

MÁRCIA APARECIDA PINHEIRO

**INFLUÊNCIA DAS DIMENSÕES DA MADEIRA NA SECAGEM E NAS  
PROPRIEDADES DO CARVÃO VEGETAL**

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

VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2013

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

P654i  
2013

Pinheiro, Márcia Aparecida, 1987-

Influência das dimensões da madeira na secagem e nas propriedades do carvão vegetal / Márcia Aparecida Pinheiro. – Viçosa, MG, 2013.

ix, 69f. : il. (algumas color.) ; 29cm.

Inclui anexos.

Orientador: Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 54-60

1. Madeira - Secagem. 2. Carvão vegetal. 3. Carbonização.  
4. Madeira - Conservação. I. Universidade Federal de Viçosa.  
Departamento de Engenharia Florestal. Programa de  
Pós-Graduação em Ciência Florestal. II. Título.

CDO adapt. CDD 634.9847

MÁRCIA APARECIDA PINHEIRO

**INFLUÊNCIA DAS DIMENSÕES DA MADEIRA NA SECAGEM E NAS  
PROPRIEDADES DO CARVÃO VEGETAL**

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

APROVADA: 28 de fevereiro de 2013.

---

Benedito Rocha Vital  
(Coorientador)

---

Angélica de Cássia Oliveira Carneiro  
(Coorientadora)

---

Graziela Baptista Vidaurre

---

Carla Priscilla Távora Cabral

---

Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho  
(Orientadora)

*A minha família, e em especial aos meus pais.  
Amo vocês!*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por mais esta conquista!

Aos meus pais, Moacir e Regina, por todo amor e apoio, e aos meus irmãos Edgar, Eduardo, Alexandre e Regina, por todo o carinho.

Aos meus cunhados Fernanda, Luciano, Roberta e Juliana pelo incentivo, e aos meus sobrinhos Pedro, Maria Eduarda, Miguel, Alice, Giovanna e Maria Clara, pelos momentos de alegria.

A minha “irmã” Simone pela amizade e companheirismo durante todos esses os anos de UFV.

Ao Bráulio que me ajudou em todos os momentos durante a realização deste trabalho, ao qual serei eternamente grata.

Aos meus amigos de Viçosa: Adriano, Karina e Cristiane.

A Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Florestal, pela oportunidade.

A CAPES, pela concessão da bolsa de mestrado e financiamento do projeto.

A FAPEMIG e SECTES pelo financiamento do projeto.

Ao grupo de pesquisa em carvão vegetal G6 pelo apoio concedido.

A Embrapa Floresta pelo apoio financeiro ao projeto.

Ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM – DEF/UFV) e ao Laboratório de Propriedades da Madeira (LPM – DEF/UFV) pela estrutura disponibilizada para realização desta pesquisa.

A minha orientadora, Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho, pela orientação e os conselhos durante todo o período de mestrado.

Aos professores Benedito Rocha Vital, Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, Graziela BaptistaVidaurre e a pesquisadora Carla Priscilla Távora Cabral, pelas contribuições durante o desenvolvimento do trabalho.

A pesquisadora Solange de Oliveira Araújo pelos conselhos e amizade.

Ao professor Hélio Garcia Leite, ao Diogo Consenza e Renato Castro pelo auxílio nas análises estatísticas.

Aos amigos Mariana, Juliana, Flávia, Zaira, Paulo, Bruno, Fábio (Sete), Artur, Thiago, Danilo, Marco Túlio, Ariel, Ivanildo, Júlia, Débora, Ana Flávia, Bárbara, Aylson, Cássia, Taynan e Miguel pelos momentos de descontração no laboratório.

Aos funcionários Joel, Osvaldo, José Cardoso (Seu Maninho), Sálvio (Molhado), Jaqueline e Eli Braz (Fumo).

Ao Professor José Tarcísio Lima e aos doutorandos Raphael Nogueira Rezende e Tiago Campos Monteiro, da Universidade Federal de Lavras, pelo auxílio na análise de permeabilidade da madeira.

Aos estudantes de graduação em Engenharia Florestal que contribuíram para o desenvolvimento do trabalho.

## **BIOGRAFIA**

MÁRCIA APARECIDA PINHEIRO, filha de Regina Célia Pinheiro e Moacir Agostinho Pinheiro, nasceu em 24 de agosto de 1987 na cidade de Ubá, Minas Gerais.

Em 2006, ingressou no curso de Engenharia Florestal, na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais.

Em janeiro de 2011, concluiu o curso de Engenharia Florestal e, em março deste mesmo ano, iniciou o curso de Pós-Graduação em Ciência Florestal, em nível de mestrado, na Universidade Federal de Viçosa, concluindo os requisitos necessários à obtenção do título de *Magister Scientiae* em fevereiro de 2013.

## SUMÁRIO

RESUMO .....	viii
ABSTRACT.....	ix
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS .....	3
2.1 Objetivo geral.....	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
3. REVISÃO DE LITERATURA .....	4
3.1 O gênero <i>Eucalyptus</i> .....	4
3.2 Água na madeira.....	5
3.2.1 Movimento da água na madeira.....	6
3.3 Secagem da madeira.....	7
3.3.1 Fatores que afetam a secagem da madeira .....	9
3.3.1.1 Fatores inerentes ao ambiente.....	9
3.3.1.2 Fatores inerentes à madeira.....	9
3.3.2 Secagem da madeira de <i>Eucalyptus</i> .....	11
3.3.3 Secagem de madeira em tora .....	12
3.4. Carvão vegetal.....	14
3.4.1 Friabilidade do carvão vegetal .....	15
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	17
4.1 Preparo das amostras .....	17
4.2 Propriedades da madeira.....	17
4.2.1 Propriedades da madeira no sentido base-topo .....	17
4.2.1.1 Relação cerne/ alburno (C/A).....	17
4.2.1.2 Densidade básica.....	18
4.2.1.3 Retratibilidade.....	18
4.2.2. Propriedades da madeira de no sentido medula-casca.....	19
4.2.2.1 Densidade básica.....	19

4.2.2.2	Análise morfológica de fibras e poros.....	19
4.2.3	Permeabilidade.....	20
4.2.4	Análise química estrutural.....	21
4.3	Secagem da madeira.....	22
4.4	Carbonização da madeira.....	24
4.4.1	Rendimento gravimétrico em carvão vegetal.....	26
4.4.2	Amostragem e propriedades do carvão vegetal.....	26
4.4.2.1	Propriedades físicas, químicas e friabilidade do carvão vegetal.....	26
4.5	Delineamento estatístico.....	27
4.5.1	Propriedades da madeira e do carvão vegetal.....	27
4.5.2	Secagem da madeira.....	28
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
5.1	Propriedades da madeira.....	29
5.1.1	Propriedades da madeira no sentido base-topo .....	29
5.1.2	Propriedades da madeira no sentido medula- casca.....	31
5.1.3	Permeabilidade.....	34
5.1.4	Análise química estrutural.....	35
5.2	Secagem da madeira .....	36
5.3	Carbonização da madeira.....	47
5.3.1	Parâmetros da carbonização.....	47
5.3.2	Rendimento gravimétrico em carvão vegetal.....	48
5.3.3	Propriedades físicas, químicas e friabilidade do carvão vegetal.....	50
6.	CONCLUSÕES .....	53
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54
	ANEXO1 - Resumo das Análises de Variância (ANOVA).....	61
	ANEXO 2 - Resumo do valores estimados dos parâmetros e os respectivos coeficientes de determinação.....	66

## RESUMO

PINHEIRO, Márcia Aparecida, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2013. **Influência das dimensões da madeira na secagem e nas propriedades do carvão vegetal.** Orientadora: Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho. Coorientadores: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro e Benedito Rocha Vital.

O presente estudo foi realizado com o objetivo de avaliar o efeito do diâmetro na secagem natural da madeira e na friabilidade do carvão vegetal. Foi utilizada madeira de *Eucalyptus urophylla*, aos cinco anos de idade, provenientes de um plantio localizado no município de Viçosa, MG. O experimento foi instalado utilizando-se toretes com e sem casca, em três classes diamétricas e três comprimentos. Os toretes foram dispostos em uma estrutura a 0,60 metros do chão, dentro de um galpão coberto. Determinou-se a umidade inicial dos toretes e o acompanhamento da secagem se deu através de pesagens semanais durante todo período de observação. Foram determinadas as propriedades da madeira no sentido base-topo e no sentido medula-casca. Para o carvão vegetal realizaram-se carbonizações em duplicata para cada uma das três classes diamétricas analisadas. As carbonizações foram conduzidas em forno tipo container, com tempo variando de 6 a 13 horas. Em seguida determinaram-se as propriedades físicas, químicas e a friabilidade do carvão vegetal. Os dados foram submetidos à análise de variância, e quando estabelecidas diferenças entre eles, aplicou-se o teste Tukey em nível de 95% de significância. Os toretes ficaram expostos às condições de secagem até que os mesmos atingissem um teor de umidade de aproximadamente 30%. O diâmetro, o comprimento e a casca afetaram significativamente a secagem da madeira, sendo que as madeiras de menores comprimentos associados a menores diâmetros e a ausência de casca perderam maior umidade ao longo do tempo de secagem. Avaliando a friabilidade do carvão produzido, em função da variabilidade da classe diamétrica, conclui-se que carvões provenientes de madeiras de maiores diâmetros, tendem a ser mais friáveis.

## ABSTRACT

PINHEIRO, Márcia Aparecida, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2013. **Influence of wood dimensions in drying and in the properties charcoal.** Adviser: Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho. Co-advisers: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro and Benedito Rocha Vital.

The present study was made for evaluating the diameter effect in the wood's natural drying and friability of the charcoal. Five year old *Eucalyptus urophylla* wood that came from the city of Viçosa/MG was used. The experiment was installed using logs with and without bark, in three diametrical classes and three sizes. The logs were disposed in a structure that was 0,6 meters away from the ground, inside a covered shed. The log's initial humidity and the drying follow-up was made through weekly weighings during all the observation time. The wood's proprieties were determined in the base-top direction in the marrow-bark direction. For the charcoal, the carbonizations in duplicate ware made for each of the three diametrical classes analyzed. The carbonization was conducted in a container-type oven, with the time varying from 6 to 13 hours. The physical and chemical proprieties and the friability of the charcoal were then determined. For the statistical analysis realization, the data were submitted to the variance analysis and, when differences were established among them, the Tukey Test at 95% significance was applied. The logs were exposed to drying conditions until they reached a moisture content of approximately 30%. The class of diameter, length and bark significantly affected the drying of wood and that wood of smaller lengths associated with smaller diameters and the absence of bark high moisture shell lost over time drying. Evaluating the friability of the produced charcoal in function of the diametrical class variability, it's proved that charcoal that comes from wood of greater diameter tends of having more friability.

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, com a enorme utilização da madeira e seus derivados, busca-se cada vez mais conhecer e aprimorar os diversos processos que envolvem a industrialização da madeira, visando melhorar sua aplicação e aproveitamento. Os métodos empregados para processar a madeira exercem influência sobre sua qualidade e utilização.

A secagem é uma das fases mais importantes para a indústria produtora de carvão vegetal, pois proporciona, entre outras vantagens, a redução do peso da madeira diminuindo o custo com transporte, aumento do rendimento gravimétrico, redução no tempo de carbonização, redução da geração de finos, além da redução de gases poluentes do processo. Esta fase demanda grandes investimentos e um alto consumo de energia, resultando em altos custos quando feito artificialmente. Portanto, há um grande interesse pelas indústrias consumidoras de madeira, principalmente em toras, em encontrar formas eficientes e mais viáveis economicamente de secar a madeira no menor espaço de tempo, visando maximizar o seu uso com rendimentos satisfatórios, visto que em média a madeira fica em torno de 150 dias no campo até que atinja valores de umidade satisfatórios.

Neste contexto, devido às condições climáticas favoráveis do Brasil, a secagem natural vem sendo utilizada como uma pré-secagem ou até mesmo como secagem definitiva. A secagem natural, de madeira em toras, consiste em empilhar a madeira em local ventilado, normalmente próximo aos talhões de onde foram cortadas as árvores, em pilhas que variam em comprimento e altura, podendo em alguns casos ter mais de quilômetros de comprimento e 1,50 m de altura. O controle do teor de umidade é feito em intervalos regulares, até que este atinja o valor desejado, normalmente próximo ao umidade de saturação das fibras (30%). Esse processo pode ser considerado de baixo investimento, porém requer um longo tempo de secagem, que varia em função dos fatores climáticos de cada região, como temperatura, umidade relativa do ar e direção dos ventos. Por se tratar de um processo limitado às variações climáticas do local, seu controle é dificultado. A perda de umidade na secagem natural é bastante rápida no início, quando a madeira apresenta teores de umidade bem elevados, porém quando a umidade da madeira se aproxima da umidade de equilíbrio, dependendo da temperatura e da umidade relativa do ambiente, a secagem natural pode se tornar bastante lenta. O

tempo de secagem depende ainda, da época do ano em que é feito o corte da árvore e de características inerentes da madeira, principalmente no que tange as propriedades físicas e as dimensões da tora.

De modo geral, tem-se observado que o diâmetro da madeira é a dimensão que mais influencia na perda de umidade, requerendo maior tempo de secagem, onerando o processo e influenciando também, a qualidade e o rendimento do carvão produzido. Além disso, a presença de casca e o comprimento da madeira são outros fatores a serem considerados durante a secagem. Esses efeitos são mais observados na prática pelas empresas produtoras de carvão vegetal, visto que são poucos os estudos de secagem da madeira em tora, necessitando de pesquisas que relacionem as características da madeira com a velocidade de secagem.

Neste contexto, buscou-se neste trabalho relacionar a velocidade de secagem com as propriedades físicas, dimensões da tora de madeira e seus efeitos, na qualidade do carvão vegetal.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

O presente trabalho tem como objetivo principal, avaliar o efeito do diâmetro na velocidade de secagem da madeira em tora de *Eucalyptus urophylla* e na friabilidade do carvão vegetal.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Determinar a relação cerne/alburno (CA), densidade básica e retratibilidade no sentido base-topo.
- Caracterizar a estrutura anatômica e densidade básica da madeira, no sentido medula-casca.
- Determinar a permeabilidade e as propriedades químicas da madeira.
- Avaliar o efeito da casca e do comprimento da madeira na velocidade de secagem.
- Obter curvas de secagem da madeira em função da classe de diâmetro, comprimento e da presença ou ausência de casca.
- Avaliar a influência do diâmetro da madeira na friabilidade do carvão vegetal e nas suas propriedades físicas e químicas.

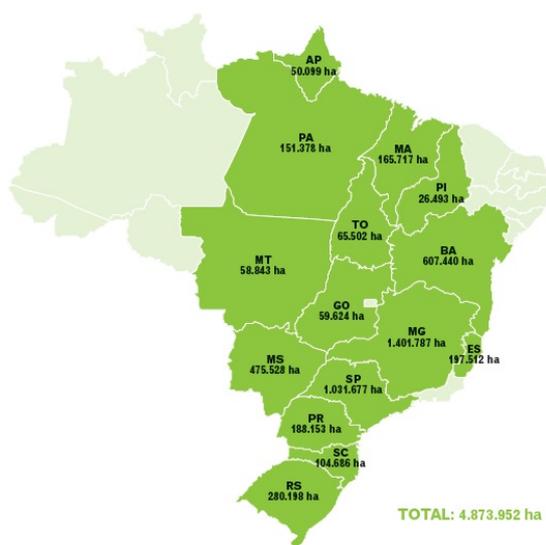
### 3. REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 O gênero *Eucalyptus*

No Brasil, as principais espécies utilizadas em florestas plantadas pertencem aos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*, sendo este último detentor de 78,4 % da área plantada no ano de 2011, segundo dados da ABRAF (2012). O gênero *Eucalyptus* é nativo da Austrália e pertence à família Myrtaceae, possui cerca de 800 espécies, além de um grande número de variedades e híbridos (ANDRADE, 1961; LIMA, 1993; BOLAND *et al.*, 1994; COPPEN, 2002).

No Brasil as espécies deste gênero têm sido plantadas em grandes áreas e bastante utilizadas com múltiplos fins industriais. A cultura do eucalipto vem se destacando como uma das principais representantes do setor florestal brasileiro, devido à sua adaptação às condições edafoclimáticas, rápido crescimento, tecnologia de produção, desenvolvimento de práticas silviculturais eficientes, melhoramento genético e técnicas que permitem um melhor aproveitamento de sua madeira (REZENDE, 2009).

Em 2011, a área de plantios de eucaliptos totalizou 4.873.952 ha (Figura 1) representando crescimento de 2,5% (119.617 ha) frente ao indicador de 2010.



**Figura 1** - Área e distribuição de plantios de eucaliptos nos estados do Brasil. Fonte: ABRAF (2012).

O principal fator que alavancou esse crescimento foi o estabelecimento de novos plantios frente à demanda futura dos projetos industriais do segmento de papel e celulose e carvão vegetal (ABRAF, 2012). Da área total de plantios de eucaliptos 54,2 % estão concentrados na região Sudeste, em nível estadual, Minas Gerais se destaca por possuir a maior área plantada, com 28,8 % do total de plantios. O estado também se destaca por possuir o maior parque siderúrgico a carvão vegetal do mundo, sendo o maior produtor e consumidor desse insumo energético.

Atualmente a eucaliptocultura no país é uma das mais avançadas do mundo, servindo de referência para outros países. Devido a grande variedade de espécies deste gênero, é possível selecionar aquelas que produzem madeira com padrões de qualidade que atendem aos mais diversos usos, sendo, portanto, empregadas em serrarias, usinas de preservação, indústrias de painéis, chapas de madeira reconstituída, celulose e papel, produção de carvão vegetal e na geração de energia térmica, principalmente. Na geração de energia, a partir da sua queima direta na forma de lenha ou da sua conversão em subprodutos de maior valor energético, como o carvão vegetal, a madeira de *Eucalyptus* tem grande importância nos setores comercial, industrial e residencial (FREDERICO, 2009).

Dentre as espécies de eucaliptos plantadas no Brasil, o *Eucalyptus urophylla* é a espécie que apresenta a maior estabilidade genética em todas as áreas onde foi testada. É considerada como uma das espécies de maior potencial para reflorestamento, devido ao seu bom desenvolvimento em quase toda região do país, além de poder ser utilizado para os mais diversos fins (fabricação de celulose e papel, chapas duras, serraria e produção de carvão, entre outros). A espécie é resistente a alguns fungos causadores de doenças, como é o caso da *Puccinia psidii*, causadora da ferrugem do eucalipto e ao fungo *Cryphonectria cubensis*, causador do cancro do eucalipto (FERREIRA, 1989).

### **3.2 Água na madeira**

De acordo com Klitzke (2003), existem três tipos de água na madeira: água livre ou de capilaridade, água de adesão ou de impregnação e água de constituição.

A água livre ou de capilaridade é a água que ocupa as cavidades dos componentes anatômicos, espaços intercelulares e os canais resiníferos, sendo retida por

fracas ligações capilares (SKAAR, 1972). Devido a essas ligações capilares a água livre sai facilmente por evaporação no processo de secagem da madeira. Segundo Klitzke (2003) quando toda água livre for removida da madeira, ela alcançará o “umidade de saturação das fibras” (USF). Nesse ponto a umidade varia normalmente entre 25 e 35% em relação a massa do material, com um valor médio de 28% de umidade. A umidade de saturação das fibras é de grande importância prática, uma vez que as variações dimensionais da madeira se manifestam abaixo da mesma e a velocidade de secagem diminui.

A água de adesão é aquela contida nas paredes celulares, sendo retida pela madeira em uma relação mais forte do que a água livre (STEIN, 2003). A saída da água de adesão afeta a maioria das propriedades físicas e mecânicas da madeira e necessita de maior quantidade de energia para sua retirada, logo para alguns usos, comumente se seca a madeira somente até a retirada da água livre, mantendo-se a água de adesão.

A água de constituição está combinada com as substâncias da parede celular e não pode ser removida sem que haja decomposição da madeira e a alteração de sua composição química (STEIN, 2003).

### **3.2.1 Movimento da água na madeira**

A água, geralmente, se movimenta das zonas de alta umidade para zonas de baixa umidade, sendo fundamental para tal movimentação a existência de gradientes de umidade e condições externas de temperatura, umidade relativa e velocidade de circulação do ar (REZENDE, 2009).

A água livre movimenta-se de forma relativamente simples de ser compreendida quanto aos aspectos físicos e matemáticos. Já a movimentação da água de adesão e do vapor d'água, que ocorrem por difusão, são processos mais complexos (KLITZKE, 2003).

O movimento da água livre ou água capilar ocorre quando a madeira apresenta teores de umidade acima da umidade de saturação das fibras. A água se move no estado líquido através das cavidades celulares presentes na madeira, do interior para a superfície por meio de diferenças de tensão de capilaridade (KOLLMANN e CÔTÉ, 1968). Um dos fatores mais importantes que afeta o fluxo capilar é a permeabilidade da

madeira. Esta propriedade está associada aos componentes anatômicos da madeira, que são característicos de cada espécie.

Após a remoção da água livre, a madeira seca mais lentamente durante a perda da água de adesão. A água de adesão ou higroscópica move-se pelo fenômeno de difusão em consequência dos gradientes de umidade que se estabelecem nas paredes celulares ou na madeira de modo geral (GALVÃO e JANKOWSKY, 1988). Segundo Mellado (2007) o gradiente de umidade entre as paredes mais externas e internas das células se desenvolve a medida que a umidade começa a evaporar das paredes das células próximas à superfície da madeira resultando em um fluxo de água das células internas da madeira para as externas.

A diferença entre o movimento capilar e o de difusão é que este último é um processo lento e considerado complexo, porque ocorre simultaneamente, difusão de vapor através das cavidades celulares e difusão de água higroscópica nas paredes celulares da madeira. Durante a secagem da madeira, tanto a difusão de água higroscópica como a difusão de vapor de água, ocorrem simultaneamente. Sendo que ao ser deslocada do centro da madeira até a superfície, grande parte da umidade passa através das paredes celulares pelo processo de difusão da água higroscópica, que evapora dentro das cavidades celulares e passa por sua vez através do lume, pelo mecanismo de difusão de vapor. Na continuidade da sua migração para a sua superfície, a água no estado de vapor nos lumes é adsorvida por outra parede celular, passando através dela por difusão de água higroscópica, e assim sucessivamente, até atingir a superfície da madeira (MELLADO, 2007). A difusão da água na madeira é afetada por diversos fatores, como umidade, temperatura, pontuações e espessura de parede celular.

### **3.3 Secagem da madeira**

A secagem é um processo que consiste em retirar água da madeira até atingir o teor de umidade adequado para sua utilização. Hart (1966) define a secagem como o balanço dinâmico entre a transferência de calor do ar para a madeira, a superfície de evaporação da madeira, a difusão da umidade através da madeira e a saída de água livre. De acordo com Jankowsky (1990), a secagem é a operação intermediária que mais

contribui para agregar valor aos produtos manufaturados da madeira, sendo uma das fases de maior custo.

A transformação racional da madeira bruta em produtos e bens de consumo requer a sua secagem prévia pelas seguintes razões: reduz a massa da madeira, diminuindo o custo com transporte; reduz a movimentação dimensional a limites aceitáveis; melhora a atuação dos vernizes e tintas aplicadas sobre a madeira; reduz os riscos de ataques por fungos; proporciona melhor qualidade das juntas de colagem; propicia maior impregnação da madeira com líquidos preservativos e ignífugos; aumenta a resistência mecânica (GALVÃO e JANKOWSKY, 1985). Do ponto de vista energético a secagem contribui ainda, para um maior rendimento gravimétrico em carvão vegetal e na redução na geração de finos do mesmo.

A secagem pode ser feita artificialmente através de estufas, ou naturalmente. Na secagem artificial ou convencional ocorre total controle de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar. As temperaturas de secagem variam normalmente entre 40 a 90°C. Esse sistema possui circulação forçada de ar, sistema de umidificação e troca de ar (JANKOWSKY *et al.*, 2003).

O processo natural consiste em expor a madeira à ação dos fatores climáticos de um determinado local, com o objetivo de remover a maior quantidade de água possível (PONCE e WATAI, 1985). No Brasil, devido suas condições climáticas, este tipo de secagem é bastante utilizada como pré-secagem ou secagem definitiva, dependendo do uso final da madeira (REZENDE, 2009). É um método que exige um investimento relativamente baixo, porém o tempo de secagem é longo (SANTINI, 1992).

Esse processo é mais efetivo nas épocas do ano em que a temperatura é mais elevada e a umidade relativa do ar mais baixa. A sua eficiência e velocidade, dependem ainda da circulação do vento nas diferentes posições da pilha de madeira (BAUER, 1985), modo de empilhamento da madeira, distância entre o solo e a madeira, inclinação do terreno, presença de vegetação ou barreiras e drenagem do local.

A perda de umidade é bastante rápida no início da secagem natural, devido ao fato da madeira apresentar uma umidade elevada em relação ao ambiente. Quando a umidade da madeira aproxima-se da umidade de equilíbrio higroscópico, onde ocorre o equilíbrio entre a umidade da madeira e a do ambiente, dependendo da temperatura e da umidade relativa do local, a secagem natural pode se tornar bastante lenta

(JANKOWSKY, 1990). As limitações da secagem natural estão relacionadas a dependência das condições climáticas do ambiente o que dificulta o seu controle.

### **3.3.1 Fatores que afetam a secagem da madeira**

A secagem da madeira é afetada por fatores inerentes ao ambiente e a fatores inerentes à própria madeira.

#### **3.3.1.1 Fatores inerentes ao ambiente**

Entre os fatores inerentes ao ambiente que afetam a secagem destaca a temperatura, umidade relativa do ar e a circulação do ar.

Normalmente, quanto mais alta é a temperatura em que se processa a secagem, mais rápida é a taxa de secagem (REZENDE, 2009). Maiores temperaturas implicam no fornecimento de maior quantidade de energia às moléculas de água em menor período de tempo.

A umidade relativa do ar determina a capacidade do ambiente em receber água removida da madeira (GALVÃO e JANKOSWSKY, 1985) e segundo Stein (2003) a redução na umidade relativa do ar resulta em um aumento da velocidade de secagem.

A velocidade de circulação do ar na superfície da madeira tem a função de remover a umidade próxima à madeira em processo de secagem.

#### **3.3.1.2 Fatores inerentes à madeira**

O processo de secagem é influenciado por vários fatores inerentes à madeira, como estruturas anatômicas, densidade, permeabilidade, dimensões da madeira e presença de casca (KLITZKE, 2003), dentre outras.

A velocidade de secagem é influenciada pelas estruturas anatômicas da madeira que as compõem, pois as madeiras apresentam uma grande variedade de arranjos estruturais anatômicos que podem facilitar ou dificultar este processo (STEIN, 2003). A madeira do gênero *Eucalyptus* apresentam dificuldades de secagem, devido principalmente a sua anatomia, que de modo geral se apresenta com pontuações de

pequenos diâmetros e distribuição difusa dos poros, características essas que tornam a secagem mais lenta.

Uma das propriedades mais importantes da madeira para uso energético é a densidade básica e a mesma está relacionada a sua anatomia. Variações na densidade da madeira dependem das mudanças na proporção de vasos, da espessura da parede celular das fibras e de outras estruturas anatômicas que compõem o lenho (OLIVEIRA e SILVA, 2003). Em geral, quanto maior a densidade, mais lenta é a secagem. Madeiras de maiores densidades requerem maior período de secagem do que madeiras menos densas, para um mesmo teor de umidade, quanto maior for a densidade maior será a massa de água que deverá ser removida para igual redução da umidade (GALVÃO e JANKOWSKY, 1988).

Marques (2008) estudando a secagem de madeiras amazônicas baseado em características anatômicas e físicas observou que acima da USF, a relação entre densidade e a velocidade de secagem torna-se inversa, ou seja, quanto menor a densidade básica, maior o tempo de secagem do estado saturado até 30% de umidade (USF). As madeiras menos densas possuem uma maior quantidade de água livre nos lumes e espaços intercelulares, que durante a secagem necessitam de mais tempo para ser eliminada. Abaixo da USF, essa relação é direta indicando que quanto maior a densidade, maior o tempo de secagem, uma vez que madeiras mais densas possuem mais massa por unidade de volume, conseqüentemente maior quantidade de água retida, cuja remoção se dá de forma mais lenta através de difusão.

A permeabilidade é um fator importante na secagem da madeira, pois geralmente madeiras mais permeáveis secam mais facilmente (REZENDE, 2009). Uma vez que a permeabilidade está relacionada à existência de estruturas anatômicas que podem contribuir ou não, para uma maior permeabilidade, e conseqüentemente, interferindo na saída de água durante a secagem (GALVÃO e JANKOWSKY, 1985). Nas folhosas o tamanho, abundância, distribuição dos poros e a presença de gomas, tilos e outras substâncias obstrutoras interferem na permeabilidade da madeira (GARBE, 2008).

De acordo com Oliveira (1997), a proporção entre cerne e alburno implica em maior ou menor velocidade de secagem da madeira. O alburno é o tecido lenhoso que se localiza na região abaixo da casca, geralmente de coloração clara, constituído de células

vivas (fisiologicamente ativas), não obstruídas, por onde circulam as substâncias nutritivas da planta. O cerne é a camada mais interna do alburno que perdeu a atividade fisiológica e apresenta coloração cor mais escura, no caso de Angiospermas (COSTA, 2001). Maior porcentagem de cerne pode dificultar a secagem da madeira, uma vez que o cerne possui baixa permeabilidade, principalmente devido à obstrução dos vasos por tilos, o que dificulta o transporte de água da parte mais interna da madeira para a mais externa (GALVÃO e JANKOWSKY, 1985). Silva (2008) afirma que a proporção de fluxo de fluido através do alburno é maior do que através do cerne e a proporção através de madeiras com anéis porosos é maior do que nas madeiras com poros difusos. A presença de tilos obstruindo esses poros reduz significativamente a permeabilidade nas madeiras das dicotiledôneas, na região do cerne.

Quanto às dimensões da madeira durante a secagem, o diâmetro é uma das mais importantes e influentes durante este processo. Em toras de maior diâmetro a água necessita percorrer uma maior distância até a superfície para ser evaporada, além disso, os componentes da madeira estão orientados no sentido longitudinal o que desfavorece a saída de água na direção radial. Diâmetros maiores também implicam em maior área de cerne, região que normalmente apresenta poros obstruídos que reduzem a sua permeabilidade, o que dificulta a saída da água tornando a secagem mais lenta, porém nesta região observa-se um menor teor de umidade.

Outros fatores a serem considerados no processo de secagem são o teor de umidade inicial da madeira e a presença de casca. Madeiras com maiores teores de umidade terão uma secagem mais longa e a casca além de ser um impedimento físico para a saída da água, também possui umidade, o que contribui para o aumento do tempo de secagem da madeira. Rezende (2009) estudando o tempo de secagem ao ar livre de toras de eucalipto em Lavras, MG, observou que para um mesmo período de tempo, as toras com casca obtiveram um teor de umidade maior (57 %) em relação às toras sem casca (43%). O mesmo autor também observou que as toras com maiores diâmetros apresentaram maior umidade no mesmo período de tempo.

### **3.3.2 Secagem da madeira de *Eucalyptus***

Segundo Rosso (2006) devido as variações de umidade no interior da madeira de eucalipto, aliados a sua própria constituição anatômica, que dificulta muito a saída de umidade do seu interior, esse gênero pode ser considerado de difícil secagem.

Em termos de anatomia, a ocorrência de pontuações de pequeno diâmetro, presença de tilos, pequena largura e baixa frequência de vasos, entre outros fatores, afetam a permeabilidade da madeira, dificultando o deslocamento de água. Tilos, quando presentes, implicam na obstrução do lume dos vasos, reduzindo a permeabilidade e a velocidade de secagem. Os vasos dispersos, pouco numerosos, de pequenos a médios diâmetros, predominantemente solitários e porosidade difusa contribuem para uma secagem mais complexa e lenta (REZENDE, 2009).

Além da estrutura anatômica peculiar, a variação nos padrões de distribuição da umidade na direção radial e longitudinal da madeira de eucalipto, é um dos principais fatores responsáveis pela dificuldade de secagem de madeiras do gênero e pela propensão ao aparecimento dos defeitos inerentes ao processo de secagem (SANTOS, 2002).

### **3.3.3 Secagem de madeira em tora**

Em 2011, a produção de madeira em tora de eucaliptos, pinus e teca, das empresas associadas individuais da ABRAF totalizaram 75,4 milhões de m<sup>3</sup>. Do total, 80,6% correspondeu a produção de plantios de eucaliptos, que aumentou aproximadamente 3,7% em relação ao ano de 2010 (ABRAF, 2012).

O Brasil consome internamente toda a sua produção de madeira em tora proveniente de florestas plantadas. Essa matéria-prima é destinada ao processamento industrial de diversos segmentos do mercado doméstico. As cadeias de alto consumo de madeira em tora são pela ordem, as dos produtores de celulose e papel, siderurgia a carvão vegetal, vindo em seguida os segmentos de madeira serrada, compensados, painéis de madeira industrializada e móveis (ABRAF, 2012).

Para utilização da madeira na forma de toras, por exemplo, na produção de carvão vegetal, a madeira necessita passar pelo processo de secagem, uma vez que esta fase agrega valor ao produto final, pois aumenta o rendimento gravimétrico, reduz o tempo de carbonização, além de melhorar sua qualidade, principalmente resistência

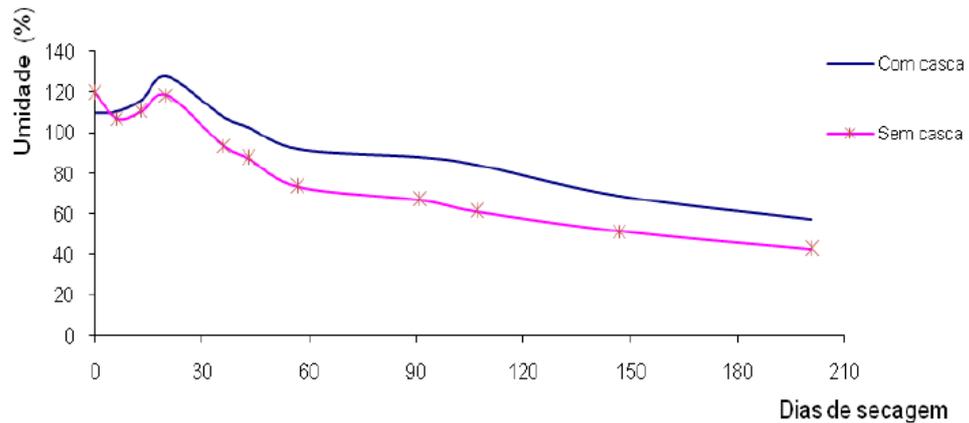
mecânica, reduzindo assim a friabilidade do carvão vegetal. Na literatura são encontrados vários estudos relacionados à secagem da madeira, mas tais esforços se concentram principalmente na secagem artificial e ao ar livre de madeira serrada. Tratando-se de madeira em tora, estudos ainda são poucos ou não publicados (REZENDE *et al.*, 2010).

Vital *et al.* (1985), estudando a secagem ao ar livre de toras de *Eucalyptus grandis*, aos 5 anos de idade, em Viçosa, MG, observaram que a redução de umidade em função do tempo é afetada pelo diâmetro das toras e presença de casca. As toras sem casca atingiram 23% de umidade média após 175 dias de secagem e as toras com casca atingiram 32%, assumindo-se uma umidade inicial de 129%. A presença de casca teve maior influência na perda de umidade em relação à madeira sem casca, nas quatro primeiras semanas de secagem. As toras com diâmetro superior a 12,0 cm apresentaram umidade superior a 50% após os 175 dias de secagem, enquanto as toras de menores diâmetros apresentaram umidade entre 16 e 27%. Observaram também que a perda de umidade é afetada pela posição das toras nas pilhas; a umidade das toras na região inferior das pilhas variou de 20 a 56%; na região central da pilha, variou de 19 a 44% e, na região superior, de 16 a 43%.

A redução da taxa de secagem, em razão do aumento do diâmetro, ocorre devido ao maior percurso que as moléculas de água existentes no interior da madeira, necessitam percorrer para atingirem as camadas superiores da madeira e serem evaporadas (VITAL *et al.*, 1985).

Barros (2006) estudando a secagem ao ar livre de toras de *Eucalyptus grandis* aos 11 anos de idade em Santa Maria, RS, observou que a umidade média das toras foi igual a 70% após 30 dias de exposição às condições ambientais, partindo de uma umidade inicial de 106%. Aos 60 dias de secagem, a umidade média aproximou-se de 40%. Após os 180 dias de secagem, a umidade média da madeira foi igual a 27%.

Rezende (2009) estudando a secagem ao ar livre da madeira do clone *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus camaldulensis* (VM 01), com casca e sem casca, durante 200 dias em Lavras, MG, obteve a curva de secagem mostrada na Figura 2. Observou-se que na primeira semana de secagem as toras com casca praticamente não perderam umidade, enquanto que as toras sem casca tiveram a sua umidade reduzida de 120 para 107%.



**Figura 2** - Curvas de secagem para toras com casca e sem casca para o clone *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus camaldulensis* (VM 01), durante 200 dias (REZENDE, 2009).

### 3.4 Carvão vegetal

Segundo a Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas – ABRAF (2011), o Brasil é o maior produtor mundial de carvão vegetal. Os principais consumidores são os setores de ferro-gusa, aço e ferros-liga, e em menor escala as indústrias de cerâmica e de cimento, o comércio e o consumidor residencial. Atualmente o consumo de carvão vegetal, em consequência da atividade siderúrgica, concentra-se em Minas Gerais, maior estado consumidor; nos estados do Maranhão e Pará, no polo siderúrgico de Carajás, onde predomina o consumo de carvão originado de vegetações nativas; e no estado do Mato Grosso do Sul, o mais novo polo siderúrgico nacional (REZENDE; SANTOS, 2010).

Carbonização de madeira é um processo de decomposição térmica que ocorre na ausência ou na presença controlada de oxigênio, deixando como produto sólido o carvão vegetal. É um processo de combustão incompleta, com fenômenos físico-químicos e reações complexas. O rendimento deste processo pode variar de acordo com as condições da madeira utilizada e da tecnologia de conversão empregada (TRUGILHO, 2006).

A carbonização ocorre em quatro fases: na primeira fase ocorre a secagem da madeira até a temperatura de 110°C, havendo somente liberação de água. Na segunda fase a temperatura varia de 110 a 250°C. A 180°C tem início a liberação da água de

constituição pela decomposição da celulose e hemiceluloses, pouca massa é perdida até 250°C. Forma-se a madeira semicarbonizada ou aticho. A terceira fase ocorre entre 250°C e 350°C, com a intensificação da decomposição da celulose e hemiceluloses, havendo expressiva perda de massa e formação de gases, óleo e água. Ao atingir a temperatura de 350°C o carvão tem aproximadamente 75% de carbono fixo e se considera que a carbonização está praticamente pronta. Na quarta fase, que ocorre entre 350°C a 500°C, reduz-se gradualmente a liberação de voláteis, principalmente gases combustíveis, continuando a fixação de carbono (REZENDE, 2006).

O rendimento e a qualidade do carvão vegetal dependem de alguns fatores, como a qualidade da madeira a ser convertida, seu teor de umidade, que deve estar abaixo de 30%, e o controle do processo, envolvendo tempo e temperatura média máxima (CARDOSO, 2010).

### **3.4.1 Friabilidade do carvão vegetal**

A friabilidade é a propriedade do carvão vegetal relacionada a sua susceptibilidade em formar finos quando submetido à abrasão e choques mecânicos. Está relacionada com a umidade, diâmetro, comprimento da madeira e temperatura final de carbonização (CARDOSO, 2010).

De modo geral, madeiras de maiores diâmetros ao serem carbonizadas tendem a gerar carvões mais quebradiços. Árvores com diâmetros maiores têm maior área de cerne, estando mais propícias à formação de trincas e fissuras durante a carbonização, ocasionando maior geração de finos (COUTINHO e FERRAZ, 1988). A relação cerne/alburno contribui para o aumento da geração de finos, pois a carbonização ocorre da superfície para o interior da tora de madeira, e há a liberação de gases originários durante o processo, que percorrem o caminho inverso. Esses gases devem ser liberados, e para que isto aconteça pode haver rompimento principalmente das células parenquimáticas, que possuem paredes celulares menos espessas e, portanto, menos resistentes. Assim, quanto maior a porcentagem de cerne, maior será o caminho obstruído a ser percorrido, conseqüentemente, maior o número de células rompidas e maior também, o teor de finos gerados (PEREIRA, 2012).

Segundo Coutinho e Ferraz (1988), é possível relacionar a geração de finos do carvão com a variação da densidade no sentido radial da madeira, pois ocorre um aumento da densidade no sentido medula-casca. Esta variação de densidade entre as regiões da medula e casca, combinada com o aumento da área do cerne, são responsáveis pela formação de tensões internas durante o processo de perda de umidade, sendo ainda mais drástico quanto maior for a temperatura e velocidade de carbonização, influenciando, conseqüentemente, na geração de finos de carvão vegetal. Esses mesmos autores estudando a friabilidade do carvão vegetal e a temperatura de carbonização, observaram que quanto maior a temperatura de carbonização maior também é a geração de finos.

Valente e Lelles (1986) afirmam que a produção de carvão com madeira úmida gera um carvão quebradiço, elevando o teor de finos durante o manuseio e transporte do mesmo. Normalmente altos teores de umidade estão associados a maior geração de gases durante a carbonização, o que provoca rupturas generalizadas na estrutura do carvão formado, aumentando sua friabilidade. Já em relação ao comprimento da madeira segundo dados do CETEC (1982) ocorre uma relação positiva entre os comprimentos das peças de madeira e a geração de finos.

## **4. MATERIAL E MÉTODOS**

Utilizou-se neste estudo, material proveniente de um plantio de *Eucalyptus urophylla*, com idade de 5 anos, cultivado em espaçamentos 3 x 2 m, localizados no município de Viçosa, região da Zona da Mata mineira. Esse município situa-se nas coordenadas geográficas 20° 45' de latitude sul e 42° 51' de longitude oeste, apresentando altitude média de 650 m. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cwb, mesotérmico, com inverno seco e verão chuvoso, tendo precipitação média anual de 1.200 mm. A temperatura média anual é de 20,45° C, com a mínima em torno de 14,6 °C e máxima de 26,3 °C.

### **4.1 Preparo das amostras**

Utilizou-se material de seis árvores na determinação das propriedades da madeira. De cada árvore foram retirados 6 discos de 5 cm de espessura, correspondentes a 0%, DAP (diâmetro à altura do peito), 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial do tronco. Inicialmente, fez-se a medição das porcentagens de cerne e alburno de cada disco. Os discos obtidos na altura do DAP foram utilizados para as análises anatômicas e para determinar a densidade básica no sentido medula-casca da madeira. Dos outros discos foram obtidas duas cunhas opostas, passando pela medula, utilizadas na determinação da densidade básica da madeira e corpos-de-prova para determinação da retratibilidade da madeira no sentido base-topo.

O restante de cada disco foi seccionado formando-se uma amostra composta para determinação da análise química estrutural.

### **4.2 Propriedades da madeira**

#### **4.2.1 Propriedades da madeira no sentido base-topo**

##### **4.2.1.1 Relação cerne/alburno (C/A)**

Os procedimentos utilizados para determinação da relação cerne/ alburno (C/A) estão de acordo com a metodologia descrita por Evangelista (2007). Inicialmente

identificou-se, em cada disco, a região do cerne periférico, região limite entre cerne e alburno, com o auxílio de uma lupa com aumento de dez vezes, observando-se a alteração na cor, redução do tamanho dos poros e ocorrência de poros obstruídos por tilos no cerne. De uma extremidade à outra de cada disco, traçaram-se duas retas perpendiculares, passando pelo centro da medula. Foram feitas as medições do diâmetro total e do diâmetro do cerne com uma régua de 0,1 cm de precisão. A relação cerne/alburno (C/A) foi calculada pela fórmula:

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

onde,

Dc: Diâmetro do cerne, em cm; e,

D: Diâmetro do disco sem casca, em cm.

Os valores médios da relação C/A e porcentagem de cerne e alburno foram calculados a partir da média aritmética dos diâmetros, interno e externo, observados em cada disco retirado no sentido base-topo das árvores.

#### **4.2.1.2 Densidade básica**

A densidade básica da madeira foi determinada pelo método de imersão em água, de acordo com a norma ABNT NBR 11941 (ABNT, 2003).

Os valores médios de densidade básica foram calculados pela média aritmética das duas cunhas retiradas em cada disco ao longo do sentido base-topo.

#### **4.2.1.3 Retratibilidade**

A retratibilidade foi determinada pela adaptação dos procedimentos estabelecidos na norma ABNT NBR 7190 (ABNT, 1997). Os corpos-de-prova utilizados na determinação da retratibilidade possuíam dimensões de 2x2x3 cm, devido

a espessura do disco do qual foram retirados. O coeficiente de anisotropia também foi determinado segundo a metodologia preconizada pela mesma norma. A retratibilidade foi calculada pela média aritmética das amostras retiradas em cada disco ao longo do sentido base-topo.

## **4.2.2 Propriedades da madeira no sentido medula-casca**

### **4.2.2.1 Densidade básica**

A densidade básica da madeira foi determinada pelo método de imersão em água, de acordo com a norma ABNT NBR 11941 (ABNT, 2003). Foram retiradas amostras ao longo do sentido medula-casca nas posições de cerne, transição cerne/alburno e alburno do disco do DAP para a determinação da densidade no sentido medula-casca.

### **4.2.2.2 Análise morfológica de fibras e poros**

Foram retirados pequenos fragmentos ao longo do sentido medula-casca nas posições de cerne, transição cerne/alburno e alburno do disco do DAP. Para individualização das fibras, as amostras foram acondicionadas com solução de peróxido de hidrogênio e ácido acético glacial, segundo o método preconizado por Dadswell (1972). Posteriormente, montaram-se lâminas temporárias e mediram-se a largura e o diâmetro de 30 fibras por árvore. Foram utilizados um microscópio ótico com câmera acoplada, sistema de aquisição de imagens, e o *software* Axio-Vision. A espessura da parede celular da fibra foi determinada matematicamente pela metade da diferença entre a largura da fibra e o diâmetro do lume. A fração parede (FP) foi estimada conforme Foelkel *et al.* (1975):

$$\text{Fração parede} = \frac{2 * E_p}{D_f} * 100$$

Sendo,

Ep: Espessura de parede, em  $\mu\text{m}$ ; e,

Df: Diâmetro de fibra, em  $\mu\text{m}$ .

Para medição do diâmetro e da frequência de poros foram retiradas amostras ao longo do sentido medula-casca nas posições de cerne, transição cerne/alburno e alburno provenientes do disco relativo ao DAP de apenas de duas árvores. Os cortes anatômicos foram feitos com espessura média de 16  $\mu\text{m}$ , utilizando um micrótomo de deslize horizontal. De cada amostra foram realizados cortes nos planos transversal, longitudinal tangencial e longitudinal radial. Os cortes anatômicos foram desidratados em uma série alcoólica, corados com solução de safranina, e as lâminas foram fixadas com Entelan. Com o auxílio do *software* Axio-Vision 4.3, foram realizadas as medições do diâmetro de 30 poros para cada árvore e a frequência foi mensurada em 5 micrografias por árvore.

#### **4.2.3 Permeabilidade**

A permeabilidade foi determinada através da metodologia descrita por Baraúna (2010), utilizando-se amostras provenientes de três árvores. Foi realizada apenas a permeabilidade gasosa, utilizando-se amostras cortadas no sentido longitudinal da madeira das regiões do cerne e alburno. As amostras foram retiradas de uma tábua oriunda da primeira tora de cada árvore utilizada. Para cada tábua retirou-se 5 amostras da região do cerne e 5 da região do alburno, totalizando em 10 amostras por árvore. Os procedimentos de retirada das amostras, bem como os seu preparo para o teste de permeabilidade gasosa seguiram a metodologia utilizada por Baraúna (2010).

O equipamento para o ensaio da permeabilidade ao ar atmosférico é dotado de três rotâmetros conectados em série nas seguintes escalas e sequência: 10 a 100 l/h, 10 a 180 l/h e 100 a 1100 l/h. A leitura de vazão de ar foi obtida pelo rotâmetro de menor escala e, quando não era possível a leitura, media-se do segundo ou do terceiro rotâmetro. Esses rotâmetros tinham a finalidade de medir o fluxo de ar por meio dos corpos-de-prova. Para tanto, os corpos-de-prova foram colocados em um dispositivo, em que, em uma extremidade da amostra eram ligados os medidores de vazão, e em outra extremidade, foi aplicada sucção. Anotaram-se a vazão de ar no corpo-de-prova; o

tempo, em minutos, em que o fluxo tornou-se constante e a pressão indicada pelo manômetro da bomba de vácuo. A bomba de vácuo apresentava pressão máxima de 760 mmHg. A pressão inicial foi obtida através de dados da normal climatológica, onde se utilizou a média mensal de pressão para o mês de dezembro de 2012 como a pressão inicial.

Para determinar a permeabilidade gasosa da madeira, foi utilizada a equação abaixo, seguindo a lei de Darcy, sendo que:

$$K_g = \frac{V \cdot L \cdot P}{t \cdot A \cdot \Delta P \cdot \bar{P}}$$

onde,

$K_g$ : permeabilidade ao gás ( $\text{cm}^3/\text{cm} \cdot \text{atm} \cdot \text{s}$  ou  $\text{m}^3/\text{m}(\text{N}/\text{m}^2) \cdot \text{s}$ );

V: volume do fluxo de gás que percorre a espécie ( $\text{cm}^3/\text{s}$  ou  $\text{m}^3/\text{s}$ );

L: comprimento da amostra (cm ou m);

P: pressão (atm ou  $\text{N}/\text{m}^2$ );

t: tempo (s);

A: área da seção transversal ( $\text{cm}^2$  ou  $\text{m}^2$ );

$\Delta P$ : diferença de pressão (atm ou  $\text{N}/\text{m}^2$ );

$\bar{P}$ : média da pressão no corpo-de-prova (atm ou  $\text{N}/\text{m}^2$ ).

#### 4.2.4 Análise química estrutural

Para determinação da composição química da madeira foram empregadas as amostras de madeira já moídas, formando uma amostra composta por árvore, utilizando-se a fração que passou pela peneira com malha de 40 mesh e ficou retida na peneira com malha de 60 mesh (ASTM, 1982). A determinação do teor absolutamente seco da madeira foi realizada conforme a norma TAPPI 264 om-88 (TAPPI, 1998).

Os teores de extrativos da madeira foram determinados em duplicatas, de acordo com a norma TAPPI 204 om-88 (TAPPI, 1996), utilizando-se o método de determinação de extrativos totais, apenas substituindo o etanol/benzeno, pelo etanol/tolueno.

Os teores de lignina insolúvel foram determinados em duplicata pelo método Klason, modificado de acordo com o procedimento proposto por Gomide e Demuner (1986). A lignina solúvel foi determinada por espectrometria, conforme Goldschimid (1971), a partir da diluição do filtrado proveniente do procedimento para obtenção da lignina insolúvel. O teor de lignina total foi obtido por meio da soma dos valores de lignina solúvel e insolúvel.

A porcentagem de holoceluloses foi calculada por diferença, considerando-se a madeira livre de extrativos, ou seja, retirou-se de 100 a soma de extrativos e lignina total.

### 4.3 Secagem da madeira

Na Tabela 1 estão apresentados dados gerais do experimento de secagem utilizando madeira de *Eucalyptus urophylla*.

Tabela 1 - Experimento de secagem realizado com madeira de *Eucalyptus urophylla*

Parâmetros	Classe de diâmetro	Comprimento do torete (m)	Nº de toretes por comprimento	Frequência de pesagens	Período de observação
Com casca	1(<10 cm)	0,6; 0,4 e 0,2	5	Semanal	Julho a Setembro de 2012
	2(10-13 cm)	0,6; 0,4 e 0,2	5		
	3 (>13 cm)	0,6; 0,4 e 0,2	5		
Sem casca	1(<10 cm)	0,6; 0,4 e 0,2	5		
	2(10-13 cm)	0,6; 0,4 e 0,2	5		
	3 (>13 cm)	0,6; 0,4 e 0,2	5		

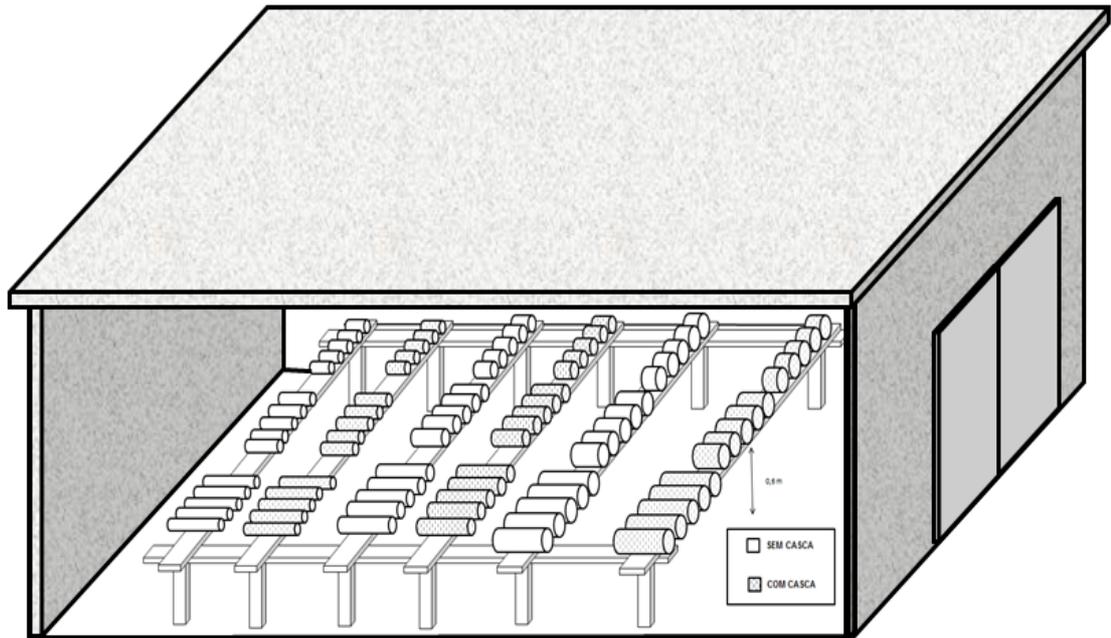
As árvores foram colhidas e em seguida procedeu-se a retirada de 6 discos ao longo do tronco, correspondentes às alturas de 0%, DAP, 25%, 50%, 75% e 100%, utilizados na caracterização da madeira. O restante do material foi seccionado em toras de aproximadamente 2 metros, as quais foram identificadas e enviadas, com casca, ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira. No laboratório foram determinadas a circunferência da base e do topo de todas as toras e através dessas informações calculou-se o seu diâmetro médio. A seguir as toras foram separadas em três grupos,

denominados: grupo 1, toras de menores diâmetros (< 10 cm), grupo 2, toras de diâmetros intermediários (10 - 13 cm) e grupo 3, toras de maiores diâmetros (> 13 cm).

De cada grupo selecionou-se aleatoriamente 10 toras de 2 metros de comprimento, as quais foram cortadas em toretes com comprimentos 0,20; 0,40 e 0,60 m. Metade desse material permaneceu com casca e a outra metade foi descascada manualmente. Os comprimentos dos toretes foram definidos em função dos comprimentos de toras utilizadas em empresas produtoras de carvão vegetal, os toretes foram seccionados com 10% do comprimento das toras utilizadas na produção do carvão em nível industrial. De cada tora de 2 m de comprimento, selecionada para ser seccionada em toretes, foram retirados discos de aproximadamente 3 cm nas extremidades e na região central para a determinação da umidade inicial. A umidade foi determinada conforme a norma ABNT NBR 11941 (ABNT, 2003). Adotou-se a umidade média de cada disco como umidade inicial dos toretes, conforme metodologia adotada por Rezende (2009).

Todos os toretes de 0,20; 0,40 e 0,60 m de comprimento foram pesados individualmente em balança digital com capacidade de 20 kg e precisão de 0,001 kg. A partir dos valores de umidade dos discos e da massa inicial dos toretes, estimou-se a massa seca dos mesmos. Durante o período de secagem todos os toretes foram pesados semanalmente, e a partir dos dados de massa úmida e massa seca estimada, calculou-se a umidade de cada torete ao longo do tempo.

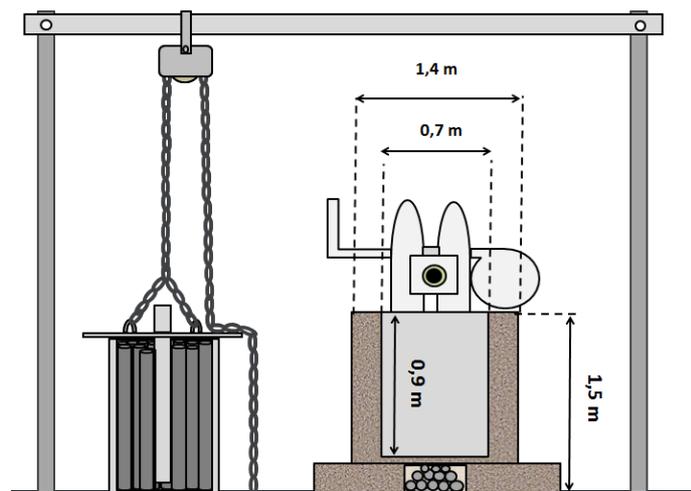
A secagem foi conduzida em um galpão coberto, onde foram monitoradas a umidade e temperatura do local através de relógio termo-higrômetro da marca Minipa modelo MT – 241. Os toretes ficaram dispostos em uma estrutura elevada a 0,6 m do chão para que houvesse uma maior circulação do ar entre eles (Figura 3).



**Figura 3** - Esquema da secagem dos torres no galpão.

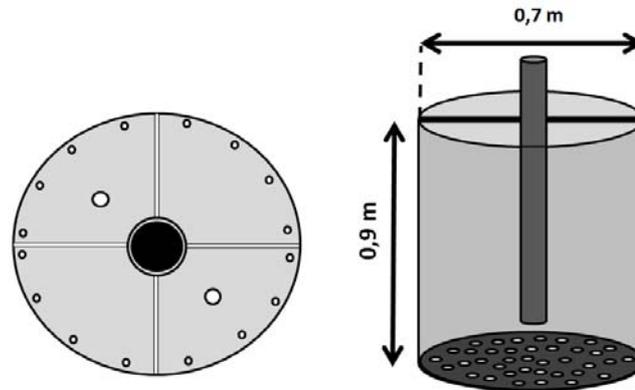
#### 4.4 Carbonização da madeira

As carbonizações foram conduzidas em forno tipo container. Esse sistema de carbonização consiste das seguintes partes: container metálico com volume de  $0,346 \text{ m}^3$ , poço isolante, sistema de movimentação e descarga, sistema condensação de gases e câmara de combustão. A Figura 4 representa um esquema geral do sistema container.



**Figura 4** - Esquema geral do sistema utilizado nas carbonizações.

O container metálico apresenta dois orifícios na parte superior onde foram inseridos os termopares (Figura 5), utilizados para monitoramento da temperatura de carbonização. Após a ignição do forno a temperatura foi verificada de 30 em 30 minutos até o término da carbonização.



**Figura 5** - Detalhe do container metálico.

O carregamento do forno foi realizado manualmente, tendo a madeira posicionada verticalmente. A seleção da madeira a ser enfiada foi realizada por meio da classe de diâmetro. Foram selecionados toretes nas classes diamétricas  $< 10$  cm,  $10 - 13$  cm e  $> 13$  cm. A madeira apresentava-se sem casca e com comprimentos variando de  $0,20$  a  $0,90$  m. Foram feitas duas carbonizações por classe de diâmetro, totalizando seis carbonizações.

Após o carregamento, o container foi vedado e então conduzido até o poço isolante, que tem a função de conservar o calor do meio enquanto a decomposição térmica da madeira se processa. A ignição do processo se deu através de uma câmara de combustão situada na base do poço isolante, onde foram queimados resíduos de madeira a fim de gerar o calor necessário para o início da carbonização. Os gases quentes gerados na câmara de combustão atingem o interior do container através dos furos existentes na chapa metálica da sua base e aquecem a carga, dando início a sua decomposição térmica.

O tempo de carbonização variou entre 6 e 13 horas, em função da classe de diâmetro da madeira. Procedeu-se o controle da temperatura interna do forno por meio de dois aparelhos termopares tipo K, inseridos em orifícios situados na parte superior do container.

Após o término da carbonização, o container era retirado do poço isolante e colocado sobre uma caixa de areia, o que impedia a entrada de oxigênio pelos orifícios existentes na parte inferior do container. O tempo médio de resfriamento foi de 12 horas e após este período procedia-se o descarregamento do carvão.

#### **4.4.1 Rendimento gravimétrico em carvão vegetal**

O rendimento gravimétrico em carvão vegetal foi calculado pela seguinte fórmula:

$$RGC = 100 \times \frac{Mc}{Mms}$$

em que:

RGC = rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%);

Mc = massa de carvão vegetal (kg); e

Mms = massa de madeira seca (kg).

#### **4.4.2 Amostragem e propriedades do carvão vegetal**

Após o resfriamento, o carvão vegetal produzido foi colocado em uma lona, homogeneizado e quarteado; de um quarto retirou-se uma alíquota para determinação das propriedades físicas e químicas do carvão vegetal. O restante foi utilizado na determinação da friabilidade.

##### **4.4.2.1 Propriedades físicas, químicas e friabilidade do carvão vegetal**

A densidade a granel foi determinada conforme os procedimentos da norma ABNT NBR 6922 (ABNT, 1981).

A densidade relativa aparente foi determinada conforme os procedimentos da norma ABNT NBR 9195 (ABNT, 1985).

Determinou-se também o teor de umidade, base seca. Para tanto, amostras de várias dimensões de carvão foram pesadas e levadas à estufa com circulação forçada de ar, a  $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ , até atingirem massa constante.

Para a determinação da composição química imediata, as amostras de carvão vegetal foram moídas e peneiradas, classificadas em peneira de 60 mesh e posteriormente secas em estufa a  $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ , até massa constante, conforme a norma NBR 6923 (ABNT, 1981). A determinação dos teores de materiais voláteis (MV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF) seguiu os procedimentos preconizados na norma NBR 8112 (ABNT, 1983).

Para determinação da friabilidade foram utilizadas amostras de carvão classificados na peneira de 60 mm e retidos na de 20 mm. As amostras continham cerca de 500 g de carvão e foram levadas a um tambor rotatório por 16 minutos a 30 RPM. Após este período, o carvão foi novamente peneirado, medindo-se a massa que ficou retida na peneira de 20 mm, expressa em porcentagem. A classificação dos finos gerados pelo teste de friabilidade seguiu a metodologia sugerida pelo Centro Tecnológico de Minas Gerais (Cetec), para carvão vegetal, citado por Oliveira *et al.* (1982), observada na Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação de friabilidade para carvão vegetal, segundo Cetec - MG

Classificação	% de perdas (abaixo de 20 mm)
Muito friável	$\geq 30$
Bastante friável	25 -29
Friabilidade média	15 -24
Pouco friável	10 -15
Muito pouco friável	$< 10$

## 4.5 Delineamento estatístico

### 4.5.1 Propriedades da madeira e do carvão vegetal

Para as propriedades da madeira avaliou-se o efeito da distância longitudinal, no sentido base-topo, e da distância radial, no sentido medula-casca. Quanto ao carvão

vegetal avaliou-se o efeito da classe diamétrica na friabilidade e em suas propriedades físicas e químicas. Os dados foram submetidos aos testes de Lilliefors, para testar a normalidade, e Cochran, para testar a homogeneidade das variâncias. Em seguida os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e quando estabelecidas diferenças significativas, aplicou-se o teste Tukey em nível de 5% de significância.

#### **4.5.2 Secagem da madeira**

Para avaliar o efeito do comprimento da madeira (0,2, 0,4 e 0,6 m), classe diamétrica (< 10, 10-13, >13 cm) e a presença ou ausência de casca, no tempo de secagem foi instalado um experimento, seguindo um delineamento inteiramente casualizado, com 5 repetições, totalizando 90 unidades amostrais. Para analisar a influência dos fatores estudados, presença de casca, comprimento e diâmetro, no tempo de secagem, estimou-se uma equação para cada tratamento. Essas equações foram comparadas pelo teste de identidade de modelos, segundo Regazzi (1993), para avaliar se existia igualdade das tendências de perda de umidade em função do tempo de secagem.

As análises estatísticas foram realizadas com a o auxílio dos programas SAEG 9.1 (2007) e CurveExpert Basic 1.4.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Propriedades da madeira

#### 5.1.1 Propriedades da madeira no sentido base-topo

Na Tabela 3 são apresentados os valores médios das propriedades da madeira de *Eucalyptus urophylla* no sentido base-topo.

Tabela 3 - Propriedades médias da madeira de *Eucalyptus urophylla* no sentido base-topo

Propriedade	Posição no sentido base-topo				
	0 %	25 %	50 %	75 %	100 %
Relação C/A	1,36a	1,06a	0,68b	0,28c	0,20c
Densidade básica (kg/m <sup>3</sup> )	622a	587b	585b	578b	565b
Retração Tangencial (%)	10,39a	10,24ab	9,58ab	8,24b	8,14b
Retração Radial	7,17a	7,71a	7,42a	6,67a	6,72a
Retração Volumétrica	19,43a	18,51a	18,36a	16,24a	15,44a
Coefficiente anisotrópico	1,44a	1,33b	1,29bc	1,23cd	1,21d

Médias na mesma linha seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 95% de probabilidade, pelo teste Tukey.

A análise de variância indicou que o efeito da posição no sentido base-topo foi significativo a 95% de probabilidade, para a relação C/A, densidade básica, retração tangencial e coeficiente anisotrópico. Para a retração radial e volumétrica o efeito da posição no sentido base-topo não foi significativo.

Observa-se que houve um decréscimo significativo da relação cerne/alburno no sentido longitudinal da árvore. Verifica-se que a densidade básica da madeira também teve o mesmo comportamento, ou seja, diminuiu no sentido longitudinal. No entanto, o incremento de densidade não foi significativo a partir de 25% da altura total da árvore. Isso se deve a participação das camadas recém-formadas na proporção total de madeira que vai aumentando gradativamente da base para o topo do caule. Assim, proporcionalmente, existe mais madeira jovem do que adulta nas posições mais altas, e como o desenvolvimento do cerne acompanha o avanço da idade do lenho, a proporção do mesmo é maior onde o lenho é mais velho, ou seja, a proporção de cerne diminui da

base para o topo da árvore. Sendo assim, madeiras de maiores diâmetros apresentam maior área de cerne, e conseqüentemente maiores relações C/A (Santos *et al.*, 2004).

Haselein *et al.* (2004) estudando características tecnológicas da madeira de *Eucalyptus grandis* encontrou uma tendência crescente do percentual de cerne até a posição 25% no sentido base-topo, tornando-se, a partir dessa altura, decrescente até 100% da altura comercial. O percentual de albúrnio apresentou-se decrescente ao nível do DAP e 25% e tornando a crescer até 100%.

Durante o desenvolvimento da árvore, fatores ambientais e intrínsecos à própria espécie determinam o grau de variação da densidade básica no sentido radial e base-topo. Essas variações ocorrem em razão da anatomia da madeira, com diferentes tipos, forma, estrutura e organização das células que a compõe (VALE *et al.*, 2009). Para Oliveira e Silva (2003), as variações da densidade básica dependem principalmente das mudanças na proporção dos vasos e das espessuras das paredes celulares das fibras. O aumento da densidade pode ser o resultado do aumento da espessura da parede celular das fibras ou de um aumento na proporção das fibras em relação, por exemplo, à proporção de vasos.

Oliveira *et al.* (2005) avaliando 7 espécies de *Eucalyptus* observaram variações de densidade básica ao longo do sentido base-topo semelhantes ao deste trabalho. Dentre as 7 espécies estudadas, 6 apresentaram valores de densidade básica reduzindo da base para o topo, com exceção da espécie de *Eucalyptus grandis* onde se observou uma aumento desta propriedade.

Segundo Goulart *et al.* (2003) a literatura apresenta dados contrastantes em relação à variação da densidade básica da madeira no sentido base-topo. Para o gênero *Eucalyptus*, observa-se, com maior frequência, densidade decrescente até 50% da altura da árvore e crescente desse ponto até o topo ou ainda podendo diminuir próximo ao topo. O mesmo autor estudando a variação da densidade básica de *Eucalyptus grandis* verificaram um decréscimo da densidade básica da madeira da base para o DAP, aumentando levemente até 75%, seguindo então tendência decrescente até 100% da altura comercial, sendo que os maiores valores de densidade básica foram encontrados na base e 75% da altura da árvore.

Ainda na Tabela 3 verifica-se que houve uma redução da retração tangencial da madeira, sendo a mesma acompanhada, de forma significativa, por um menor coeficiente anisotrópico.

De acordo com Vital e Trugilho (1997) a variação dimensional e a densidade básica da madeira das espécies florestais apresentam correlação positiva, sendo que aquelas de maior densidade apresentam maior variação dimensional. Lopes *et al.* (2011) avaliando a variação dimensional no sentido base-topo do tronco de *Eucalyptus dunnii*, aos 18 anos, não observaram diferenças estatísticas para as posições analisadas, os valores médios foram de 14,08; 5,90 e 21,28 % para retração tangencial, radial e volumétrica, respectivamente.

Os valores médios de retração radial e volumétrica encontrados neste trabalho foram respectivamente, 7,14 e 17,77 %. Estudando a retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, Silva (2002) encontrou valores de 6,7 % (retração radial) e 16,5% (retração volumétrica total). Avaliando também a madeira de *Eucalyptus grandis*, Araújo (2010) obteve valores médios de 6,44 e 13 %, respectivamente para retração radial e volumétrica. Essas diferenças nas retrações entre os resultados encontrados neste trabalho e em outros, podem ser ocasionadas pela constituição anatômica da madeira, proporções de fibras, parênquima, ângulo microfibrilar, ou mesmo pela constituição química da madeira, além disso, essas propriedades são afetadas pela idade da árvore (LOVATTI, 2008).

### **5.1.2 Propriedades da madeira no sentido medula-casca**

Na Tabela 4 são apresentados os valores médios das propriedades da madeira de *Eucalyptus urophylla* no sentido medula-casca.

Tabela 4 – Propriedades médias da madeira de *Eucalyptus urophylla* no sentido medula-casca

Propriedade	Posição no sentido medula-casca		
	Cerne	Transição Cerne/Alburno	Alburno
<b>Densidade básica (kg/m<sup>3</sup>)</b>	471c	541b	642a
<b>Diâmetro tangencial dos vasos (µm)</b>	88,82b	93,84b	108,80a
<b>Frequência dos vasos (vasos/mm<sup>2</sup>)</b>	11,96a	11,25a	11,23a
<b>Comprimento das fibras (mm)</b>	0,99b	1,05ab	1,12a
<b>Largura das fibras (µm)</b>	19,99b	21,36ab	21,85a
<b>Diâmetro do lume das fibras (µm)</b>	8,58a	8,32a	8,02a
<b>Espessura da parede das fibras (µm)</b>	5,84b	6,66 a	6,64a
<b>Fração parede das fibras (%)</b>	58,43a	60,78a	62,52a

Médias na mesma linha seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 95% de probabilidade, pelo teste Tukey.

A análise de variância indicou que o efeito da posição no sentido medula-casca, foi significativo a 95% de probabilidade, para densidade básica, diâmetro tangencial dos vasos, comprimento, largura e espessura da parede das fibras. Não houve efeito significativo da posição para frequência de vasos, diâmetro de lume das fibras e fração parede das fibras.

De modo geral, observa-se, na Tabela 4, que para aquelas propriedades que foram significativas, houve um aumento das mesmas no sentido medula-casca.

Observa-se que a densidade no sentido medula-casca aumentou de forma significativa, tendo a posição três um incremento de 26,6% em relação a parte central da árvore. Oliveira *et al.* (2005) avaliando 7 espécies de *Eucalyptus*, encontraram uma tendência de aumento da densidade básica no sentido medula-casca, com valores mais baixos na região da medula, aumentando até próximo da região do alburno. Tal fato também foi observado por Evangelista (2007) ao estudar a densidade da madeira no sentido medula-casca de três clones de *Eucalyptus*, aos 6, 8 e 10 anos de idade. Esse aumento de densidade é caracterizado pela formação da madeira juvenil na região central (próxima à medula) e madeira adulta (próxima à casca) conforme retratado por inúmeros autores analisando a madeira de diferentes espécies de eucalipto (LOPES *et al.*, 2011). A diferença da madeira juvenil em relação à madeira adulta está relacionada às alterações anatômicas que ocorrem no sentido da medula para a casca do tronco, no qual observam-se modificações no comprimento, diâmetro e espessura da parede das células. Segundo Silva (2007) a madeira juvenil é caracterizada por apresentar células

de menores comprimentos, paredes finas, lumes grandes e baixa densidade, e a madeira adulta se caracteriza por apresentar células de maiores comprimentos, parede espessas, lumes reduzidos e alta densidade.

Avaliando os parâmetros anatômicos da madeira, verifica-se que o diâmetro tangencial dos vasos apresentou diferença significativa entre as posições analisadas, apresentando um aumento ao longo do sentido medula-casca, sendo que a posição 3, próximo a casca, teve um aumento significativamente em relação as demais. Variação semelhante também foram encontrados por Evangelista (2007), Rocha *et al.* (2004) e Poubel *et al.* (2011). A tendência de aumento do diâmetro dos vasos no sentido medula-casca é amplamente registrada na literatura (OLIVEIRA, 1997; SOUSA JÚNIOR, 2004).

Para a frequência dos vasos não houve efeito significativo da posição, e a mesma obteve um valor médio de 11,48 vasos/mm<sup>2</sup>, no entanto, vale ressaltar, que houve uma tendência de decréscimo dos valores médios no sentido medula-casca. Valor semelhante para frequência de vasos foi observado por Evangelista (2007) estudando a madeira de *Eucalyptus urophylla*, aos 8 anos. O mesmo autor ainda encontrou frequência de vasos decrescendo no sentido medula-casca.

Quanto aos parâmetros das fibras da madeira, verificou-se que suas dimensões apresentam-se crescentes em relação ao sentido medula-casca, com exceção do diâmetro do lume. A tendência crescente do comprimento, largura e espessura da parede ao longo do sentido medula-casca foram observadas por Poubel *et al.* (2011), Rocha *et al.* (2004) estudando espécies de eucalipto. Muitos trabalhos na literatura registraram o aumento da largura das fibras no sentido medula-casca, embora outras tendências de variação possam ser observadas para diversas espécies de eucalipto (EVANGELISTA, 2007).

O diâmetro médio do lume das fibras foi de 8,30 µm, não apresentando diferenças significativas quanto às posições no sentido medula-casca do tronco. Evangelista (2010) observou valores variando de 8,8 a 12,7 µm para diâmetro do lume. Santos *et al.* (2011) verificaram valores entre 8,93 e 9,38 µm para clones de *Eucalyptus* spp., aos 7 anos de idade, e uma tendência de redução do diâmetro do lume ao longo do sentido medula-casca. Moreira (1999) também verificou decréscimo do diâmetro do lume das fibras, no sentido medula-casca, para espécies de eucalipto. Um padrão linear

não definido de variação do diâmetro do lume das fibras no sentido medula-casca foi encontrado por Sousa Júnior (2004), estudando a madeira de *Eucalyptus urophylla*.

Também não houve efeito significativo da posição para o parâmetro fração parede das fibras. No entanto, verificou-se tendência de aumento, uma vez que essa propriedade é calculada em função da espessura da parede e a largura da fibra apresentando um valor médio de 60,58 %. Valores de fração parede variando entre 47 a 55,6 % foram encontrados por Pereira (2012) avaliando 6 clones de *Eucalyptus*.

### **5.1.3 Permeabilidade**

De acordo com os resultados da análise de permeabilidade da madeira não houve nenhuma vazão de fluxo gasoso nas amostras do cerne, possivelmente devido as pressões de trabalho utilizadas na bomba de vácuo e da permeabilidade extremamente baixa, normalmente apresentada por esta região. A baixa permeabilidade do cerne se deve a ocorrência de tilos, que podem obstruir parcial ou totalmente o lume dos vasos. É importante ressaltar que durante a análise morfológica dos componentes anatômicos observou-se a presença de tilos obstruindo o lume dos vasos na região do cerne. Além de tilos, a presença de gomas e de outras substâncias que se depositam no cerne, impedem ou diminuem grandemente a sua permeabilidade (SILVA, 2007). Verificou-se também que os vasos apresentaram menor diâmetro tangencial (88,82  $\mu\text{m}$ ) e maior frequência (11,96 vasos/ $\text{mm}^2$ ) por  $\text{mm}^2$  no cerne, esses fatores podem ter contribuído para a baixa permeabilidade nesta região.

Segundo Burger e Richer (1991) a anatomia da madeira possui impacto fundamental na secagem, afetando principalmente permeabilidade da madeira. Uma vez que fatores anatômicos como tiloses, frequência e distribuição dos vasos, aspiração do torus, entre outras propriedades influenciam a permeabilidade da madeira, afetando assim o processo de secagem.

Vale salientar que madeiras mais permeáveis secam mais rápido, logo é desejável seleção de materiais genéticos de eucalipto e tratos silviculturais que proporcionam baixa relação cerne/alburno. Em relação às amostras da região do alburno, observou-se uma permeabilidade gasosa média de 216,97  $\text{cm}^3/\text{cm}.\text{atm}.\text{s}.$ . Na análise morfológica dos componentes anatômicos observou-se a presença de vasos de

maior diâmetro tangencial (108,80  $\mu\text{m}$ ), menor frequência (11,23  $\text{mm}^2$ ) e ausência de vasos obstruídos, esses fatores podem ter contribuído para que no alburno fosse observado vazão do fluxo gasoso nas amostras. Silva (2007) estudando a permeabilidade gasosa de amostras longitudinais do alburno da madeira de *Eucalyptus grandis*, aos 100 anos, e *Eucalyptus citriodora*, aos 25 anos, encontrou valores médios de 453,75 e 352,55  $\text{cm}^3/\text{cm}\cdot\text{atm}\cdot\text{s}$ , respectivamente. Os valores observados neste trabalho foram mais baixos que os encontrados por Silva (2007), provavelmente se deve a diferença do material genético utilizado, e conseqüentemente, na variação da anatomia, além da idade da árvore e metodologia utilizada. Segundo Siau (1984) tamanho, distribuição e números de elementos anatômicos condutores variam consideravelmente entre diferentes espécies. A permeabilidade gasosa das espécies amapá e faveira foram determinadas por Baraúna (2010) que obteve valores médios de 64,53 e 142,00  $\text{cm}^3/\text{cm}\cdot\text{atm}\cdot\text{s}$ , respectivamente.

#### 5.1.4 Análise química estrutural

Na Tabela 5 estão apresentados os valores médios de lignina insolúvel, lignina solúvel, lignina total, holoceluloses e extrativos.

Tabela 5 - Valores médios e o coeficiente de variação (CV) de lignina insolúvel, lignina solúvel, lignina total, holoceluloses e extrativos da madeira de *Eucalyptus urophylla*, em porcentagem

<b>Componentes</b>	<b>Média (%)</b>	<b>CV(%)</b>
<b>Lignina insolúvel*</b>	23,43	2,35
<b>Lignina solúvel*</b>	2,91	12,36
<b>Lignina total*</b>	29,34	3,04
<b>Holoceluloses</b>	66,16	2,16
<b>Extrativos totais</b>	4,50	14,90

\* Madeira livre de extrativos

O teor de lignina total encontrado está em conformidade com Pereira (2012), que observou teores de lignina total variando entre 28,8 a 31,4 %, ao avaliar 6 clones de

*Eucalyptus*. Valores próximos a estes, também foram encontrados por Rocha (2011) e Castro (2011). O teor de holoceluloses observado foi 66,16 %, outros trabalhos como o de Castro (2011) e Santos (2010) apresentaram valores semelhantes.

Com relação ao teor de extrativos, os valores observados aproximam-se daqueles encontrados por Pereira (2012) e Castro (2011). De modo geral, quanto maior o teor de extrativos presentes na madeira menor a sua permeabilidade. Segundo Siau (1984) e Silva (2007), o conteúdo de extrativos presentes na madeira atua como barreira natural à passagem de fluxo, principalmente no cerne.

Durante o processo de secagem, a madeira tende a atingir a umidade de equilíbrio higroscópico com o ambiente. Embora a temperatura e a umidade relativa sejam os principais fatores que condicionam a umidade de equilíbrio, sabe-se que a composição química da madeira (teores de holoceluloses, lignina e extrativos) também atua no fenômeno de adsorção d'água. SKAAR (1972), reportando resultados obtidos por Christensen e Kelsey, estimou que a celulose contribui com 47% da capacidade total da madeira trocar água com o ar, as hemiceluloses com 37%, e a lignina com 16%. Já os extrativos podem se depositar nos espaços intra e intercelulares, na superfície e no interior da parede celular, diminuindo a disponibilidade de locais para a fixação das moléculas de água.

## **5.2 Secagem da madeira**

Sabe-se que a secagem natural é afetada, principalmente pela temperatura, umidade relativa e circulação de ar. Para reduzir esses efeitos sobre os tratamentos, o experimento foi conduzido em uma área experimental fechada, tendo a umidade relativa e temperatura monitoradas durante todo o período de avaliação. A variação da temperatura durante o período de secagem foi de 18,16 a 23,35°C e a umidade relativa do ar de 60,38 e 70,87%.

Na Tabela 6 são apresentados os teores médios de umidade inicial da madeira com e sem casca em função da classe diamétrica.

Tabela 6 - Teores médios iniciais de umidade da madeira com e sem casca em função da classe diamétrica

<b>Parâmetros</b>	<b>Classe 1 (&lt;10cm)</b>	<b>Classe 2 (10-13cm)</b>	<b>Classe 3 (&gt;13cm)</b>
<b>Com casca</b>	86,49 %	81,45 %	85,47 %
<b>Sem casca</b>	76,86 %	72,56 %	76,59 %
<b>Porcentagem de variação</b>	11,13 %	10,91 %	10,38 %

De modo geral, a madeira com casca apresentou maior umidade média inicial em relação à madeira sem casca. A casca também possui umidade o que pode ter contribuído para os maiores teores observados. A porcentagem de variação de umidade entre a madeira com e sem casca, dentro de cada classe diamétrica foi semelhante, apresentando um valor médio de 10,81 %.

A madeira como matéria-prima para carvão vegetal deve apresentar certas características que vão contribuir para um melhor desempenho da carbonização e da qualidade do produto final. Dentre essas características destaca-se a densidade básica, as suas dimensões (comprimento e diâmetro), a composição química e o teor de umidade da madeira.

O teor de umidade influi diretamente no processo de carbonização e nas características do carvão vegetal. A umidade aumenta o tempo de carbonização, podendo provocar perdas na produção, uma vez que parte da carga da madeira é utilizada na secagem que ocorre dentro do forno, além de reduzir a resistência do carvão vegetal, tornando-o mais, friável e quebradiço, aumentando a produção de finos durante o manuseio e transporte. Segundo Valente (1986) a madeira utilizada nas carbonizações deve apresentar teor de umidade abaixo de 30%, para alcançar um melhor desempenho do processo e qualidade do produto.

De acordo com os resultados de perda de umidade ao longo do tempo de secagem, o modelo matemático que melhor descreveu os efeitos dos tratamentos foi o modelo polinomial de segundo grau  $y = b_0 + b_1.X + b_2.X^2$ , em que:

$y$  = umidade;

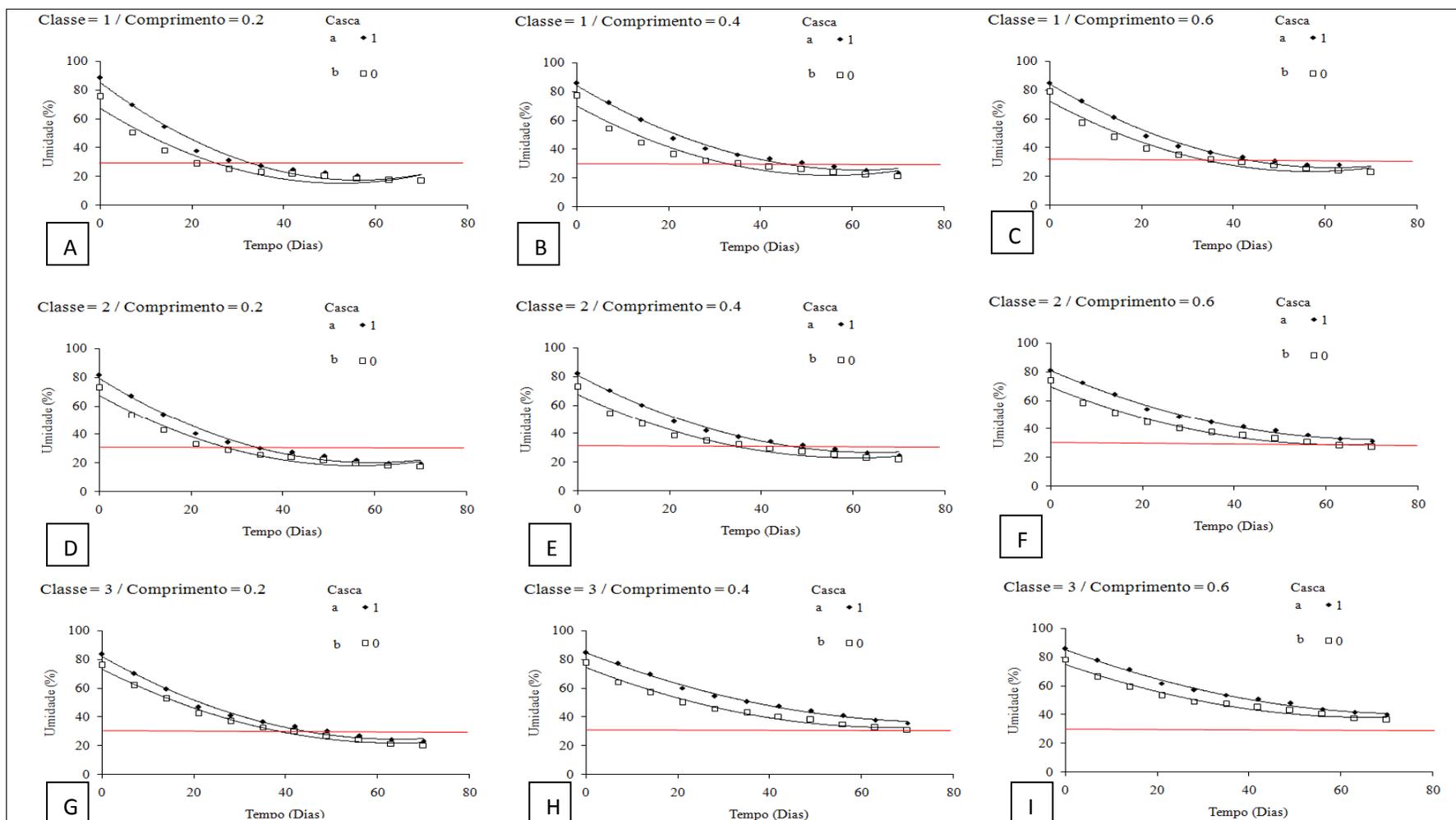
$b_0$  = o valor de  $Y$  (umidade) quando o  $X$  (dias de secagem) é igual a zero, o que corresponde ao teor de umidade inicial das toras;

$b_1$  e  $b_2$  = parâmetros do modelo;

$X$  = número de dias de secagem.

As estimativas dos parâmetros  $b_0$ ,  $b_1$  e  $b_2$  para todas as curvas estão apresentadas nas Tabelas 1B, 2B e 3B, no Anexo 2. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) apresentou valores acima de 94 % para todas equações estimadas, desta forma, o modelo utilizado mostrou-se satisfatório no ajuste das equações.

Na Figura 6 estão apresentados os valores médios de umidade, observados e estimados durante o período de secagem em função da presença ou ausência de casca.



Curvas seguidas de mesma letra, em um mesmo gráfico, não diferem entre si pelo teste de identidade de modelos, a 95% de probabilidade. 0= Madeira sem casca; 1 = Madeira com casca

**Figura 6** - Valores médios de umidade da madeira observada e estimada, ao longo do período de secagem, em função da presença ou ausência de casca.

Verificou-se para todas as curvas, que o efeito da casca foi significativo a 95% de probabilidade pelo teste de identidade de modelos.

A velocidade de secagem foi maior para a madeira sem casca, sendo observada uma diferença mais acentuada para madeira de menor diâmetro e comprimento, principalmente nos primeiros 14 dias de secagem.

A menor perda de água observada nos toretes de madeira com cascas se deve ao impedimento físico que a mesma oferece e também a redução da área superficial do lenho, afetando a saída da água. Além disso, a casca é mais impermeável que madeira, por conter muita suberina, conforme citado por Rezende (2009) apud Raven *et al.* (2001).

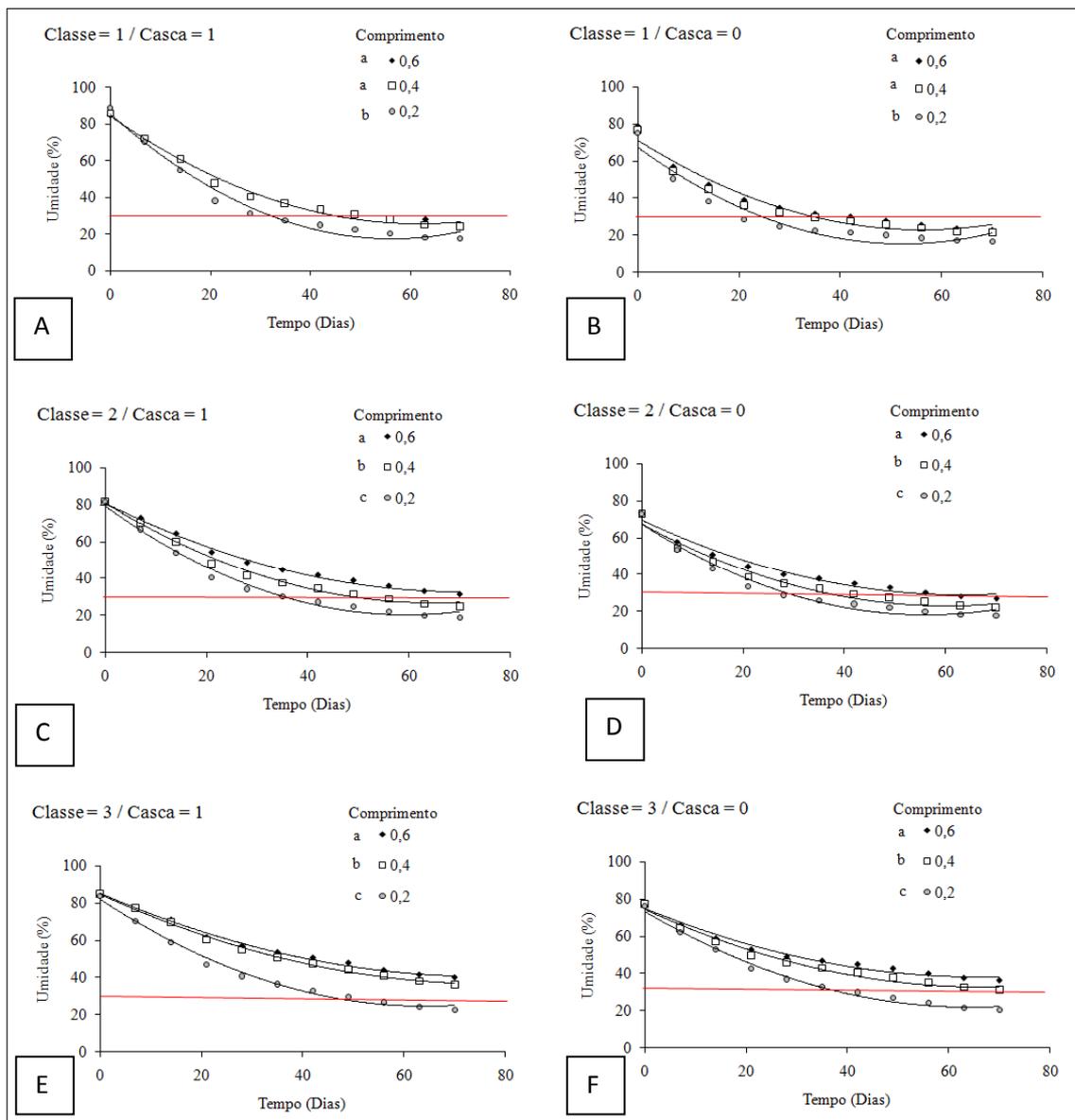
Observa-se que, de modo geral, as madeiras sem casca alcançaram à umidade próxima a umidade de saturação das fibras (USF), em torno de 30%, em um período de tempo menor do que as toretes com casca, conforme observado na Figura 6 A, sendo que os teores de umidade próximos a 30 % foram observados aos 21 dias de secagem para madeira sem casca e aos 35 dias para madeira com casca. Verificou, ainda, que após 40 dias de secagem, a diferença de perda de umidade entre as toretes com e sem casca foi menos acentuada. Mesmo efeito foi observado por Vital *et al.* (1985) que verificaram que madeira sem casca perde umidade mais rapidamente, porém com a proximidade do equilíbrio higroscópico, essa diferença é reduzida em relação a madeira com casca. Os mesmos autores verificaram que após noventa dias de secagem, as toras com casca apresentavam umidade média de 80%, enquanto a umidade das toras sem casca era de 51%, partindo-se de uma umidade inicial de 129%. A redução total de umidade no período foi de 50% para a madeira com casca e 79% para a sem casca.

Vale ressaltar, que o descascamento é umas das operações mais onerosas e custosas durante o processamento da madeira. A redução do período de secagem da madeira sem casca, até a mesma atingir 30 % de umidade, desejado na produção de carvão vegetal, não apresentou diferença expressiva quando comparada com a madeira com casca. Deste modo, o descascamento da madeira no campo não se é uma opção atrativa para redução do tempo de secagem da madeira, devido aos custos envolvidos no processo e aos preços praticados do carvão vegetal nos dias atuais para o setor de ferro gusa.

Seixas *et al.* (2005), estudando o balanço energético e econômico do descascamento de toras de *Eucalyptus grandis* aos oito anos de idade, em Itatinga, SP,

observaram que após 182 dias de secagem a umidade média passou de 132 para 49% para as toras com casca e de 108 para 38% para as toras sem casca.

Na Figura 7 estão apresentados os valores médios de umidade, observados e estimados durante o período de secagem em função do comprimento da madeira.



Curvas seguidas de mesma letra, em um mesmo gráfico, não diferem entre si pelo teste de identidade de modelos, a 95% de probabilidade. 0= Madeira sem casca; 1 = Madeira com casca

**Figura 7** - Valores médios de umidade observada e estimada, ao longo do período de secagem, em função do comprimento da madeira.

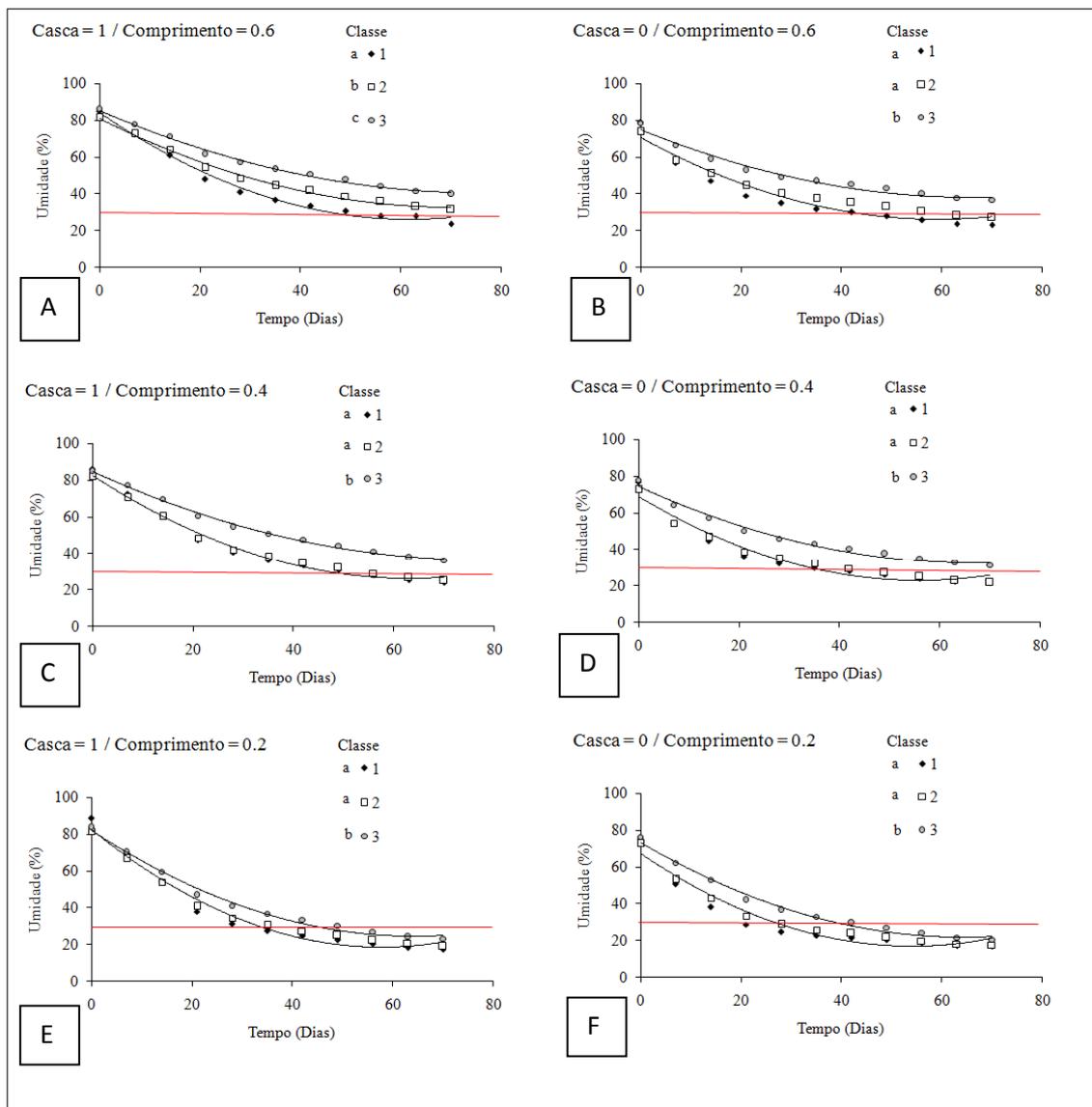
Analisando a Figura 7, observa-se para a classe de diâmetro 1, tanto para a madeira com e sem casca, as curvas estimadas para os comprimentos 0,40 e 0,60 m não diferiram a 95% de probabilidade, pelo teste de identidade de modelos, sendo assim essas curvas, apresentaram similaridade para perda de umidade ao longo do

tempo de secagem. Para as outras classes de diâmetro, tanto para as madeiras com e sem casca, o tempo de secagem em função do comprimento foi significativo, sendo mais acentuado na madeira de maior diâmetro, conforme observa-se na Figura 7E e 7F, e isso é devido a velocidade de movimentação da água na madeira que é cerca de 10 a 15 vezes maior na direção longitudinal que na transversal (MELLADO, 2007), uma vez que, os elementos anatômicos da madeira se encontram dispostos na direção longitudinal favorecendo a saída de água. Além disso, quanto maior o diametro da tora, maior o percurso a ser percorrido pelas moléculas de água, do interior da madeira até a sua superfície.

De modo geral, verificou-se que as madeiras com menores comprimentos secaram mais rápido. A madeira de 0,20 m de comprimento, classe diâmetro 1, atingiu a umidade próxima a 30 % em um menor intervalo de tempo quando comparadas com a madeira de 0,4 e 0,6 m, com casca e sem casca. De acordo com a Figura 7A (classe 1, com casca) a umidade próxima aos 30 % foi alcançada aos 28 dias, para madeira de 0,2 m e aos 49 dias para as madeiras de 0,40 e 0,60 m de comprimento, na figura 7B (classe 1, sem casca), aos 21 dias, para madeira de 0,20 m, 35 dias para madeira de 0,4 m e 42 dias para madeira de 0,60 m de comprimento. A maior perda de umidade observada na madeira de menor comprimento possivelmente ocorreu em função da menor distância e tempo necessário ao escoamento da água no sentido longitudinal da madeira e sua maior área superficial (SIAU, 1971).

Barros (2006) avaliando o fator de cubicação para madeira empilhada de *Eucalyptus grandis*, aos 11 anos de idade, em Santa Maria, RS, utilizou toras de dois comprimentos (1 e 2,30 m), e observou que ao final de 180 dias de secagem ao ar livre, as toras de 1 m apresentavam maiores perdas de umidade em relação as toras de 2,30 m, as médias foram de 39,12 e 30,86 %, respectivamente.

Na Figura 8 estão apresentados os valores médios de umidade, observados e estimados durante o período de secagem em função do diâmetro da madeira.



Curvas seguidas de mesma letra, em um mesmo gráfico, não diferem entre si pelo teste de identidade de modelos, a 95% de probabilidade. 0= Madeira sem casca; 1 = Madeira com casca

**Figura 8** - Valores médios de umidade observada e estimada, ao longo do período de secagem, em função do diâmetro da madeira.

Na Figura 8 observa-se que o efeito do diâmetro não foi significativo a 95 % de probabilidade pelo teste de identidade de modelos, entre as classes diamétricas 1 e 2, para as madeiras de 0,20 e 0,40 m, com e sem casca, e na madeira de 0,6 m sem casca. Verificou-se efeito significativo do diâmetro na madeira com casca e comprimento de 0,60 m. Nas demais curvas, a classe de diâmetro 3 foi significativamente diferente das classes de diâmetro 1 e 2.

A madeira de menor diâmetro aliado a ausência de casca e menor comprimento, atingiu a umidade próxima aos 30 % mais rapidamente que as demais, ou seja, em 21 dias, conforme observado na Figura 8B.

Para as madeiras com comprimento igual a 0,60 m, com e sem casca, (Figuras 8E e 8F) foi possível observar uma tendência de maior perda de umidade em função da redução do diâmetro do torete. Essa diferença possivelmente está associada a menor densidade e relação C/A, encontradas nas partes superiores do tronco da árvore, ressaltando que o menor diâmetro (classe 1), foi composta por toretes desta região. Vale ressaltar, também, que madeiras que apresentam menor densidade facilitam o movimento da água livre, que ocorre relativamente mais rápido em função do grande volume de espaços nas cavidades celulares, por outro lado apresentam maiores quantidade de água livre. Marques (2008) observou que abaixo do PSF, quanto maior a densidade básica, maior o tempo de secagem, uma vez que madeiras mais densas, possuem células de paredes mais espessas com maior quantidade de água retida (água de adesão), cuja remoção se dá de forma mais lenta, por difusão. Maiores relações C/A implicam em maior área de cerne, região normalmente obstruída por tilos e impregnada por substâncias que diminuem a sua permeabilidade, e conseqüentemente, afetam a saída de água da madeira.

Segundo Vital *et al.* (1985) a secagem natural é influenciada pelo diâmetro da madeira, sendo que, quanto maior o diâmetro, maior será o percurso a ser percorrido pelas moléculas de água, do interior até a superfície da madeira.

Rezende (2009) estudando a secagem ao ar livre de toras de *Eucalyptus*, aos 8 anos de idade, em Lavras, MG, em duas classes diamétricas verificou que após 200 dias de secagem, as toras com casca da maior classe diamétrica apresentaram umidade média de 72%, enquanto as toras da menor classe estavam na faixa de 39% de umidade, com redução total de umidade em relação à inicial de 43 e 65%, respectivamente. Para as toras sem casca, a umidade média da classe de maior diâmetro foi de 55% (redução total de umidade em relação à inicial de 75%) enquanto para a classe de menor diâmetro foi de 30% (redução de 79%).

Na Tabela 7 podem ser observados os teores de umidade obtidos referente a cada período de avaliação durante o tempo de secagem. Observa-se também a proximidade da umidade de 30% em cada condição do torete avaliada.

Tabela 7 - Valores médios de umidade observados nos períodos de avaliação durante o tempo de secagem

Parâmetros do torete			Teor de umidade (%) ao longo do período de secagem										
Classe de diâmetro	Compr. (m)	Casca	0	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70
1	0,20	0	75,2	50,5	38,1	28,6	24,6	22,6	21,4	20,0	18,5	17,1	16,6
		1	88,4	69,8	54,7	37,9	31,0	27,2	24,7	22,4	20,0	18,0	17,2
	0,40	0	76,8	54,3	44,7	36,2	32,2	29,6	27,7	25,8	23,8	22,0	21,3
		1	85,9	72,3	60,3	47,3	40,5	36,2	33,1	30,4	27,7	25,2	23,8
	0,60	0	78,6	56,8	47,1	38,9	34,7	31,5	30,0	27,8	25,6	23,5	22,7
		1	84,9	72,3	60,9	47,7	40,7	36,3	33,2	30,4	27,7	27,7	23,6
2	0,20	0	72,5	53,1	42,9	33,1	28,4	25,5	23,6	21,7	19,7	18,0	17,5
		1	81,5	66,7	53,9	40,4	34,2	30,2	27,2	24,6	22,1	19,9	18,9
	0,40	0	72,5	54,4	46,5	38,7	34,6	31,7	29,4	27,1	24,7	22,6	21,6
		1	81,9	70,4	60,1	48,3	41,8	37,6	34,5	31,7	28,8	26,3	24,7
	0,60	0	73,6	57,8	50,7	44,1	40,0	37,4	35,1	32,8	30,3	28,0	26,8
		1	81,1	72,6	64,2	54,0	48,4	44,4	41,5	38,6	35,6	32,8	31,1
3	0,20	0	75,9	61,7	52,6	42,1	36,6	32,6	29,5	26,5	23,7	21,3	20,1
		1	83,8	70,2	59,1	46,9	40,8	36,5	33,0	29,8	26,7	24,1	22,7
	0,40	0	77,5	64,1	56,9	49,8	45,7	42,8	40,3	37,7	34,9	32,5	31,0
		1	84,9	77,0	69,6	60,1	54,5	50,5	47,3	44,0	40,7	37,7	35,7
	0,60	0	78,3	66,1	58,8	52,9	48,9	46,9	44,9	42,7	39,9	37,6	36,3
		1	86,0	77,6	71,1	61,6	57,0	53,5	50,5	47,7	43,8	41,3	39,9

0 = Madeira sem casca, 1 = Madeira com casca.

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho para que o processo de secagem ocorra mais rápido, a madeira deve apresentar dentre outras características, menor diâmetro e comprimento, ausência de casca, alta permeabilidade e baixa relação cerne/alburno. A influência dos fatores inerentes ao ambiente também devem ser considerados para se obter maior eficiência do processo.

### 5.3 Carbonização da madeira

Na Tabela 8 estão apresentados os valores médios das propriedades da madeira utilizada nas carbonizações.

Tabela 8 - Valores médios das propriedades da madeira de *Eucalyptus urophylla* utilizada nas carbonizações

Carbonizações	Classe diamétrica	Diâmetro médio (cm)	Umidade (%)	Densidade básica (kg/m <sup>3</sup> )
1	1	8,77	26,28	570
2	1	8,86	35,15	561
3	2	11,14	23,26	580
4	2	11,47	26,26	582
5	3	14,78	31,93	584
6	3	13,93	45,76	586

O diâmetro médio da madeira foi de 8,82; 11,31 e 14,36 cm, respectivamente para as classes diamétricas 1, 2 e 3. Observaram-se maiores valores médios de umidade e densidade da madeira na classe de maior diâmetro.

#### 5.3.1 Parâmetros da carbonização

Na Tabela 9 estão apresentados os valores médios do tempo de carbonização da madeira de *Eucalyptus urophylla*.

Tabela 9 - Valores médios do tempo de carbonização da madeira de *Eucalyptus urophylla*, em função da classe diamétrica

Classe diamétrica	Tempo de carbonização (horas)
Classe 1 (< 10 cm)	6c
Classe 2 (10 – 13cm)	9,75b
Classe 3 (>13 cm)	13 a

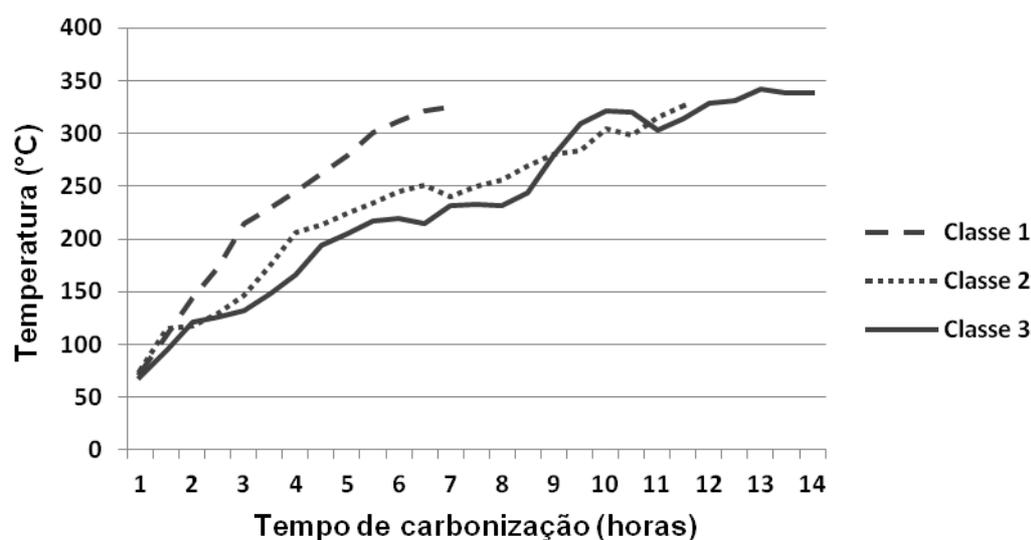
Médias na coluna seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Tukey.

A análise de variância indicou efeito significativo da classe a 95% de probabilidade, no tempo de carbonização da madeira. Os tempos médios de carbonização foram 6; 9,75 e 13 horas, respectivamente para as classes 1, 2 e 3. Observou-se um aumento do tempo de carbonização com o aumento do diâmetro da

madeira. Tal fato também foi observado por Raad *et al.* (2008) avaliando a carbonização de madeiras com diâmetros de 6, 10 e 16 cm. O autor obteve tempos de carbonização de 3,75; 6,31 e 16,15 horas, respectivamente para as classes diamétricas de 6, 10 e 16 cm.

A permeabilidade na direção radial chega a ser  $10^6$  vezes inferior à permeabilidade na direção longitudinal da madeira, com isso os gases gerados durante a carbonização seguem preferencialmente os canais longitudinais, e conseqüentemente retardam a elevação da temperatura no interior da peça de madeira, aumentando o tempo de carbonização. Além disso, a madeira de maior classe diamétrica apresentou maior densidade básica (Tabela 8), normalmente madeiras de maior densidade produzem maior massa de carvão vegetal, no entanto, requerem maior tempo de carbonização devido aos efeitos de transferência de massa e calor (RAAD, 2004).

A temperatura final de carbonização para as três classes ficaram próximas a 350 °C. Na Figura 9 observa-se a variação média da temperatura em função do tempo de carbonização. Cada linha, no gráfico, corresponde a média dos valores de temperatura observados durante duas carbonizações para cada classe diamétrica.



**Figura 9** – Variação da temperatura em função do tempo de carbonização.

### 5.3.2 Rendimento gravimétrico em carvão vegetal

Para o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGCV) a análise de variância indicou que não houve efeito significativo do diâmetro a 95% de probabilidade. O valor médio foi de 28,49 %. No entanto, observou-se uma tendência de

aumento do rendimento gravimétrico em função do aumento da classe diamétrica, conforme observado na Tabela 9.

Tabela 10 - Valores médios de rendimento gravimétrico em carvão vegetal da madeira de *Eucalyptus urophylla*, em função da classe diamétrica

<b>Classe diamétrica</b>	<b>RGCV (%)</b>
<b>Classe 1 (&lt; 10 cm)</b>	26,95
<b>Classe 2 (10 – 13 cm)</b>	27,37
<b>Classe 3 (&gt;13 cm)</b>	31,16

O aumento do rendimento gravimétrico em carvão vegetal provavelmente ocorreu em função do arranjo da madeira dentro do container e da densidade básica. As madeiras de maiores diâmetros permitem uma melhor distribuição e ocupação do espaço no interior do container, evitando-se a presença excessiva de espaços vazios, obtendo-se um melhor controle da carbonização, conforme pode ser visto na Figura 9, na qual as madeiras de menor classe diamétrica apresentaram uma taxa de aquecimento maior. Além disso, madeiras de maior densidade tendem a gerar maior massa de carvão, o que conseqüentemente, contribui para um maior rendimento gravimétrico.

Utilizando-se o sistema de carbonização semelhante ao deste trabalho, Barcelos (2002), obteve rendimento gravimétrico em carvão vegetal na faixa de 32,29 %, avaliando a carbonização da madeira de *Eucalyptus* sp.. O valor médio de 28,7 % de rendimento gravimétrico foi encontrado por Cardoso (2010) carbonizando madeira de *Eucalyptus* sp. no forno MF1-UFV.

### 5.3.3 Propriedades físicas, químicas e friabilidade do carvão vegetal

Na Tabela 11 estão apresentados os valores médios das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em função da classe de diâmetro.

Tabela 11 - Valores médios das propriedades físicas, químicas e de friabilidade do carvão vegetal da madeira de *Eucalyptus urophylla*, em função da classe diamétrica

Classe diamétrica	Densidade Aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Densidade Granel (kg/m <sup>3</sup> )	Umidade (%)	CZ (%)	MV (%)	CF (%)	Friabilidade (%)
Classe 1(> 10 cm)	350,93c	170,38a	3,08b	1,11a	17,62a	81,27a	16,62b
Classe 2 (10 – 13 cm)	450,80b	193,50a	3,94b	0,8ab	17,11a	82,09a	18,17b
Classe 3 (>13 cm)	514,25a	196,25a	5,31a	0,44b	19,58a	79,99a	25,83a

Médias na coluna seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 95% de probabilidade, pelo teste Tukey.

De acordo com a análise de variância houve efeito significativo do diâmetro, a 95% de probabilidade, apenas para as propriedades densidade aparente, umidade, cinzas e friabilidade do carvão vegetal.

Observa-se que houve um aumento significativo na densidade aparente dos carvões com aumento do diâmetro. Possivelmente essa variação ocorreu devido a diferença da densidade básica das madeiras em cada classe diamétrica, conforme pode ser observado na Tabela 3, onde se verifica um decréscimo da densidade da madeira no sentido longitudinal. Segundo Santos (2010), durante a carbonização da madeira, devido à degradação térmica de seus principais componentes, perde-se em média 65% de massa. Logo, quanto maior for a densidade da madeira, haverá mais massa de madeira, e conseqüentemente, maior será a massa restante presente no carvão vegetal. Oliveira (2012) observou valores de densidade aparente do carvão vegetal de 312 kg/m<sup>3</sup>, carbonizando madeira de *Eucalyptus* spp. com densidade básica de 420 kg/m<sup>3</sup> e Cardoso (2010) obteve valores médios de 441 kg/m<sup>3</sup>, utilizando madeira de *Eucalyptus* sp. com densidade básica igual a 570 kg/m<sup>3</sup>.

Verificou-se que a densidade a granel não foi influenciada pelo diâmetro da madeira, apresentando um valor médio de 186,71 kg/m<sup>3</sup>. Oliveira (2012) encontrou um valor de densidade a granel de 181 kg/m<sup>3</sup>, valor similar ao encontrado neste trabalho. Barcellos (2002) analisando o desempenho da carbonização em um forno semi-contínuo tipo container, encontrou valores de 165 kg/m<sup>3</sup> para densidade a granel.

Quanto a umidade do carvão, observa-se que a classe de diâmetro 3 obteve de forma significativa o maior teor de umidade. Não houve diferenças significativas nos demais diâmetros. Segundo Santos (2008), de modo geral, o teor de umidade do carvão situa-se entre 2 e 8 %, portanto, os valores encontrados neste trabalho enquadram-se nessa faixa de variação. Teores de umidade semelhantes, também foram encontrados por Frederico (2009), Oliveira (2012) e Cardoso (2010).

O maior teor de cinzas foi obtido para o carvão vegetal da classe de diâmetro 1. Vale ressaltar que a madeira utilizada na classe 1, foi proveniente da parte superior do tronco da árvore. Sabe-se que nessa região há presença de lenho juvenil, aquele formado próximo do meristema primário da copa. A madeira juvenil, de uma forma geral, apresenta menor porcentagem de lenho tardio e maior porcentagem de lenho inicial, dentre outras características. Kaka e Goring (1983), citados por Andrade (1989), detectaram que o conteúdo de minerais no lenho inicial é maior do que aquele encontrado no lenho tardio, em razão da primeira região ser uma área de intensa atividade fisiológica. Sendo assim, provavelmente, os maiores valores de teor de cinzas da classe 1 justificam-se em função da maior porcentagem de lenho inicial nas porções superiores do tronco.

Os teores médios de materiais voláteis e carbono fixo foram 18,10 e 81,11 %, respectivamente. Valores semelhantes foram observados por Oliveira (2012), que encontrou teores de 17,07 %, para materiais voláteis e 81,93% para carbono fixo. Frederico (2009) avaliando 5 clones de *Eucalyptus* encontrou teores de materiais voláteis variando de 15,01 a 19,15 %, e teores de carbono fixo variando na faixa de 80,13 a 82,79%.

A friabilidade do carvão vegetal foi afetada pelo diâmetro da madeira conforme pode ser observado na Tabela 11. Observa-se que o carvão vegetal proveniente da classe 3 foi significativamente mais friável que os demais. Para as classes 1 e 2 não se observou diferenças significativas entre eles. Porém, de modo geral, houve um aumento da friabilidade do carvão com o aumento do diâmetro da madeira.

Madeiras de maiores diâmetros possuem maiores área de cerne, essa região está mais propícia à formação de trincas e fissuras durante a carbonização, ocasionando maior geração de finos. Segundo Tarkov (1978), citado por Mendes *et al.* (1982) as trincas e fissuras internas do carvão constituem zonas de concentração de tensão, a formação dessas zonas podem ser atribuídas a baixa permeabilidade da região central

(cerne) da madeira. Para Coutinho e Ferraz (1988) a variação da densidade no sentido medula-casca combinada com o aumento da área de cerne são responsáveis pela formação de tensões internas durante o processo de perda de umidade influenciando, conseqüentemente, na geração de finos no carvão vegetal.

De acordo com a classificação do Centro Tecnológico de Minas Gerais (Cetec) para carvão vegetal, citado por Oliveira *et al.* (1982), a friabilidade encontrada para o carvão, proveniente da madeira da classe de diâmetro 3, apresentou uma friabilidade média de 25,83 %, sendo classificada como bastante friável. Já na classe 1 e 2 observou-se uma friabilidade de 16,62 e 18, 17 %, respectivamente, sendo classificadas como medianamente friáveis.

Coutinho e Ferraz (1988) avaliando a friabilidade do carvão vegetal em função do diâmetro das árvores e temperatura de carbonização observaram um aumento na friabilidade em função do aumento do diâmetro e da temperatura.

Vale ressaltar que o teor de umidade da madeira também pode influenciar na friabilidade do carvão, uma vez que, normalmente altos teores de umidade estão associados a altas velocidades de expansão de gases durante a carbonização, o que provoca rupturas generalizadas na estrutura do carvão resultante, e conseqüentemente, causa um aumento na sua friabilidade (CARDOSO, 2010).

## 6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho permitem concluir que:

- A posição longitudinal, no sentido base-topo, afetou a densidade básica, relação CA, retração tangencial e o coeficiente anisotrópico, sendo que essas propriedades apresentaram uma tendência decrescente ao longo do sentido base-topo.
- A posição radial afetou a densidade básica e a estrutura anatômica da madeira (vasos e fibras). Os parâmetros relacionados aos vasos e as fibras são variáveis, e apresentam-se crescentes quanto a posição radial, no sentido medula-casca, exceto para frequência de vasos e diâmetro do lume das fibras.
- A separação da madeira por classe de diâmetro para secagem é uma prática que torna a este processo mais rápido e eficiente.
- Madeiras de menor diâmetro, associadas a menor comprimento e a ausência de casca atingem a umidade de 30% mais rapidamente que as demais.
- Madeiras de maior diâmetro necessitam de uma carbonização mais lenta, pois a velocidade de saída dos gases que geram pressão interna na madeira produzem carvão com maior friabilidade. Em madeiras de menores diâmetros é necessário um maior controle da carbonização.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6922**: Carvão vegetal: determinação da massa específica (densidade a granel). Rio de Janeiro, 1981. 2 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8633**: Carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8112**: Carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1986. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira, Rio de Janeiro, 1997. 107 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 11941**: Madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF. 2011. **Anuário estatístico da ABRAF: ano base 2010**. Brasília, 2011. 130p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF. 2012. **Anuário estatístico 2012 : ano base 2011**. Brasília, 2012. 149p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **Standard methods of evaluating properties of wood-base fiber and particles materials**. Philadelphia: 1982.
- ANDRADE, E. N. **O eucalipto**. 2. ed. Jundiaí: Cia. Paulista de Estradas de Ferro, 1961. 667 p.
- ANDRADE, A. M. **Influência da casca de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden no rendimento e qualidade do carvão vegetal**. 1989. 86 f. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 1989.
- ARAÚJO, S. O. **Propriedades de Madeiras Termorretrificadas**. 2010. 93 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.
- 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.
- BARCELLOS, D.C. **Forno container para produção de carvão vegetal: desempenho, perfil térmico e controle da poluição**. 2002. 72 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2002.
- BARROS, M. V. **Fator de cubicação para madeira empilhada de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, com toretes de dois comprimentos, e sua variação com**

**o tempo de exposição ao ambiente.** 2006. 92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2006.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção.** 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1985. 705 p.

BOLAND, D. J. BROOKER, M. I. H. CHIPPENDALE, G. M. HALL, N. HYLAND, B. P. M. JOHNSTON, R. D. KLEINIG, D. A. TURNER, J. D. **Forest trees of Australia.** Melbourne: CSIRO, 1994. 687 p.

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

CARDOSO, M. T. **Desempenho de um sistema de forno-fornalha para combustão de gases na carbonização de madeira.** 2010. 77p. Dissertação (Mestrado em ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.

CASTRO, A. F. N. M. **Efeito da idade e de materiais genéticos de *Eucalyptus* sp. na madeira e carvão vegetal.** 2011. 97p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. 1982. **Produção e Utilização de Carvão Vegetal.** Séries Técnicas CETEC, Belo Horizonte, 393p.

COPPEN, J. J. W. **Eucalyptus: the genus eucalyptus.** London: Taylor and Francis, 2002. 450 p.

COSTA, A. Coletâneas de anatomia da madeira. 42 p. 2001.

COUTINHO, A. R.; FERRAZ, E. S. B. Determinação da friabilidade do carvão vegetal em função do diâmetro das árvores e temperatura de carbonização. **IPEF**, n.38, p.33-37, 1988.

DADSWELL, H. E. The anatomy of eucalypt wood. Melbourne. **Forest Products Laboratory**, CSIRO, n. 66, p. 1-28. 1972.

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.

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. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 273-284, 2010.

FERREIRA, L. H. C. **Desenvolvimento de uma retorta metálica para carbonização de madeira.** 1988.47p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1988.

FOELKEL, C.E.B. BARRICHELO, L.E.G. MILANEZ, A.F. Estudo comparativo das madeiras de *E. saligna*, *E. paniculata*, *E. citriodora*, *E. maculata* e *E. tereticornis* para produção de celulose sulfato. **IPEF**, Piracicaba, n.10, p.17-37, 1975.

FREDERICO, P. G. U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**. 2009. 73p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

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

GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel, 1988. 111 p.

GARBE, E. A. **Gradiente de umidade e tensões na madeira**: relação água- madeira. Curitiba: UFPR, 2008. 15 p.

GOLDSCHIMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K. V. LUDWIG, C. H. **Lignins**: occurrence, formation, structure and reactions. New York: J. Wiley, 1971. p. 241-266.

GOMIDE, J. L. DEMUNER, B. J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. **O Papel**, São Paulo, v. 47, n. 8, p. 36-38, 1986.

GOULART, M. HASELEIN, C. R. HOPPE, J. M. FARIAS, J. A. PAULESKI, D. T. Massa específica básica e massa seca de madeira de *Eucalyptus grandis* sob o efeito do espaçamento de plantio e da posição axial no tronco. **Ciência Florestal**, Santa Maria, Rio Grande do Sul, v. 13, n. 2, p. 167-175, 2003.

HART, C. A. **The drying of wood**. Raleigh: North Carolina Agriculture Extension Service, 1966. 24 p.

HASELEIN, C. R. LOPES, M. C. SANTINI, E. J. LONGHI, S. J. ROSSO, S. FERNANDES, D. L. G. MENEZES, L. F. Características tecnológicas da madeira de árvores matrizes de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, Rio Grande do Sul, v. 14, n. 2, p. 145-155, 2004.

JANKOWSKY, I. P. **Fundamentos de secagem de madeiras**. Piracicaba: ESALQ, 1990. 13 p.

JANKOWSKY, I. P. SANTOS, G. R. V. ANDRADE, A. Secagem de madeira serrada de eucalipto. **Circular Técnica do IPEF**, n. 199. 2003.

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

KOLLMAN, F. F. P. CÔTÉ, W. A. **Principles of wood sciences and technology**. Berlin, SpringerVerlag, 1968.v.1.

LIMA, W. P. **Impacto ambiental do eucalipto**. São Paulo: USP, 1993. 302 p.

LOPES, C. S. D. NOLASCO, A. M. TOMAZELLO FILHO, M. DIAS, C. T. S. PANSINI, A. Estudo da massa específica básica e da variação dimensional da madeira de três espécies de eucalipto para a indústria moveleira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Ciência Florestal, Santa Maria, v. 21, n. 2, p. 315-322, 2011.

LOVATTI, L. P. **Madeira serrada na Região Sul do Espírito Santo: Comercialização e propriedades**. 2008. 119 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. 2008.

MARQUES, M. H. B. **Agrupamento de 41 espécies de madeiras da Amazônia para secagem baseado em características anatômicas e físicas**. 2008. 122p. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2008.

MELLADO, E. C. E. R. **Modelo de transferência de calor e massa na secagem de madeira serrada de *Pinus***. 2007. 155p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2007.

MENDES, M. G. GOMES, P. A. OLIVEIRA, J. B. **Propriedades e controle da qualidade do carvão vegetal**. Produção e utilização de carvão vegetal. Belo Horizonte, Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC, p. 77- 89, 1982.

MOREIRA, W. S. **Relações entre propriedades físico-mecânicas e características anatômicas e químicas da madeira**. 1999. 107 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1999.

OLIVEIRA, A. C. **Sistema forno-fornalha para produção de carvão vegetal**. 2012. 64 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.

OLIVEIRA, J. B. de. VIVACQUA FILHO, A. GOMES, P.A. Produção de Carvão Vegetal - aspectos técnicos. In: PENEDO, W. R. *et al.* Eds. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. p.60-73.

OLIVEIRA, J. T. S. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil**. 1997. 429p. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1997.

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

OLIVEIRA, J. T. S. HELLMEISTER, J. C. TOMAZELLO FILHO, M. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, Minas Gerais, v.29, n.1, p.115-127, 2005.

PEREIRA, B. L. C. **Qualidade da madeira de *eucalyptus* para a produção de carvão vegetal**. 2012. 93p. Dissertação (Mestrado em ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.

PONCE, R. H. WATAI, L. T. **Manual de secagem da madeira**. Brasília: STI/IPT, 1985. 72 p.

POUBEL, D. S. GARCIA, R. A. LATORRACA, J. V. F. CARVALHO, A. M. Estrutura anatômica e propriedades físicas da madeira de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, Rio de Janeiro, v. 18, n. 2, p. 117-126, 2011.

RAAD, T. J. **Simulação do processo de secagem e carbonização do *Eucalyptus* spp.** 2004. 115p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG. 2004.

RAAD, T. J. COSTA, L. C. WINTER, M. Pesquisa e desenvolvimento na produção de carvão vegetal. In: I Fórum Nacional sobre Carvão Vegetal. Belo Horizonte, MG, 2008.

REGAZZI, A. J. Teste para identificar a identidade de modelos de regressão e igualdade de alguns parâmetros num modelo polinomial ortogonal. **Revista Ceres**, v. 40, n. 228, p. 176-195, 1993.

REZENDE, M. E. **Produção de carvão vegetal – importância do conhecimento fundamental**. 2006. Belo Horizonte - MG. 2006.

REZENDE, R. N. **Secagem de toras de clones de *Eucalyptus* empregados na produção de carvão**. 2009. 178p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2009.

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

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. **Revista Instituto Florestal**, São Paulo, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 43-55, 2004.

ROCHA, M. F. V. **Influência do espaçamento e da idade na produtividade e propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* para energia**. 2011. 84p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

ROSSO, S. **Qualidade da madeira de três espécies de *Eucalyptus* resultante da combinação dos métodos de secagem ao ar livre e convencional**. 2006. 91p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2006.

SAEG – **Sistema para Análises Estatísticas**, Versão 9.1: Fundação Arthur Bernardes. Viçosa: UFV, 2007. p. 301.

SANTINI, E. J. Métodos usuais de secagem da madeira. In: Seminário sobre secagem da madeira, 1., 1992, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UFSM, 1992. p. 47-59.

- SANTOS, G. R. V. dos. **Otimização da secagem da madeira de *Eucalyptus grandis* (Hill ex Maiden)**. 2002. 70p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP, 2002.
- SANTOS, M. A. S. Parâmetros de qualidade do carvão vegetal para uso em alto-forno. In: FÓRUM NACIONAL SOBRE CARVÃO VEGETAL, 1., 2008, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: UFMG, 2008.
- SANTOS, P. E. T. GARCIA, J. N. GERALDI, I. O. Posição da tora na árvore e sua relação com a qualidade da madeira serrada de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, São Paulo, n. 66, p. 142-151, 2004.
- SANTOS, R. C. dos. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto**. 2010. 122 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. 2010.
- SANTOS, R. C. CARNEIRO, A.C. O. CASTRO, A. F. M. CASTRO, R. V. O. BIANCHE, J. J. CARDOSO, M. T. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, São Paulo, v. 39, n. 90, p. 221-230, 2011.
- SEIXAS, F. BAUCH, S. C. OLIVEIRA JUNIOR, E. D. Balanço energético e econômico de duas alternativas de descascamento de madeira de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, São Paulo, n. 67, p. 37- 43, 2005.
- SIAU, J. F. **Flow in wood**. Syracuse: Syracuse University Press, 1971. 131 p. **Transport processes in wood**. New York: Springer Wood Science 1984. 245 p.
- SILVA, J. C. **Anatomia da Madeira e suas Implicações Tecnológicas**. Viçosa, MG. 2008.
- 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.
- SILVA, J. R. M. **Relações da usinabilidade e aderência do verniz com propriedades fundamentais do *Eucalyptus grandis* HILL Ex. Maiden**. 2002. 204 f. Tese no Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2002.
- SKAAR, C. J. **Water in wood**. Syracuse: Syracuse University, 1972. 218 p.
- SOUSA JÚNIOR, W. P. **Propriedades físicas, mecânicas e anatômicas das madeiras de *Eucalyptus cloeziana* e de *Eucalyptus urophylla* oriundas dos municípios de turmalina e de Paraopeba (MG)**. 2004. 64 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2004.
- STEIN, F. R. **Avaliação técnica do tempo de estocagem da madeira**. 2003. 36p. Monografia (Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T 204 om-88: solvent extractives of wood and pulp**. In: TAPPI Standard Method. Atlanta, USA. Cd-Rom, 2001.

TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T 264 om-88: preparation of wood for chemical analysis**. In: TAPPI Standard Method. Atlanta, USA. Cd-Rom, 2001.

TRUGILHO, P. F. **Carbonização da madeira e controle de qualidade do carvão vegetal**. Lavras: UFLA, 2006. 41 p.

VALE, A. T. GENTIL, L. V. Produção e uso energético de biomassa e resíduos agroflorestais. In: OLIVEIRA, J. T. S; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. (Ed.). **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro III**. Jerônimo Monteiro-ES: 2008. p. 196-246.

VALE, A. T. ROCHA, L. R. DEL MENEZZI, C. H. S. Massa específica básica da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* cultivado em cerrado. **Scientia Forestalis**, v.37, n.84, p.387-394, 2009.

VALENTE, A. F. LELLES, J. G. Carbonização da madeira de Eucalyptus. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 12, n. 141, p. 74-79, set. 1986.

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.

VITAL, B. R.; TRUGILHO, P. F. Variação dimensional e uso da madeira de Eucalyptus. In: **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 18, n. 186, p. 57-61. 1997.

ANEXO 1 – Resumo das Análises de Variância (ANOVA)

Tabela 1A – Resumo das análises de variância (ANOVA) da relação C/A e da densidade básica da madeira no sentido base-topo

Fonte de variação	G.L	Quadrado Médio	
		C/A	Dens.
<b>Posição</b>	4	1,463960*	0,26E-02*
<b>Resíduo</b>	25	0,319E-01	0,22E-03
<b>Total</b>	29	-	-
<b>CV (%)</b>		24,887	2,536
<b>D.P.</b>		0,479	0,023

\* Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F ; <sup>ns</sup> Não significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F ; G.L.= Graus de Liberdade; C/A= Relação Cerne/Alburno; Dens. = Densidade básica em g/cm<sup>3</sup>; CV= Coeficiente de Variação, em %; D.P.= Desvio Padrão.

Tabela 2A – Resumo das análises de variância (ANOVA) da retração tangencial, radial volumétrica e coeficiente anisotrópico da madeira no sentido base-topo

Fonte de variação	G.L	Quadrado médio			
		Retrat. Tang.	Retrat. Rad.	Retrat. Vol.	Coef. Anis.
<b>Posição</b>	4	6,96*	1,19 <sup>ns</sup>	20,21 <sup>ns</sup>	0,507E-01*
<b>Resíduo</b>	25	1,98	0,84	8,83	0,163E-02
<b>Total</b>	29	-	-	-	-
<b>CV (%)</b>		13,484	12,871	16,730	3,098
<b>D.P.</b>		1,524	0,944	3,226	0,091

\* Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F ; <sup>ns</sup> Não significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F ; G.L.= Graus de Liberdade; Retrat. Tang. = Retratibilidade Tangencial, em %; Retrat. Rad. = Retratibilidade Radial, em %; Retrat. Vol. = Retratibilidade Volumétrica, em %; Coef. Anis. = Coeficiente Anisotrópico; CV= Coeficiente de Variação, em %; D.P.= Desvio Padrão.

Tabela 3A – Resumo das análises de variância (ANOVA) da análise morfológica de poros da madeira do sentido medula-casca

Fonte de variação	G.L	Quadrado Médio	
		Ø Poros	Freq. Poros
<b>Posição</b>	2	216,03*	0,285 <sup>ns</sup>
<b>Resíduo</b>	3	7,85	0,210
<b>Total</b>	5	-	-
<b>CV (%)</b>		2,885	3,981
<b>D.P.</b>		9,546	0,490

\* Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F ; <sup>ns</sup> Não significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F ; G.L.= Graus de Liberdade; Ø Poros= Diâmetro dos poros, em µm; Freq. Poros= Frequência de poros, em poros.mm<sup>-2</sup>; CV= Coeficiente de Variação, em %; D.P.= Desvio Padrão.

Tabela 4A – Resumo das análises de variância (ANOVA) da análise morfológica das fibras da madeira no sentido medula-casca

Fonte de Variação	G.L.	Quadrado Médio				
		Compr.	Ø Fibras	DL	EP	FP
<b>Posição</b>	2	0,255E-01*	5,558*	0,458 <sup>ns</sup>	1,336*	25,239 <sup>ns</sup>
<b>Resíduo</b>	15	0,358E-02	1,501	0,812	0,151	8,470
<b>Total</b>	17	-	-	-	-	-
<b>CV(%)</b>		5,692	5,817	10,851	6,097	
<b>D.P.</b>		0,077	1,408	0,877	0,539	3,231

\* Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F ; <sup>ns</sup> Não significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F ; G.L.= Graus de Liberdade; Compr.= Comprimento das fibras, em mm; Ø Fibras= Diâmetro das fibras, em µm; DL=Diâmetro do Lume, em µm; EP= Espessura da Parede Celular, em µm; FP= Fração Parede, em µm; CV= Coeficiente de Variação, em %; D.P.= Desvio Padrão.

Tabela 5A – Resumo das análises de variância (ANOVA) do rendimento gravimétrico em carvão vegetal, em função da classe diamétrica

Fonte de variação	GL	Quadrado Médio	
		RGCV	Tempo Carb.
<b>Classe diamétrica</b>	2	10,720 <sup>ns</sup>	551,04*
<b>Resíduo</b>	3	12,111	24,54
<b>Total</b>	5	-	-
<b>CV (%)</b>		12,214	33,066
<b>D.P.</b>		3,399	3,168

\* Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F ; <sup>ns</sup> Não significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F ; G.L.= Graus de Liberdade; RGCV=Rendimento Gravimétrico em Carvão Vegetal, em %; Tempo Carb.=Tempo de Carbonização, em horas; CV= Coeficiente de Variação, em %; D.P.= Desvio Padrão.

Tabela 6A – Resumo das análises de variância (ANOVA) das propriedades físicas e mecânicas do carvão, em função da classe diamétrica

Fonte de variação	G.L.	Quadrado Médio				
		DG	DA	U	PCS	Friab.
<b>Classe diamétrica</b>	2	583,632 <sup>ns</sup>	13556,57*	2,530*	103244,8 <sup>ns</sup>	48,558*
<b>Resíduo</b>	3	73,805	177,833	0,888E-01	24109,46	2,372
<b>Total</b>	5	-	-	-	-	-
<b>CV (%)</b>		4,643	3,040	7,244	2,040	7,622
<b>D.P.</b>		16,665	74,359	1,032	236,14	4,565

\* Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F ; <sup>ns</sup> Não significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F ; G.L.= Graus de Liberdade; DG=Densidade a Granel, em kg/m<sup>3</sup>; DA=Densidade Aparente, em kg/m<sup>3</sup>; U=umidade, em %; PCS=Poder Calorífico Superior, em kcal/kg; Friab.=Friabilidade do carvão, em %; CV= Coeficiente de Variação, em %; D.P.= Desvio Padrão.

Tabela 7A – Resumo das análises de variância (ANOVA) das propriedades químicas do carvão vegetal, em função da classe diamétrica

Fonte de variação	GL	Quadrado Médio		
		MV	CZ	CF
<b>Classe diamétrica</b>	2	3,379 <sup>ns</sup>	0,230*	2,232 <sup>ns</sup>
<b>Resíduo</b>	3	4,213	0,169E-01	3,804
<b>Total</b>	5	-	-	-
<b>CV(%)</b>		11,339	16,602	2,405
<b>D.P</b>		1,969	0,319	1,781

\* Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F ; <sup>ns</sup> Não significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F ; G.L.= Graus de Liberdade; MV= Materiais Voláteis, em %; CZ= Cinzas, em %; CF= Carbono Fixo, em %; CV= Coeficiente de Variação, em %; D.P.= Desvio Padrão.

ANEXO 2 – Resumo dos valores estimados dos parâmetros e os respectivos  
coeficientes de determinação

Tabela 1B - Valores estimados dos parâmetros b0, b1 e b2, com o respectivo coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) para as equações estimadas, relacionando o efeito da presença ou ausência de casca com os fatores classe de diâmetro e comprimento da madeira

<b>Classe</b>	<b>Comprimento (m)</b>	<b>Casca</b>	<b>b0</b>	<b>b1</b>	<b>b2</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Classe 1 (<10 cm)	0,6	1*	83,84	-1,882	0,015	0,99
		0**	71,90	-1,709	0,015	0,95
	0,4	1*	84,25	-1,912	0,015	0,99
		0**	68,80	-1,733	0,015	0,95
	0,2	1*	85,17	-2,415	0,021	0,98
		0**	67,13	-1,977	0,018	0,94
Classe 2 (10 – 13 cm)	0,6	1*	80,81	-1,370	0,009	0,99
		0**	69,11	-1,287	0,010	0,97
	0,4	1*	80,88	-1,686	0,013	0,99
		0**	67,13	-1,473	0,012	0,97
	0,2	1*	79,29	-1,997	0,016	0,99
		0**	67,26	-1,768	0,015	0,97
Classe 3 (>13 cm)	0,6	1*	85,34	-1,184	0,007	0,99
		0**	74,89	-1,115	0,008	0,98
	0,4	1*	84,73	-1,254	0,008	0,99
		0**	74,11	-1,238	0,009	0,98
	0,2	1*	81,91	-1,794	0,014	0,99
		0**	73,35	-1,614	0,012	0,99

1\* = Madeira com casca; 0\*\* = Madeira sem casca.

Tabela 2B - Valores estimados dos parâmetros  $b_0$ ,  $b_1$  e  $b_2$ , com o respectivo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para as equações estimadas, relacionando o efeito do comprimento da madeira com os fatores classe de diâmetro e presença ou ausência de casca

<b>Classe</b>	<b>Casca</b>	<b>Comprimento (m)</b>	<b><math>b_0</math></b>	<b><math>b_1</math></b>	<b><math>b_2</math></b>	<b><math>R^2</math></b>
Classe 1 (<10 cm)	1*	0,6	83,84	-1,882	0,015	0,99
		0,4	82,57	-1,799	0,014	0,99
		0,2	82,23	-2,206	0,019	0,98
	0**	0,6	70,51	-1,498	0,012	0,94
		0,4	68,83	-1,644	0,014	0,96
		0,2	67,2	-1,873	0,017	0,95
Classe 2 (10 – 13 cm)	1*	0,6	80,81	-1,370	0,009	0,99
		0,4	82,57	-1,799	0,014	0,99
		0,2	82,23	-2,206	0,019	0,98
	0**	0,6	70,51	-1,498	0,012	0,94
		0,4	68,83	-1,644	0,014	0,96
		0,2	67,2	-1,873	0,017	0,95
Classe 3 (>13 cm)	1*	0,6	85,34	-1,184	0,007	0,99
		0,4	84,73	-1,254	0,008	0,99
		0,2	81,91	-1,794	0,014	0,99
	0**	0,6	74,89	-1,115	0,008	0,98
		0,4	74,11	-1,238	0,009	0,98
		0,2	73,35	-1,614	0,012	0,99

1\* = Madeira com casca; 0\*\* = Madeira sem casca.

Tabela 3B - Valores estimados dos parâmetros b0, b1 e b2, com o respectivo coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) para as equações estimadas, relacionando o efeito da classe de diâmetro da madeira com a presença ou ausência de casca e o comprimento

<b>Casca</b>	<b>Comprimento (m)</b>	<b>Classe</b>	<b>b0</b>	<b>b1</b>	<b>b2</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
1*	0,6	1 (<10 cm)	84,05	-1,897	0,015	0,99
		2 (10-13 cm)	80,81	-1,370	0,009	0,99
		3 (>13 cm)	85,34	-1,184	0,007	0,99
0**	0,6	1 (<10 cm)	70,85	-1,721	0,015	0,95
		2 (10 - 13 cm)	69,11	-1,287	0,010	0,97
		3 (>13 cm)	74,89	-1,115	0,008	0,98
1*	0,4	1 (<10 cm)	84,05	-1,897	0,015	0,99
		2 (10 - 13 cm)	80,88	-1,686	0,013	0,99
		3 (>13 cm)	84,73	-1,254	0,008	0,99
0**	0,4	1 (<10 cm)	70,85	-1,721	0,015	0,95
		2 (10-13 cm)	67,31	-1,473	0,012	0,97
		3 (>13 cm)	74,11	-1,238	0,009	0,98
1*	0,2	1 (<10 cm)	85,17	-2,415	0,021	0,98
		2 (10 - 13 cm)	79,29	-1,997	0,016	0,99
		3 (>13 cm)	81,91	-1,794	0,014	0,99
0**	0,2	1 (<10 cm)	67,13	-1,977	0,018	0,94
		2 (10 - 13 cm)	67,26	-1,768	0,015	0,97
		3 (>13 cm)	73,35	-1,614	0,012	0,99

1\* = Madeira com casca; 0\*\* = Madeira sem casca.