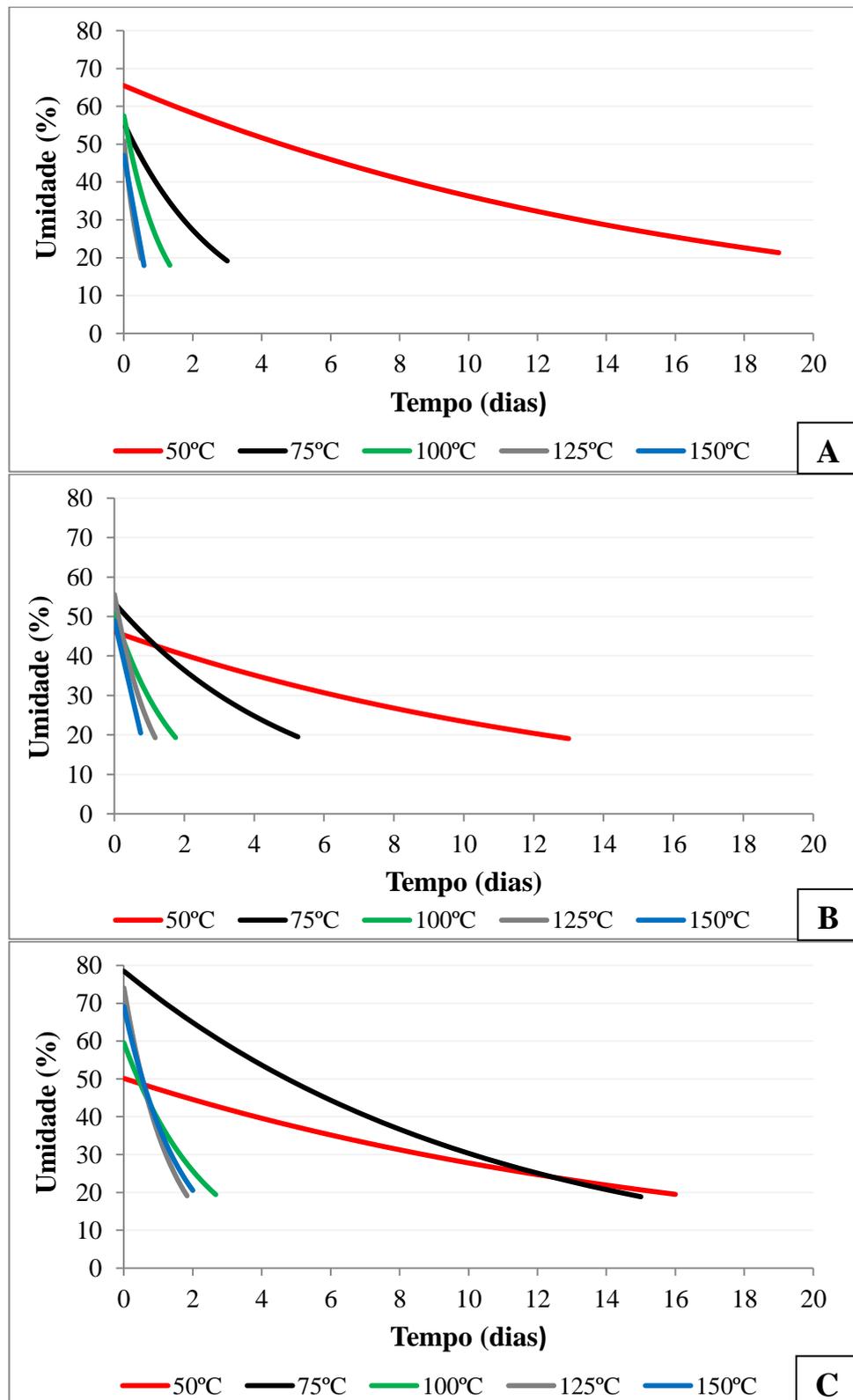


Figura 2 – Valores médios estimados de umidade das toras de eucalipto com casca em função da temperatura de secagem. (A) Classe 1 (Ø 8-12 cm); (B) Classe 2 (Ø 12,1-16 cm); (C) Classe 3 (Ø 16,1-20 cm).

Na Tabela 4 são apresentadas as taxas de secagem, redução do teor de umidade por hora, para as toras de eucalipto nas diferentes temperaturas de secagem na estufa para cada classe diamétrica, na presença ou ausência de casca.

Tabela 4 – Valores médios da taxa de secagem, %/hora, das toras de eucalipto em função da temperatura de secagem, classe diamétrica e presença ou ausência de casca

Classe Diamétrica	Casca	Taxa de Secagem (%/hora)				
		50°C	75°C	100°C	125°C	150°C
Classe 1 (Ø 8 - 12 cm)	Presente	0,12	0,48	0,93	2,68	2,29
	Ausente	0,09	0,51	1,31	2,59	2,43
Classe 2 (Ø 12,1 - 16 cm)	Presente	0,06	0,22	0,64	1,15	1,67
	Ausente	0,09	0,27	0,75	1,30	1,58
Classe 3 (Ø 16,1 - 20 cm)	Presente	0,06	0,15	0,70	1,09	1,06
	Ausente	0,08	0,17	0,63	1,25	1,01

Verifica-se nas Figuras 1 e 2 que as toras de menor diâmetro, pertencentes à Classe 1, apresentaram os menores tempos de secagem, exceto para a secagem realizada em temperatura de 50°C. Em média, para as toras da Classe 2 atingirem 20% de umidade, o tempo necessário foi 50% superior ao verificado para a Classe 1. Para as toras de maior diâmetro da Classe 3, o tempo de secagem foi 2 e 3 vezes maior, respectivamente, em relação às Classes 1 e 2.

As diferenças nos tempos de secagem são decorrentes das diferenças verificadas entre as classes diamétricas nas taxas de secagem, que diminui com o aumento do diâmetro das toras (Tabela 4). De maneira geral, observou-se as maiores taxas de secagem para as toras pertencentes à Classe 1, por isso, os menores tempos de secagem. Para a Classe 2, houve uma redução média de 40% na taxa de secagem, resultando nos tempos intermediários de secagem, enquanto que as toras pertencentes a Classe 3, apresentaram os maiores tempos de secagem devido as menores taxas de secagem, em média, 20% menor em relação à Classe 2 e 50% em relação à Classe 1.

Segundo Vital et al. (1985), o diâmetro das toras está relacionado com a distância a ser percorrida pela água do interior da madeira para sua superfície, onde será evaporada. Por isso, o maior tempo de secagem e a menor taxa de secagem das toras de maior diâmetro em relação às demais classes, evidenciando o efeito das dimensões da madeira sobre a saída de água. Assim, verifica-se que mesmo a secagem ocorrendo em

temperaturas superiores às condições naturais, o diâmetro das toras afeta a velocidade de saída de água do interior da madeira, conseqüentemente, influencia o tempo de secagem, sendo recomendada a separação das toras em classes diamétricas anteriormente à secagem em estufa para melhor operação e maior homogeneidade do teor de umidade da carga de madeira.

Observa-se que o tempo de secagem das toras de eucalipto reduz com o aumento da temperatura da estufa, para os diferentes diâmetros e na presença ou ausência de casca. Portanto, as distâncias entre as curvas de secagem e os diferentes tempos de secagem verificadas nas Figuras 1 e 2 são resultantes das diferenças existentes entre as taxas de secagem em cada temperatura (Tabela 4).

A menor taxa de secagem média, 0,08%/hora, ocorreu para a temperatura de 50°C; e quando se realizou a secagem das toras à 75°C a taxa de secagem se elevou em cerca de 4 vezes, apresentando valor igual a 0,30%/hora, enquanto que para 100°C, cujo valor médio da taxa de secagem foi igual a 0,82%/hora, a taxa foi 2,7 vezes maior que a verificada na temperatura de 75°C e 10 vezes maior em relação à 50°C. Para a temperatura de 125°C, observou-se o aumento de 2 vezes na taxa de secagem, cujo valor médio foi igual a 1,68%/hora; não houve alteração no valor médio da taxa de secagem observada na temperatura de 150°C em relação a temperatura de 125°C. Dessa forma, o aumento de 5 vezes na temperatura de secagem promoveu o aumento de 20 vezes na taxa de secagem da madeira em tora. Assim como verificado neste trabalho, Santini e Haselein (2002) observaram maior taxa de secagem para madeira serrada de *Pinus* nas temperaturas mais elevadas, no caso, 110°C em relação à 50°C.

Raad (1997) avaliando a secagem da madeira de *Eucalyptus* spp. em temperaturas variando de 75 a 225°C verificou uma redução de cerca de 30% no tempo de secagem a cada incremento de 25°C na temperatura de secagem até 150°C, acima desta temperatura não houveram alterações na curva de secagem e no tempo total de secagem. Neste trabalho, constatou-se até a temperatura de 125°C, reduções variáveis de 2 a 3 vezes no tempo de secagem das toras, e a partir de 125°C, o aumento da temperatura de secagem para 150°C promoveu redução de 10% no tempo, ou nenhuma alteração, como verificado para as toras da Classe 1.

O menor tempo de secagem em altas temperaturas se deve ao aumento da taxa de fornecimento de calor para a madeira, resultando no aumento da velocidade de migração da umidade interna para a superfície, elevando a velocidade de secagem (SANTOS et al, 2010; COELHO, 2013). Outra razão da maior eficiência da secagem em altas temperaturas seria a maior velocidade de secagem da superfície da madeira,

elevando o gradiente de umidade entre superfície e interior, além de aumentar a capacidade do ar em receber maior quantidade de vapor de água.

Diversos estudos avaliando a secagem natural de toras de eucalipto relatam que o tempo mínimo de secagem é de cerca de 60 dias para que toras de menor diâmetro alcancem umidade média igual a 30% (PINHEIRO, 2013; REZENDE et al., 2010). Assim, a utilização de estufas com temperaturas elevadas é uma opção para a redução do tempo de secagem da madeira em tora e obtenção de menores teores de umidade, pois para alcançar umidade igual a 20%, foram necessários em média, 20 dias de secagem à 50°C; 8 dias em 75°C; 2 dias para 100°C e 1 dia para 125°C e 1 dia para 150°C, sendo verificados maiores tempos para as toras de maior diâmetro.

Em projetos de secadores artificiais que visam à utilização dos gases combustos da carbonização como fonte de calor, é necessário a mistura dos gases com o ar ambiente para adequação da temperatura do fluido às condições mais seguras de secagem, visto que segundo Oliveira et al., (2013), os gases liberados pela fornalha alcançam temperaturas que variam de 200 a 500°C. Logo, visando à secagem da madeira em tora, as temperaturas mais elevadas seriam as mais indicadas para operação do secador pela necessidade de menor redução da temperatura dos gases da fornalha e pela maior velocidade de secagem resultando no menor tempo de ocupação da câmara de secagem, possibilitando a secagem da madeira para diversos ciclos de carbonização.

No entanto, como as diferenças entre o tempo e as taxas de secagem entre as temperaturas de 125 e 150°C não foram expressivas, recomenda-se que a operação de secagem de madeira em toras em secadores industriais metálicos seja realizada a 125°C, visando menores danos à estrutura do secador e risco de ocorrência de incêndios, principalmente quando a madeira estiver com baixo teor de umidade.

De modo geral, verificaram-se maiores taxas de secagem para as toras sem casca, refletindo, nos menores tempos de secagem em estufa. Para a temperatura de 50°C, a diferença média entre as taxas foi de 25%; nas temperaturas de 75 e 100°C, houve redução desta diferença, que variou entre 15 e 20%, sendo constatada nestas temperaturas significativa diferença nos tempos para a secagem até o teor de umidade estabelecido. Para as temperaturas acima de 100°C, observaram-se diferenças menores que 10% entre as taxas de secagem para toras com casca e toras sem casca, resultando em tempos de secagem iguais ou próximos, diferenças de 2 a 4 horas, para secagem conduzida em 125 e 150°C nas diferentes classes diamétricas.

Vital et al. (1985); Rezende et al. (2010) e Pinheiro (2013) avaliando a secagem natural da madeira em toras de eucalipto constataram que a presença de casca influencia

na perda de água pela madeira elevando o tempo de secagem, tornando-se menos efetiva com a redução do teor de umidade. Para a secagem em temperaturas superiores a 100°C, conforme avaliado neste trabalho, não houve efeito significativo da presença de casca sobre o tempo de secagem para toras de eucalipto, independente do diâmetro. Assim, os secadores artificiais da madeira em tora devem operar na faixa de temperatura de 100 a 150°C para que não seja necessário o descascamento, operação que elevaria os custos e atividades envolvidas na produção de madeira destinada à carbonização.

4. CONCLUSÃO

A secagem de toras de madeira em estufa à altas temperaturas promoveu a redução da umidade a valores próximos a 20% para todas as classes diamétricas, com presença ou ausência de casca, em intervalos de tempo satisfatórios, menores que 30 dias.

O aumento da temperatura promoveu o aumento da taxa de secagem e consequente redução do tempo de secagem, não havendo alteração a partir de 125°C.

A taxa de secagem das toras de menor diâmetro foram superiores ao verificado para as toras de maior diâmetro nas mesmas condições de temperatura, resultando em diferença no tempo de secagem, sendo recomendada a separação das toras em classes diamétricas anteriormente à secagem em estufa.

A presença de casca na madeira de *Eucalyptus urophylla* em toras foi insignificante na secagem em temperaturas superiores a 100°C, não sendo recomendado o descascamento das toras.

As melhores condições de operação de secadores artificiais para a madeira em tora seria em temperaturas de 125°C, com toras com presença de casca separadas em classes diamétricas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, C. E. C.; Desenvolvimento de um sistema de pré-secagem de partículas de Pinus e de Eucalipto para produção de chapas de madeira aglomerada. 2000. **Floresta e Ambiente**, Seropédica - RJ, v.7, n.1, p.104-120, 2000.

ARRUDA, T. P. M.; PIMENTA, A. S.; VITAL, B. R.; LUCIA, R. M. D.; ACOSTA, F. C. Avaliação de duas rotinas de carbonização em fornos retangulares. 2011. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.35, n.4, p.949-955, 2011.

CARDOSO, M. T.; DAMÁSIO, R. A. P.; CARNEIRO, A. C. O.; JACOVINE, L. A. G.; VITAL, B. R.; BARCELLOS, D. C. Construção de um sistema de queima de gases da carbonização para redução da emissão de poluentes. 2010. **Cerne**, Lavras, v. 16, Suplemento, p. 115-124, 2010.

CARVALHO, S. R.; BORGES, V. L.; MULINA, B. H. O.; OLIVEIRA, R. L. M.; FIGUEIRA JÚNIOR, E. A.; PESSOA FILHO, J. S. Instrumentação térmica aplicada ao processo de produção de carvão vegetal em fornos de alvenaria. 2012. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.36, n.4, p.787-796, 2012.

COELHO, L. D. N. **Modelagem e simulação da secagem de partículas sólidas de biomassa em temperaturas típicas de combustão**. 2013. 86p. Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2013.

COSTA, J. M. F. N. **Temperatura final de carbonização e queima dos gases na redução de metano, como base à geração de créditos de carbono**. 2012. 79f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2012.

DONATO, D. B. **Métodos de amostragem e de determinação do teor de umidade da madeira em tora**. 2013. 70p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2013.

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

GUIMARÃES NETO, R. M.; PIMENTA, A. S.; SILVA, M. L.; SOARES, N. S.; VITAL, B. R.; SILVA, J. C. Avaliação econômica e financeira de projetos de fornos dos tipos container industrial e retangular de 40 estéreos. 2007. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.31, n.4, p.709-715, 2007.

JANKOWSKY, I. P. Melhorando a eficiência dos secadores para madeira serrada. 2000. **Circular Técnica IPEF**, n. 191, 14p. 2000.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; PEREIRA, B. L. C.; VITAL, B. R.; CARVALHO, A. M. M. L.; TRUGILHO, P. F.; DAMÁSIO, R. A. P. Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. 2013. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.37, n.3, p.557-566, 2013.

- PINHEIRO, M. A. **Influência das dimensões da madeira na secagem e nas propriedades do carvão vegetal**. 2013. 80p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2013.
- REZENDE, R. N.; LIMA, J. T. PAULA, L. E. R.; FARIA, A. L. R. Secagem ao ar livre de toras de *Eucalyptus grandis* em Lavras, MG. 2010. **Cerne**, Lavras, v.16, Suplemento, p. 41-47, 2010.
- RAAD, T. J. **Modelagem do processo de secagem do *Eucalyptus* spp a altas temperaturas**. 1997. 86p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, 1997.
- SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R. Efeito da temperatura e velocidade do ar sobre a taxa de secagem da madeira de *Pinus elliotti* Engelm. 2002. **Ciência Florestal**, Santa Maria - RS, v. 12, n. 2, p. 99-106, 2002.
- SANTOS, C. T.; BONOMO, R. F.; CHAVES, M. A.; FONTAN, R. C. I.; BONOMO, P. Cinética e modelagem da secagem de carambola (*Averrhoa carambola* L.) em secador de bandeja. 2010. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá-PR, v. 32, n. 3, p. 309-313, 2010.
- STATSOFT INC. **Statistica data analysis system version 8.0**. Tulsa: Statsoft Inc., 2007.
- VITAL, B. R.; DELLA LUCIA, R. M.; VALENTE, O. F. Estimativa do teor de umidade de lenha para carvão em função do tempo de secagem. **Revista Árvore**, v.9, s/n, p.10-27, 1985.
- YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H. ; ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. 2007. **Fuel**, v. 86, p. 1781-1788, 2007.
- ZANUNCIO, A. J. V.; MONTEIRO, T. C.; LIMA, J. T.; ANDRADE, H. B.; CARVALHO, A. G. Drying biomass for energy use of *Eucalyptus urophylla* and *Corymbia citriodora* Logs. 2013. **BioResources**, v.8, n. 4, p. 5159-5168, 2013.
- ZUCOLOTO, M.; COSTA, M. G.; CARVALHO, L. M.; SANTOS, D.; SIQUEIRA, D. L. Estimativa da produção de sementes de porta-enxertos cítricos por meio da massa de frutos. 2011. **Revista Ceres**, Viçosa-MG, v. 58, n. 1, p. 126-128, 2011.

CAPÍTULO III

FLUXO DE AR ENTRE TORAS DE MADEIRA COMO SUBSÍDIO PARA PROJETOS DE SECADORES ARTIFICIAIS

Resumo - A secagem da madeira é influenciada por fatores inerentes à madeira e por fatores externos, como temperatura, umidade relativa e circulação do ar. O objetivo deste trabalho foi avaliar o fluxo de ar entre toras de madeira de *Eucalyptus urophylla*, em diferentes condições de diâmetro, presença ou ausência de casca e diferentes velocidades do ventilador, buscando subsidiar projetos de secadores artificiais. Para avaliar o fluxo de ar entre as toras de eucalipto, utilizou um equipamento denominado “Túnel de Vento” composto por um ventilador centrífugo e um tambor metálico. O tambor foi preenchido com toras de diferentes classes diamétricas (1, 2, 3 e Mista) e com presença ou ausência de casca. Em seguida o ventilador foi acionado em diferentes rotações do motor (900, 1200, 1500 e 1800 RPM), insuflando ar sobre as toras empilhadas. Determinou-se para cada empilhamento o volume ocupado pelas toras e o fluxo de ar entre as toras por meio de medições da velocidade de entrada e saída do ar utilizando um anemômetro. A redução da velocidade do ar foi determinada pela relação entre as velocidades de entrada e saída. Conclui-se que os projetos de secadores devem contemplar ventiladores com rotações iguais ou acima de 1800 RPM, que a mistura de toras de diferentes diâmetros mostra-se como melhor condição para o empilhamento da madeira nestes secadores e que a presença de casca nas toras de *Eucalyptus urophylla* aumentou o volume ocupado e promoveu menor redução da velocidade do ar.

Palavras-chave: Empilhamento; Escoamento do ar; Velocidade do ar.

1. INTRODUÇÃO

As empresas consumidoras de madeira em tora visando a menor ocupação de suas áreas e por questões de logística de transporte realizam a construção de pilhas de madeira em tora nas bordas dos talhões, onde permanecem para secagem até atingirem umidade adequada. Estas pilhas normalmente, não apresentam separação das toras por classe de diâmetro, apresentam comprimento e largura variáveis de acordo com as dimensões da madeira adotadas por cada empresa e alcançam alturas de 3 a 4 metros (SANTOS et al., 2012).

O simples empilhamento da madeira e exposição às condições ambientais locais consiste na secagem natural ou ao ar livre, que segundo Zanuncio et al., (2013), é o principal método de secagem empregado para madeira em toras devido seu baixo investimento. No entanto, requer longo período de tempo para atingir valores adequados de teor de umidade que, para o processo de carbonização está em torno de 30 a 35%, abaixo deste teor, a secagem ao ar livre torna-se inviável técnica e economicamente.

A secagem da madeira é influenciada por fatores inerentes à madeira, tais como espécie, diâmetro, características anatômicas, permeabilidade; e por fatores externos que se relacionam com o ambiente de secagem, como temperatura, umidade relativa e circulação do ar ou velocidade do vento (GALVÃO E JANKOWSKY, 1985). Na secagem artificial, em câmaras, podem-se obter maiores velocidades de secagem pela possibilidade de controle dos fatores ambientais através da elevação da temperatura via sistemas de aquecimento, redução da umidade relativa do ar e circulação forçada do ar sobre a madeira. Enquanto que na secagem ao ar livre estes parâmetros não são possíveis de controlar, estando a secagem sob influência das condições climáticas locais.

Segundo Klitze (2003) as principais funções da circulação do ar no processo de secagem são de transmitir energia necessária para aquecer a água contida na madeira facilitando sua evaporação, remover a água evaporada da superfície da madeira e renovar o ar em relação às condições de temperatura e umidade relativa. Desse modo, a circulação do ar deve ocorrer de maneira bem distribuída e de modo que o ar percorra o máximo possível da superfície do maior número de peças.

No entanto, a maneira como as toras de madeira são empilhadas e a sua forma cilíndrica, poucos espaços vazios são deixados entre elas além da presença de casca que dificulta a circulação de ar, desfavorecendo a secagem devido a não renovação da massa

de ar presente sobre a superfície da madeira, influenciando na evaporação de água e consequentemente, elevando o tempo de secagem.

Outro aspecto negativo verificado na secagem ao ar livre de toras de madeira é a heterogeneidade do teor de umidade ao longo da pilha, mesmo após longo período de exposição às condições ambientais. Segundo Santos et al., (2012) existe uma tendência das toras da base apresentarem maiores teores de umidade em relação às toras localizadas no topo, pelo fato do topo apresentar condições ambientais, incidência solar e circulação de ar favoráveis a secagem natural da madeira.

Estudos que avaliem a circulação do ar sobre a pilha de madeira em toras e a influência das características da madeira, tais como casca e diâmetro, tornam-se necessários para a elaboração de projetos de secadores artificiais com circulação forçada de ar por meio de ventiladores, visto a atual necessidade das empresas em reduzir o tempo de secagem para reduzir a necessidade de estoque de madeira, a ocupação de grandes áreas e alcançar menores valores de umidade.

Portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a passagem de um fluxo de ar entre toras de madeira de *Eucalyptus urophylla*, em diferentes condições de diâmetro e presença ou ausência de casca, como subsídio para futuros projetos de secadores artificiais. Objetivou-se também, a avaliação de diferentes velocidades do ventilador na passagem de ar entre as toras de eucalipto.

2. MATERIAL E MÉTODOS

As toras de madeira utilizadas neste estudo foram colhidas em um plantio de *Eucalyptus urophylla*, com idade de 5 anos, cultivados em espaçamento de 3 x 2 m, localizados na cidade de Viçosa-MG. Esse município apresenta altitude média de 650 m, o clima, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cwb, mesotérmico, com inverno seco e verão chuvoso. A precipitação média anual é de 1200 mm e a temperatura média anual é de 20,5°C, com mínima de 14,6°C e máxima de 26,3°C (ZUCOLOTO et al., 2011).

2.1. Preparo das amostras

Foram coletadas 9 árvores com diâmetro à altura do peito (DAP) médio de 18 cm e altura média de 25 m. Cada árvore foi seccionada em toras com 1,5 m de comprimento até o diâmetro mínimo de 8 cm.

As toras foram levadas para o Laboratório de Propriedades da Madeira – LPM da Universidade Federal de Viçosa, onde se realizou a determinação da circunferência da base e topo de todas as toras de eucalipto para obtenção do diâmetro médio. Posteriormente, elas foram separadas em 3 classes de diâmetro, sendo o número e frequência em cada classe diamétrica apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Diâmetro mínimo e máximo, número de toras de eucalipto e frequência por classe de diâmetro

Classe Diamétrica	Centro de Classe (cm)	Diâmetro (cm)		Frequência	
		Mínimo	Máximo	Nº Toras	%
1	10	8	12	58	40,85
2	14	12,1	16	45	31,69
3	18	16,1	20	39	27,46
Total				142	100

Para avaliar a influência do diâmetro e da presença ou ausência de casca em relação à passagem de ar entre as toras de eucalipto, manteve-se o comprimento de 1,5 m. Inicialmente, realizaram-se as avaliações das toras com casca, que posteriormente foram descascadas manualmente, procedendo com a avaliação da madeira sem casca.

2.2. “Túnel de Vento”

Para avaliação do fluxo de ar entre as toras de eucalipto confeccionou-se um equipamento que foi denominado de “Túnel de Vento” dotado de um ventilador centrífugo e um tambor metálico (Figura 1). Este equipamento teve como objetivo promover a circulação de ar sobre a madeira em tora empilhada.

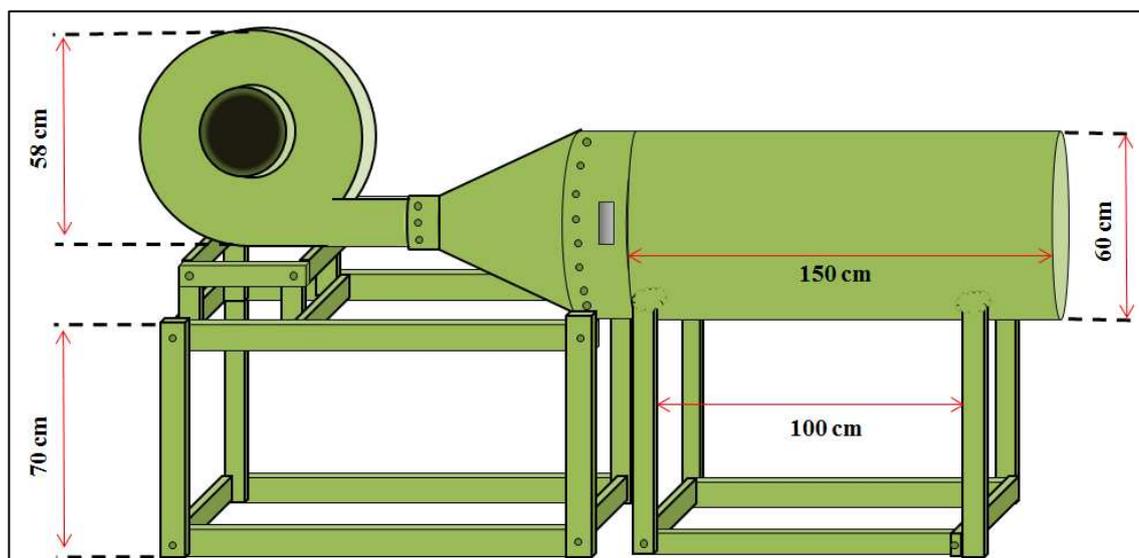


Figura 1 – Equipamento “Túnel de Vento”: ventilador centrífugo à esquerda e tambor metálico à direita.

O ventilador centrífugo media 58 cm de diâmetro, e era acionado por um motor elétrico de 1 CV, com controle de rotação através de um inversor de frequência, o que permitiu o controle da velocidade do fluxo de ar à ser insuflado sobre as toras. O ventilador e o tambor metálico foram fixados sobre uma estrutura de aço, ficando 70 cm acima do solo (Figura 1).

A saída de ar do ventilador foi prolongada até alcançar diâmetro igual ao do tambor, 60 cm. Internamente, mais próximo ao ventilador, instalou-se um cone para a melhor distribuição do ar em toda a circunferência da saída de ar (Figura 2).

O tambor foi confeccionado em aço, com dimensões de 150 cm de comprimento e 60 cm de diâmetro, sendo sustentado por uma estrutura metálica, com altura igual a 70 cm (Figura 1). O tambor foi utilizado para o empilhamento horizontal das toras de eucalipto.

Para medir a velocidade do ar gerado pelo ventilador nos diferentes empilhamentos e rotações do motor de acionamento, foram realizadas quatro aberturas na estrutura metálica, em detalhe uma abertura na Figura 2, para inserir a ventoinha do

anemômetro. Para estas medições, utilizou-se um termo anemômetro digital portátil modelo TAD 500, com escala de velocidade de 0,3 a 45 m/s, resolução de 0,1 m/s e precisão de $\pm 3\%$. O sensor do tipo ventoinha era separado do equipamento por cabo, temperatura de operação de 0 a 50°C e a umidade relativa de operação abaixo de 80%.

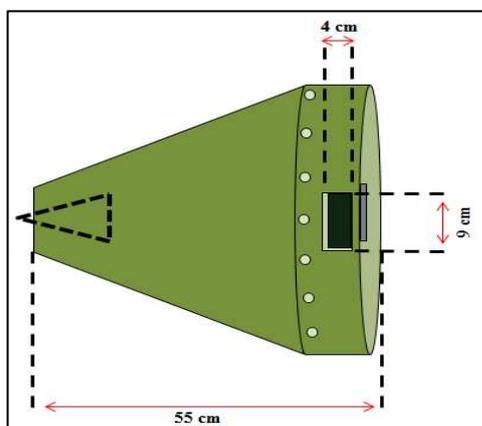


Figura 2 – Estrutura de saída de ar do ventilador, mostrando o posicionamento interno no cone de distribuição do ar e abertura para inserção da ventoinha do anemômetro.

2.3. Volume ocupado pelas toras de eucalipto dentro do tambor metálico

Para determinar o volume ocupado pelas toras de eucalipto dentro do tambor metálico, em cada empilhamento realizado em função do diâmetro e presença ou ausência de casca gerou-se uma imagem fotográfica da disposição das toras no interior do tambor.

A partir destas imagens, utilizando o software ArcGIS delimitou-se e determinou-se a área transversal de cada tora e através do somatório dessas, a área total do tambor ocupada pelas toras. O volume de madeira utilizado em cada empilhamento foi determinado multiplicando-se o somatório das áreas individuais das toras pelo seu comprimento, igual a 1,5 m.

O percentual de volume ocupado pela madeira no tambor metálico foi calculado pela razão entre o volume das toras empilhadas e volume do tambor vazio, igual a 0,4245 m³.

2.4. Fluxo de ar entre toras de eucalipto

Para determinação do fluxo de ar entre as toras de eucalipto, primeiramente, o tambor metálico foi preenchido com número de toras variável conforme o tratamento

definido (diâmetro e presença ou ausência de casca). Em seguida, o ventilador foi posicionado de forma que ficasse próximo ao tambor metálico, direcionando todo o fluxo de ar gerado sobre as toras empilhadas horizontalmente.

Para verificar a influência da velocidade do ar em relação ao fluxo entre toras, testaram-se quatro diferentes rotações do motor: 900; 1200; 1500 e 1800 RPM, promovendo assim, o incremento na velocidade do ventilador, elevando a velocidade de circulação do ar. O ventilador permaneceu ligado durante 30 minutos em cada rotação de motor, sendo realizadas as medições somente 5 minutos após o seu acionamento.

Para cada empilhamento em função dos tratamentos (classe diamétrica, presença ou ausência de casca e rotação do motor de acionamento do ventilador), determinou-se inicialmente, a velocidade do ar sobre as toras na entrada do tambor. Esta velocidade foi medida na saída de ar do ventilador, anteriormente às toras empilhadas, inserido a ventoinha do anemômetro nas aberturas realizadas na estrutura do ventilador (Figura 2), em cinco pontos distribuídos conforme a Figura 3.

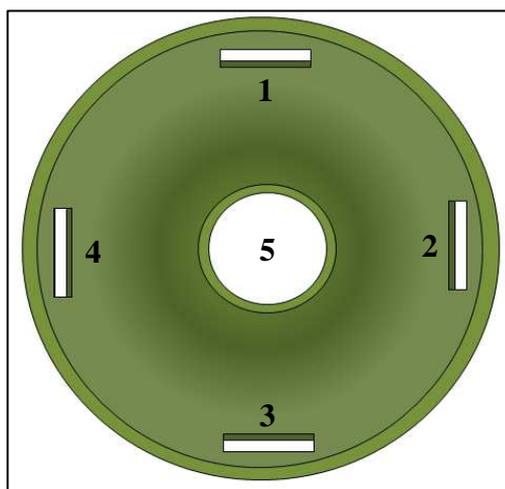


Figura 3 – Vista frontal do ventilador, indicando os pontos de medição da velocidade de entrada do ar sobre as toras de eucalipto.

Posteriormente, sem alterar o empilhamento ou a rotação do motor, determinou-se a velocidade do ar na saída do tambor, após sua passagem entre as toras de eucalipto empilhadas no interior do tambor metálico. As medições foram realizadas nas regiões onde havia fluxo de ar, entre as toras e a parede do tambor (P) e entre as toras (ET), conforme a Figura 4, sendo o número de pontos amostrados variáveis em função das diferentes classes diamétricas e presença ou ausência de casca.

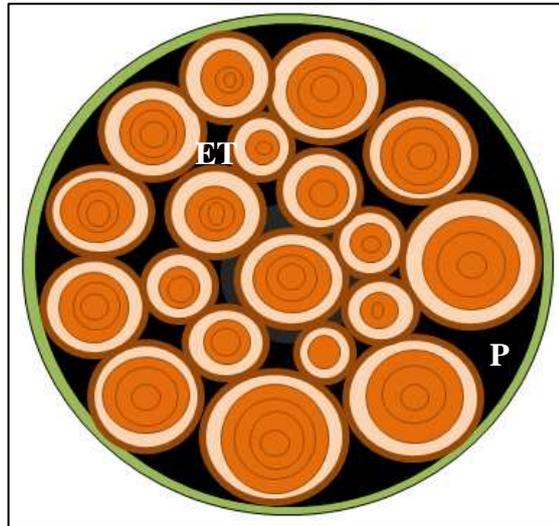


Figura 4 – Vista frontal do tambor metálico preenchido, indicando os pontos de medição da velocidade de saída do ar sobre as toras. P – entre toras e parede; ET – entre toras.

Todas as medições da velocidade do ar foram realizadas em duplicata. As toras eram retiradas após a primeira medição e depois realizava-se um novo carregamento do tambor, sendo as velocidades novamente mensuradas após a estabilização do fluxo de ar gerado pelo ventilador sobre as toras.

Determinou-se para cada tratamento, a redução na velocidade do ar no interior do tambor metálico em razão do diâmetro das toras, presença ou ausência de casca e velocidade do ventilador, relacionando a velocidades médias do ar anteriormente à entrada no tambor e na saída do tambor metálico, após o fluxo, conforme a Equação 1:

$$\text{Redução da Velocidade (\%)} = \frac{V_e - V_s}{V_e} * 100 \quad (1)$$

Sendo,

V_e: Velocidade de entrada do ar sobre as toras, em m/s; e,

V_s: Velocidade de saída do ar sobre as toras, em m/s.

2.5. Delineamento estatístico

2.5.1. Volume ocupado pelas toras de eucalipto dentro do tambor metálico

Para avaliar o efeito das classes diamétricas (8-12; 12,1-16; 16,1-20 cm e Mista) e a presença ou ausência de casca no volume ocupado no tambor metálico pelas toras de eucalipto foi instalado um experimento fatorial 4 x 2 em delineamento inteiramente casualizado, com 2 repetições, totalizando 16 unidades amostrais.

Os dados foram submetidos aos testes de Lilliefors para testar a normalidade e de Cochran para testar a homogeneidade das variâncias e, em seguida, submetidos à análise de variância (ANOVA). A comparação entre os diferentes tratamentos foi feita pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e 95% de significância.

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do programa STATISTICA 8.0 (2007).

2.5.2. Fluxo de ar entre toras de eucalipto

Para avaliar o efeito das classes diamétricas (8-12; 12,1-16; 16,1-20 cm e Mista), a presença ou ausência de casca e a rotação do motor de acionamento do ventilador (900, 1200, 1500 e 1800 RPM) nas velocidades do ar na entrada e saída do tambor e a redução da velocidade do ar em relação à passagem entre toras foi instalado um fatorial completo 4 x 2 x 4 em delineamento inteiramente casualizado, com 4 repetições, totalizando 128 unidades amostrais. Considerou-se classe diamétrica e presença ou ausência de casca fatores qualitativos e a rotação do motor, quantitativo.

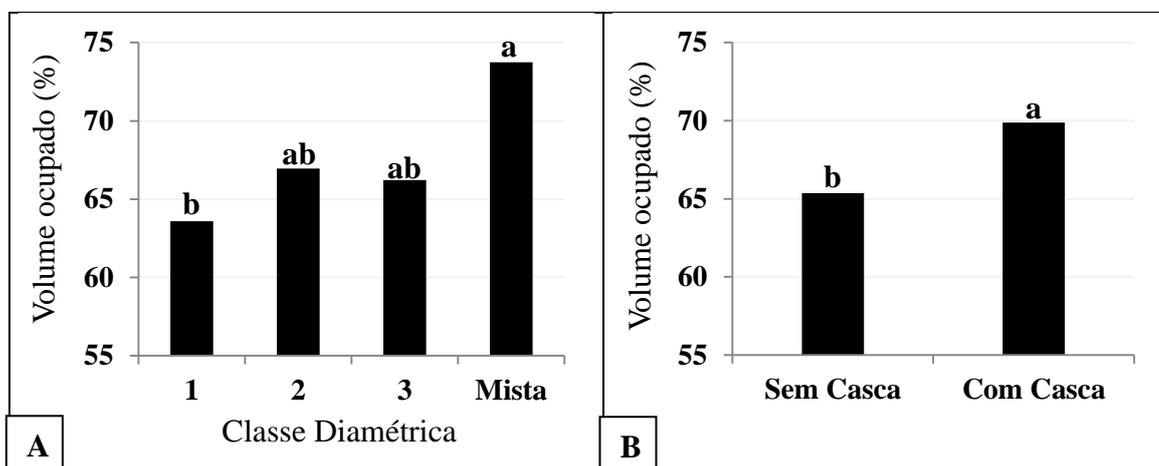
Os dados foram submetidos aos testes de Lilliefors para testar a normalidade e de Cochran para testar a homogeneidade das variâncias e, em seguida, submetidos à análise de variância (ANOVA). A comparação entre os diferentes tratamentos foi feita pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e 95% de significância.

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do programa STATISTICA 8.0 (2007).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Volume ocupado pelas toras de eucalipto dentro do tambor metálico

Na Figura 5 são apresentados os percentuais de volume ocupado pelas toras dentro do tambor metálico para as quatro classes diamétricas: Classe 1, diâmetros de 8 a 12 cm; Classe 2, diâmetros de 12,1 a 16 cm; Classe 3, diâmetros de 16,1 a 20 cm e Mista, toras das diferentes classes diamétricas em função das frequências observadas, na presença ou ausência de casca. De acordo com a análise de variância (ANOVA), não houve efeito da interação classe diamétrica e da presença ou ausência de casca sobre o volume ocupado. No entanto, houve efeito significativo a 5% de probabilidade destes parâmetros isoladamente.



Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Tukey.

Figura 5 – Volume ocupado pelas toras de eucalipto. A) Em relação às classes diamétricas; B) Em relação à presença ou ausência de casca.

Observa-se que a Classe 1 apresentou a menor ocupação média do volume do tambor por toras de eucalipto (63,59%), enquanto o maior volume ocupado ocorreu para a Classe Mista, 73,75%. As Classes 2 e 3 com valores médios iguais a 66,95 e 66,22%, respectivamente, não diferiram significativamente das Classes 1 e Mista.

O preenchimento incompleto do tambor resultou em espaços vazios, seja entre as toras ou entre as toras e a parede, dessa forma, o maior volume de vazios ocorreu para a Classe 1, toras de menor diâmetro, e o menor para a Classe Mista, com toras dos diferentes diâmetros. A ocorrência de espaços vazios entre toras aumenta a

permeabilidade da pilha de madeira à passagem de ar, diminuindo a resistência e permitindo uma maior circulação do ar, condição ideal para a secagem da madeira.

Em secadores de madeira a circulação de ar ocorrerá nos espaços existentes entre as toras, resultante do empilhamento. Segundo Galvão e Jankowsky (1985), a movimentação de ar tem a finalidade de transferir energia para a superfície da madeira empilhada e a renovação do ar através da retirada do ar úmido sob a madeira e a sua substituição por ar seco. Em secadores industriais, a circulação de ar também irá realizar uma distribuição homogênea do calor entre as toras de madeira.

Para os carregamentos do tambor, simulando o empilhamento da madeira em tora, houve variação no número de toras necessárias para o preenchimento máximo do tambor metálico. Para a Classe 1 foram necessárias, em média, 36 toras de madeira; para as Classes 2 e 3, necessitou-se, respectivamente, de 15 e 10 toras em média e para a Classe Mista, utilizou-se, em média, 21 toras.

A Classe 1 apresentou espaços vazios com dimensões menores, mas em maior quantidade em relação aos espaços verificados para as Classes 2 e 3, resultando assim, no maior volume total de espaços vazios e conseqüentemente, no menor volume ocupado pelas toras de eucalipto. O maior percentual de volume ocupado verificado para a classe Mista (Figura 5A) ocorreu pelo preenchimento de parte dos espaços vazios com toras de menor diâmetro, visto que nos empilhamentos das Classes 2 e 3 ocorreram espaços vazios com dimensões que não possibilitavam o preenchimento com toras desta mesma classe, mas que poderiam ser preenchidas com toras da classe inferior.

Mesmo que os espaços vazios entre toras favoreça a secagem, deve-se salientar que os secadores industriais para madeira em toras apresentarão dimensões e volume fixos. Logo, o preenchimento ou volume ocupado deve ser o máximo possível para otimização da carga, uma vez que nestes secadores, a madeira permanecerá durante 3 a 4 dias em seu interior para atingir valores adequados de umidade. Para carregamento manual, como realizado neste trabalho, pode-se obter maior ocupação do volume disponível devido a maior organização das toras durante o empilhamento, enquanto que no empilhamento realizado com máquinas, a organização das toras torna-se mais difícil, podendo reduzir o volume ocupado do secador.

Observando-se a Figura 5B, verifica-se a influência da casca sobre o preenchimento do tambor por toras de eucalipto. O percentual médio de volume ocupado pelas toras com casca foi superior, cerca de 4,5%, ao verificado para as toras sem casca.

Em relação aos carregamentos do tambor metálico para os diferentes diâmetros, verificou-se que para o empilhamento das toras sem casca foram necessários de 1 a 3 toras a mais, dependendo do diâmetro, em relação à quantidade utilizada para o empilhamento das toras com casca. No entanto, o aumento no número de toras sem casca foi insuficiente para compensar o volume ocupado pela casca, cujo percentual para as toras de *Eucalyptus urophylla* variou entre 7,31 e 9,55%, além do fato do maior número de toras gerarem aumento do número de espaços vazios, conseqüentemente, elevando o volume não preenchido com madeira.

De modo geral, a presença de casca acarretou no aumento do volume ocupado pelas toras de *Eucalyptus urophylla*. Porém, ressalta-se que as espécies de eucalipto apresentam diferentes proporções e morfologia da casca, além da presença de casca influenciar a secagem da madeira, elevando o tempo necessário de exposição ao ambiente para atingir determinado teor de umidade (PINHEIRO, 2013), principalmente no início do processo de secagem ao ar livre e podendo ser significativo na secagem artificial em função da temperatura utilizada para secagem. Logo, na elaboração de projetos e execução da secagem em secadores artificiais, deve-se avaliar a ocupação do volume disponível e a influencia da casca e do diâmetro na secagem da madeira em tora.

3.2. Fluxo de ar entre toras de eucalipto

3.2.1. Velocidade do ar na entrada do tambor

Para a velocidade do ar na entrada do tambor, medida anteriormente ao tambor metálico preenchido com toras de eucalipto, não houve efeito significativo da classe diamétrica e da presença ou ausência de casca, a 5% de probabilidade. O valor médio da velocidade do ar na entrada do tambor foi igual a 1,99 m/s.

A Classe 1, diâmetro de 8 a 12 cm, e a Classe 2, diâmetros de 12,1 a 16 cm, apresentaram velocidades, respectivamente, iguais a 2,01 e 2,03 m/s, enquanto a Classe 3 (diâmetros de 16,1 a 20 cm) apresentou 1,97 m/s e a Classe Mista, diferentes diâmetros, 1,96 m/s. Provavelmente, as maiores velocidades do ar na entrada do tambor verificada nas menores classes de diâmetro deve ao menor volume de madeira no interior do tambor metálico (Figura 5A), favorecendo a entrada de ar, em função do maior volume vazio que não bloqueia a passagem de ar.

Para as toras com casca, verificou-se o menor valor médio, 1,92 m/s, enquanto que para toras descascadas, a velocidade média foi igual a 2,07 m/s. Mesmo não sendo significativo o efeito da casca sobre a velocidade de entrada, observa-se que a ausência de casca favoreceu a velocidade do ar na entrada do tambor por apresentar menor resistência ao escoamento de ar. No entanto, o descascamento seria mais uma etapa na secagem da madeira em tora, elevando os custos.

Na Figura 6 são apresentados os valores médios observados e estimados da velocidade do ar, em m/s, na entrada do tambor metálico anteriormente às toras empilhadas horizontalmente, para as diferentes rotações do motor de acionamento do ventilador.

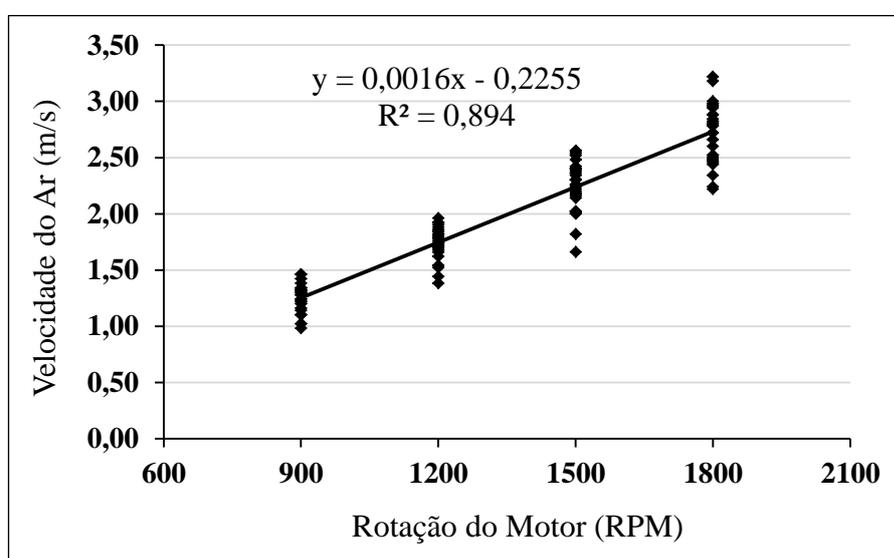


Figura 6 – Valores observados e estimados da velocidade do ar (m/s) na entrada do tambor em função das diferentes rotações do motor de acionamento do ventilador.

O aumento na rotação do ventilador resultou na elevação significativa da velocidade do ar na entrada do tambor, anteriormente às toras empilhadas. Observa-se na Figura 6, que o incremento de 300 RPM na velocidade do ventilador promoveu, em média, o aumento de 0,5 m/s na velocidade do ar na entrada do tambor. Isto ocorre, pois quando o motor promove a movimentação do ventilador, ocorre a transformação de energia mecânica em energia cinética, que ao ser cedida para o fluido promove seu escoamento (ALÉ, 2001). Logo, quanto maior a rotação do ventilador (energia mecânica), maior será a energia transmitida para o ar, elevando assim sua velocidade e maior será a força para vencer a resistência ao seu escoamento.

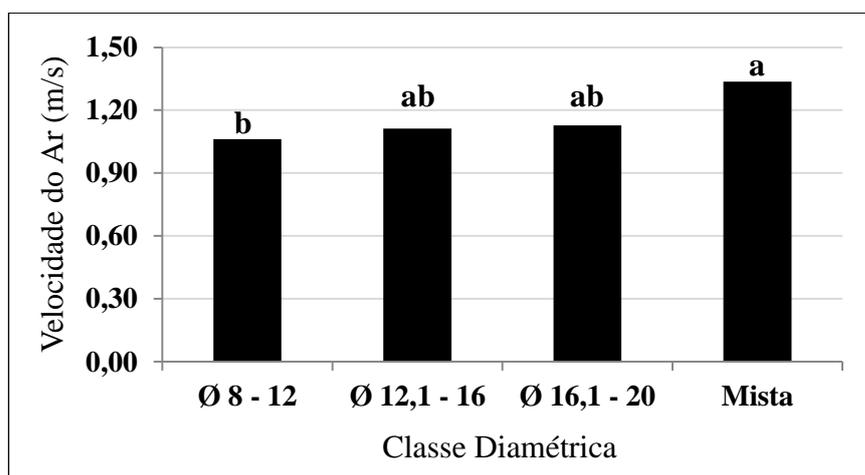
Verifica-se que nas menores rotações, 900 e 1200 RPM, houve uma menor variabilidade dos valores de velocidade de entrada do ar, com desvio padrão de 0,12 e 0,14 m/s, respectivamente. Enquanto que para as maiores rotações houve maior variação da velocidade de entrada, com desvio-padrão igual 0,22 m/s para 1500 e desvio de 0,26 m/s para 1800 RPM. Provavelmente, a maior variação dos valores da velocidade de entrada verificada para as maiores rotações deve-se a maior turbulência gerada pelo aumento da velocidade de circulação do ar.

Segundo Hildebrand (1970), para secagem de madeira serrada em estufas é recomendado, para a maioria das espécies, que a velocidade do ar esteja entre 2,0 e 3,0 m/s, sendo alterada de acordo com a taxa de secagem da espécie e temperatura utilizada. Assim, devido à carência de informações sobre a influência da velocidade de circulação do ar sobre a secagem da madeira em tora, os projetos de secadores artificiais de madeira em tora tem-se baseado nesta faixa de velocidade. Velocidades acima de 2 m/s, foram verificadas somente para as rotações de 1500 RPM (2,26 m/s) e 1800 RPM (2,72 m/s), portanto, estes projetos devem contemplar ventiladores rotação mínima igual a 1500 RPM, sendo recomendado maiores valores possíveis, no caso, 1800 RPM, visando maior velocidade e circulação do ar.

3.2.2. Velocidade do ar na saída do tambor

Para a velocidade do ar na saída do tambor, medida após a passagem do fluxo de ar sobre as toras, verificou-se que somente a classe diamétrica apresentou efeito significativo. Enquanto que a presença ou ausência de casca nas toras de eucalipto, a 5% de probabilidade, não foi significativo.

Na Figura 7 são apresentados os valores médios da velocidade do ar na saída do tambor, em m/s, após o fluxo de ar sobre as toras de eucalipto empilhadas dentro do tambor metálico para as diferentes classes de diâmetro, Classe 1, diâmetros de 8 a 12 cm; Classe 2, diâmetros de 12,1 a 16 cm; Classe 3, diâmetros de 16,1 a 20 cm e Mista, toras das diferentes classes diamétricas.



Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Tukey.

Figura 7 – Valores médios da velocidade do ar (m/s) na saída do tambor para as diferentes classes de diâmetro.

Conforme observado na Figura 7, a classe diamétrica afetou significativamente a velocidade do ar na saída do tambor após sua passagem pelas toras empilhadas. A menor velocidade do ar na saída foi verificada para a Classe 1, com velocidade igual a 1,06 m/s, as Classes 2 e 3 tiveram velocidades intermediárias e a Classe Mista, apresentou a maior velocidade média, 1,34 m/s.

O aumento da velocidade do ar na saída nas Classes 2 e 3 em relação à Classe 1 deve-se ao aumento nas dimensões dos espaços vazios existentes entre as toras e entre as toras e a parede do tambor. Provavelmente, a maior velocidade verificada para a Classe Mista mesmo este apresentando maior ocupação do volume do tambor (Figura 5A), deve-se a diversidade de tamanho e quantidade de espaços vazios existentes no empilhamento das toras desta classe, favorecendo o escoamento de ar entre as toras.

Observou-se ainda que, não houve efeito significativo da presença ou ausência de casca sobre a velocidade do ar na saída do tambor metálico, cujo valor médio foi igual a 1,16 m/s. Assim, o aumento no número de toras para o preenchimento do tambor para as toras descascadas apresenta o mesmo efeito da presença de casca sobre o escoamento de ar sobre as toras, devendo avaliar técnica e economicamente a necessidade de se realizar o descascamento das toras de eucalipto.

Na Figura 8 são apresentados os valores médios estimados e observados da velocidade do ar na saída do tambor, em m/s, após o fluxo de ar sobre as toras em função das diferentes rotações do motor para movimentação do ventilador.

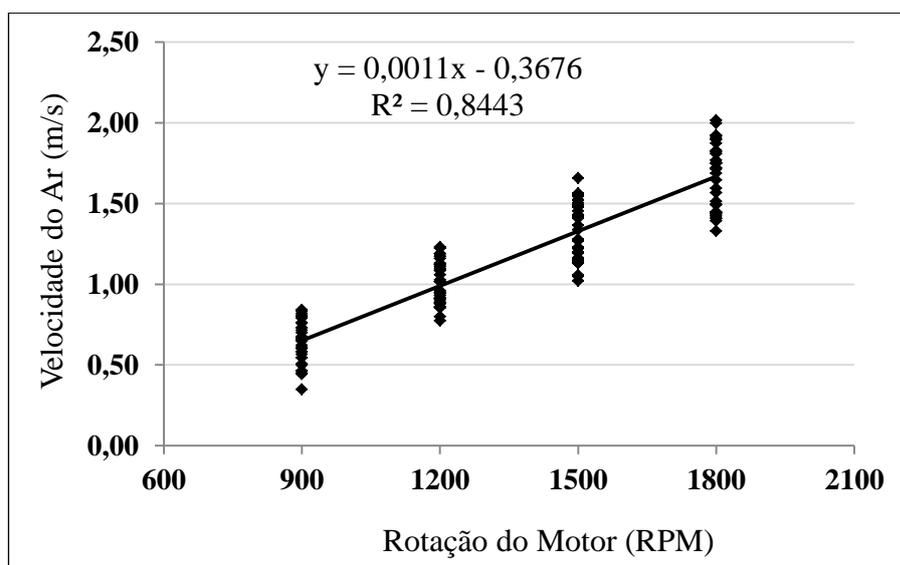


Figura 8 – Valores observados e estimados da velocidade do ar (m/s) na saída do tambor em função das diferentes rotações do motor de acionamento do ventilador.

A análise de variância (ANOVA) indicou que houve efeito significativo da rotação do motor sobre a velocidade do ar na saída do tambor, ou seja, o aumento da rotação provocou o aumento da velocidade de escoamento do ar. O incremento da velocidade de saída do ar foi, em média, de 0,34 m/s a cada aumento de 300 rotações no motor, sendo a menor velocidade igual a 0,64 m/s para 900 RPM e a maior velocidade igual a 1,66 m/s para 1800 RPM.

De acordo com a Figura 8, as maiores velocidades de saída do ar ocorreram para as maiores rotações do ventilador. Isto ocorre, pois as rotações mais elevadas produziram maiores velocidades de entrada do ar (Figura 6), ocasionando maior escoamento sobre as toras e refletindo nas maiores velocidades do ar na saída.

Silva et al. (2006) afirmam que a redução da velocidade do ar em sistemas artificiais de secagem ocorrerá quando houver barreiras ao seu fluxo, dificultando seu escoamento. Portanto, ao se constatar que as velocidades de saída foram inferiores às velocidades de entrada, evidencia-se que mesmo havendo fluxo de ar, o empilhamento da madeira em tora atua como impedimento a passagem de ar.

Na secagem da madeira, deve-se evitar a estagnação do ar sobre a superfície da madeira, sendo necessário que haja a circulação para a renovação da massa de ar, por isso, a importância de estudos que avaliem o fluxo de ar entre toras de madeira. Santini e Haselein (2002) avaliando o efeito da temperatura e velocidade do ar sobre a taxa de secagem de peças *Pinus elliotti*, verificaram que as maiores velocidades de circulação

do ar testadas promoveram redução do tempo de secagem, visto que essas velocidades favoreciam a entrada de ar seco e a retirada de ar úmido da superfície da madeira.

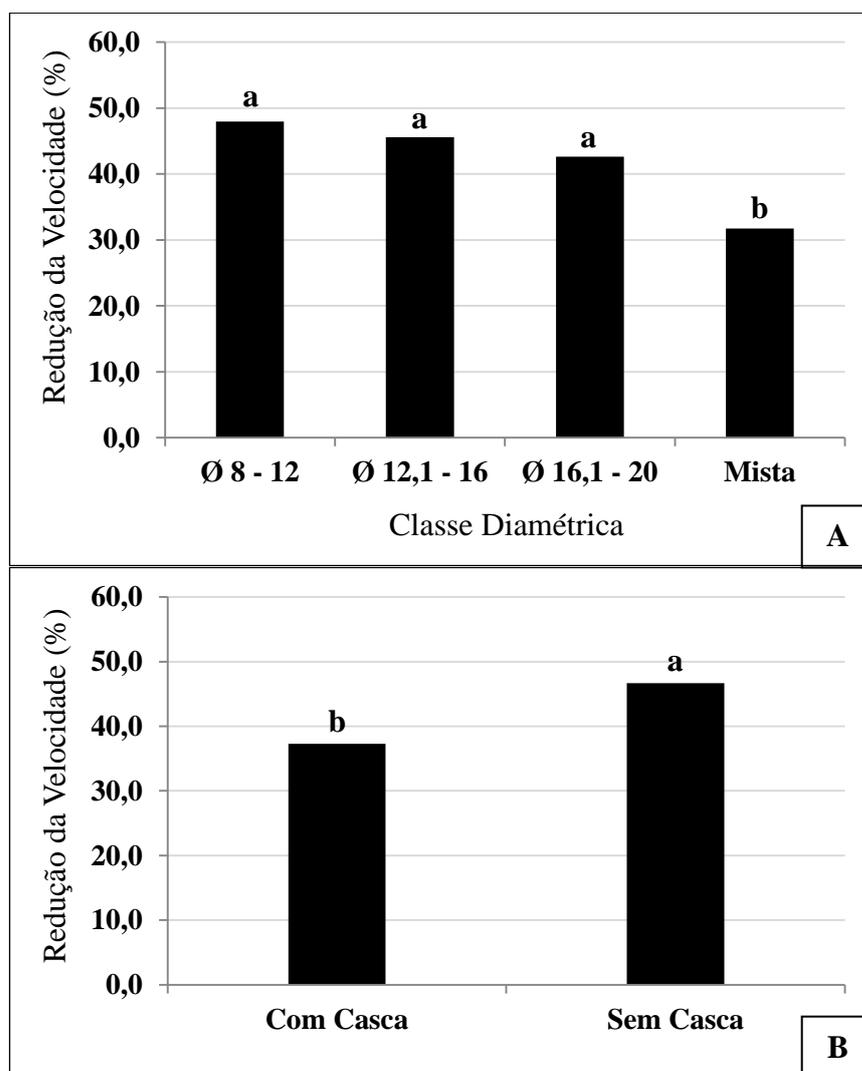
3.2.3. Redução da velocidade do ar

De modo geral, verificou-se que a velocidade do ar na entrada do tambor (1,99 m/s), medida anteriormente ao tambor metálico preenchido com toras de eucalipto, foi mais elevada em relação à velocidade do ar na saída do tambor (1,16 m/s), medida após a passagem do fluxo de ar sobre as toras. Isto demonstra que as diferentes condições de diâmetros e casca da madeira de eucalipto, atuaram como barreira ao fluxo de ar, ocasionando a redução da velocidade do ar, mesmo nas maiores velocidades do ventilador.

Quando se objetiva a secagem da madeira em tora, menores perdas de velocidade do ar tornam-se interessantes, pois assim, haverá maior circulação do ar sobre a superfície da madeira e renovação mais rápida da massa de ar.

De acordo com a análise de variância (ANOVA), não houve efeito da interação classe diamétrica e da presença ou ausência de casca sobre a redução da velocidade do ar. No entanto, houve efeito significativo a 5% de probabilidade destes parâmetros isoladamente.

Na Figura 9 são apresentados os valores médios da redução da velocidade do ar, em porcentagem, após o fluxo de ar sobre as toras em função das diferentes classes diamétricas, Classe 1, diâmetros de 8 a 12 cm; Classe 2, diâmetros de 12,1 a 16 cm; Classe 3, diâmetros de 16,1 a 20 cm e Mista, toras das diferentes classes diamétricas, e para as toras com casca e sem casca.



Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Tukey.

Figura 9 – Valores médios da redução da velocidade do ar, em porcentagem. A) Em relação às classes diamétricas; B) Em relação à presença ou ausência de casca.

A redução da velocidade do ar não diferiu significativamente entre as classes de diâmetro (Figura 9A), exceto para a Classe Mista, que apresentou o menor valor de perda da velocidade do ar após sua passagem pelas toras empilhadas dentro do tambor metálico, 31,73%.

A menor redução da velocidade do ar verificada para a Classe Mista demonstra que, mesmo apresentando maior ocupação do volume do tambor metálico (Figura 5A), o empilhamento com mistura de toras de diferentes classes diamétricas permitiu melhor escoamento de ar entre toras, promovendo maior circulação de ar sobre a superfície da madeira. Provavelmente, a maior quantidade de espaços vazios e sua distribuição entre as toras de madeira promoveram a menor resistência à passagem de ar, ocasionando na menor perda de velocidade.

A presença de casca nas toras de eucalipto foi significativa a 5% de probabilidade para a redução da velocidade do ar após sua passagem entre as toras (Figura 5B), sendo verificada a maior perda, 46,66%, para toras sem casca enquanto que para as toras com casca, a redução foi igual a 37,29%. A maior redução na velocidade do ar verificada para os empilhamentos com toras sem casca, provavelmente, foi consequência do aumento no número de toras, de 1 a 3, utilizadas para o preenchimento do tambor metálico, elevando a resistência ao escoamento de ar entre as toras, promovendo assim, a redução do valor de velocidade de saída do ar em relação à velocidade de entrada.

Na secagem da madeira, a massa de ar absorverá a água evaporada da madeira, elevando sua umidade relativa, permanecendo esta massa saturada estagnada sobre a madeira, a secagem torna-se mais lenta ou mesmo, pode deixar de acontecer (GALVÃO E JANKOWSKY, 1985). Logo, nos projetos de secadores para madeira, a circulação forçada de ar por meio de ventiladores visa garantir maior circulação, intensificando a saída de ar úmido e o deslocamento de massa de ar seco sobre a superfície da madeira em tora garantindo maiores taxas de secagem.

Na Figura 10 são apresentados os valores observados para a redução da velocidade do ar, em porcentagem, resultante na passagem de ar entre as toras com casca e toras descascadas nas diferentes classes diamétricas em função da rotação do motor de acionamento do ventilador.

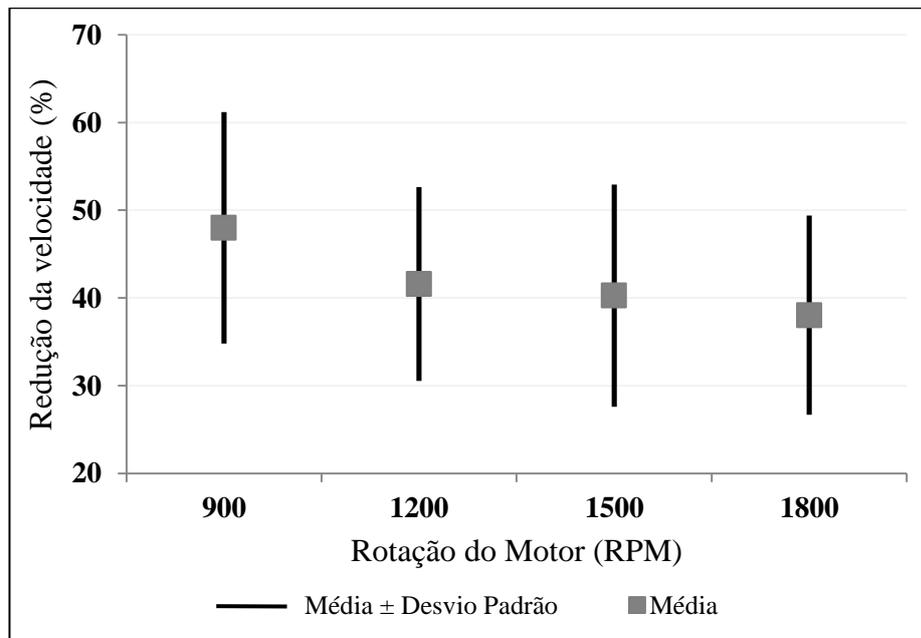


Figura 10 – Valores observados da perda da velocidade do ar (%) entre as toras de eucalipto para as diferentes rotações do motor de movimentação do ventilador.

Para a redução da velocidade do ar verificou-se grande variação dos valores encontrados (Figura 10), por isso, não foi possível ajustar um modelo de regressão aos dados. Para a rotação de 900 RPM, o coeficiente de variação foi igual a 26,87%; o menor coeficiente, igual a 25,84%, ocorreu para 1200 RPM e o maior, igual a 30,70%, para 1500 RPM; e para a rotação do moto igual a 1800 RPM verificou-se um coeficiente de variação de 29,08%. Esta variação nos valores de redução da velocidade deve-se a variabilidade das velocidades do ar verificadas tanto na entrada quanto na saída do tambor, decorrentes das diferenças nos empilhamentos, resultante do preenchimento do tambor e quantidade e dimensões dos espaços vazios que afetaram o fluxo de ar entre as toras.

No entanto, verificou-se uma tendência de diminuição do percentual de redução da velocidade da passagem de ar sobre as toras empilhadas com aumento da rotação do ventilador. Para a rotação de 900 RPM a perda média foi igual a 47,99%, reduzindo para 41,60 e 40,26%, respectivamente, para as rotações de 1200 e 1500 RPM e o valor médio mínimo igual a 38,04%, ocorrendo para a rotação de 1800 RPM. Verifica-se, portanto, que o aumento da rotação do ventilador apresenta menor redução da velocidade de ar após sua passagem pelas toras de eucalipto empilhadas no tambor.

Segundo Silva et al. (2006), em sistemas de secagem, a resistência ao fluxo de ar dependerá da direção e intensidade do fluxo, altura ou comprimento da camada preenchida, espaços vazios entre os materiais e o método de enchimento. Logo, o

aumento da rotação do ventilador promove o aumento da velocidade do ar, favorecendo seu escoamento sobre a madeira empilhada que atua como barreira ao fluxo de ar, apresentando menor redução percentual da velocidade..

Segundo Garbe (2009), a circulação interna de ar num secador é importante para a retirada da umidade existente na superfície da madeira, influenciando na taxa de secagem e uniformidade da umidade entre as peças. A vazão ou velocidade de entrada e saída de ar determina a renovação de ar seco para dentro da câmara de secagem da estufa, retirando o ar saturado com umidade através da circulação do ar.

No que se refere à utilização de um secador para toras, com determinado volume para preenchimento com madeira e controle da velocidade do ar, a utilização de toras de diâmetros variáveis (Mista) é recomendado visto a menor redução de velocidade do ar (Figura 9A) e a maior ocupação do volume disponível para o empilhamento das toras (Figura 5A). No entanto, ressalta-se que toras de diferentes diâmetros apresentam variável teor de umidade e diferentes taxas de secagem (REZENDE et al., 2010, PINHEIRO, 2013; ZANUNCIO et al. 2013).

4. CONCLUSÃO

Conclui-se que o diâmetro das toras de madeira, a presença ou ausência de casca e a velocidade do ventilador influenciam no escoamento de ar entre toras de eucalipto empilhadas horizontalmente.

Os projetos de secadores artificiais para madeira em tora devem contemplar ventiladores com motores com rotações iguais ou superiores a 1800 RPM, garantindo maior velocidade de circulação do ar e menores reduções de velocidade do ar após o fluxo entre as toras.

A mistura de toras de diferentes diâmetros é a melhor condição para o empilhamento da madeira em secadores artificiais, pois, apresenta maior ocupação do volume da estufa de secagem e a menor redução da velocidade do ar, condição que favorece a secagem da madeira.

A presença de casca nas toras de *Eucalyptus urophylla* aumentou o volume ocupado e resultou na menor redução da velocidade do ar. No entanto, deve-se avaliar o efeito da casca na taxa de secagem da madeira em secadores artificiais.

5. REFERÊNCIAS

ALÉ, J. V. **Sistema de ventilação industrial – ventiladores**. PUCRS, 2001. 24p.

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

GARBE, E. A. P. **Secadores de lâminas de madeira: verificação e ajustes da vazão dos Dumpers**. 2009. Artigos.com. Disponível em:
<http://www.artigos.com/artigos/engenharia/industrial-madeireira/secadores-de-laminas-de-madeira:-verificacao-e-ajuste-da-vazao-dos-dumpers-6881/artigo/#.VDvY9vldVwQ>

HILDEBRAND, R., ed. **Kiln drying of saw timber**. Nuertingen: RHM GmbH, 1970. 198p.

KLITZKE, R. J. **Secagem da madeira**. Ed. Curitiba: UFPR, 2003. 98 p.

PINHEIRO, M. A. **Influência das dimensões da madeira na secagem e nas propriedades do carvão vegetal**. 2013. 80p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2013.

REZENDE, R. N.; LIMA, J. T. PAULA, L. E. R.; FARIA, A. L. R. Secagem ao ar livre de toras de *Eucalyptus grandis* em Lavras, MG. 2010. **Cerne**, Lavras, v.16, Suplemento, p. 41-47, 2010.

SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R. Efeito da temperatura e velocidade do ar sobre a taxa de secagem da madeira de *Pinus elliotti* Engelm. 2002. **Ciência Florestal**, Santa Maria-RS, v. 12, n. 2, p. 99-106.

SANTOS, J. R. S.; ROCHA, L. C. S.; FONSECA, A. C. L.; ANDRADE, H. B. Estudo do efeito do empilhamento na secagem natural da madeira. In: Fórum Brasil sobre Biomassa e Energia, 1., 2012, Viçosa. **Anais...** Viçosa: UFV, 2012.

SILVA, D. J. P.; COUTO, S. M.; PEIXOTO, A. B.; SANTOS, A. E. O.; VIEIRA, S. M. J. Resistência de café em coco e despoldado ao fluxo de ar. 2006. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 168-174, 2006.

ZANUNCIO, A. J. V.; MONTEIRO, T. C.; LIMA, J. T.; ANDRADE, H. B.; CARVALHO, A. G. Drying biomass for energy use of *Eucalyptus urophylla* and *Corymbia citriodora* Logs. 2013. **BioResources**, v.8, n. 4, p. 5159-5168, 2013.

ZUCOLOTO, M.; COSTA, M. G.; CARVALHO, L. M.; SANTOS, D.; SIQUEIRA, D. L. Estimativa da produção de sementes de porta-enxertos cítricos por meio da massa de frutos. 2011. **Rev. Ceres**, Viçosa-MG, v. 58, n. 1, p. 126-128, 2011.

CONCLUSÕES GERAIS

A secagem natural de toras de madeira de eucalipto requer longo período de tempo para alcançar teores de umidade satisfatórios para a produção de carvão vegetal, sendo necessária a manutenção de grandes estoques para atender a demanda.

Para obter menores tempos de secagem da madeira em tora, devem-se selecionar espécies ou clones que apresentem maior proporção de madeira de alburno, cuja permeabilidade favorece a saída de água.

O tempo de secagem das toras em alta temperatura é inferior ao verificado para a secagem natural, devido a maior taxa de secagem. Sendo mais indicada a temperatura de 125°C para operação de secadores industriais de madeira em tora destinadas à produção de carvão vegetal.

A presença de casca eleva o tempo de secagem da madeira em tora de eucalipto na secagem natural em condições ambientais. Na secagem em temperaturas superiores a 100°C, a presença ou ausência de casca não influencia significativamente o tempo de secagem, não sendo recomendado o descascamento das toras.

Toras de menor diâmetro apresentam maior taxa de secagem em relação às toras de maior diâmetro tanto na secagem natural quanto na secagem em estufa a elevadas temperaturas, sendo recomendada a separação das toras em classes diamétricas anteriormente à secagem.

O escoamento de ar entre toras de eucalipto empilhadas horizontalmente é influenciado pela presença ou ausência de casca, diâmetro da tora e velocidade do ventilador.

Os projetos de secadores artificiais para madeira em tora devem contemplar ventiladores com motores com rotações iguais ou superiores a 1800 RPM, garantindo maior velocidade de circulação do ar e menores reduções de velocidade do ar após o fluxo entre as toras.