

**VARIAÇÃO NAS CARACTERÍSTICAS DA
MADEIRA E DO CARVÃO DE UM CLONE DE
Eucalyptus grandis W. Hill ex Maiden x
Eucalyptus urophylla S. T. Blake**

MARINA DONÁRIA CHAVES ARANTES

2009

MARINA DONÁRIA CHAVES ARANTES

**VARIAÇÃO NAS CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA E DO
CARVÃO DE UM CLONE DE *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x
Eucalyptus urophylla S. T. Blake**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Processamento e Utilização da Madeira, para a obtenção do título de “Doutor”.

Orientador
Prof. Paulo Fernando Trugilho

LAVRAS
MINAS GERAIS –BRASIL
2009

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Arantes, Marina Donária Chaves.

Variação nas características da madeira e do carvão de um clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake / Marina Donária Chaves Arantes. – Lavras: UFLA, 2009.
137 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2009.

Orientador: Paulo Fernando Trugilho.

Bibliografia.

1. Eucalipto. 2. Carvão vegetal. 3. Raios X. 4. Anatomia do carvão. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 674.1
674.144

MARINA DONÁRIA CHAVES ARANTES

**VARIAÇÃO NAS CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA E DO CARVÃO
DE UM CLONE DE *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus*
urophylla S. T. Blake**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Processamento e Utilização da Madeira, para a obtenção do título de “Doutor”.

APROVADA em 22 de dezembro de 2009

Profa. Angélica de Cássia Oliveira Carneiro	UFV
Prof. Eduardo Alves	UFLA
Prof. José Tarcísio Lima	UFLA
Prof. Mário César Guerreiro	UFLA

Prof. Paulo Fernando Trugilho
UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS –BRASIL

AGRADECIMENTOS

A Deus, por abençoar e iluminar o meu caminho e também pelas pessoas que encontrei durante toda essa jornada.

A meus pais, Lázaro e Marli, pelo carinho, amor e por tudo o que fizeram para que eu realizasse todas as conquistas em minha vida.

Ao meu esposo, pelo amor, carinho, apoio, companheirismo e desprendimento nesse momento de nossas vidas.

A meus irmãos, Mário, Marcos, Márcio, “cucus” Camila e Amanda, pelo carinho e por saber que sempre posso contar com vocês.

À fofura de minha afilhada que nem chegou, mas já nos dá muitas alegrias.

A Violante e Hugo, pelo carinho e amizade.

À CAPES, pela concessão da bolsa e pelo financiamento do projeto.

Ao grupo ArcelorMittal Florestas por ter cedido o material para esta pesquisa.

Ao meu orientador, Paulo Fernando Trugilho, pela orientação, conhecimentos transmitidos e conselhos que sempre serão lembrados.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, pelos ensinamentos transmitidos.

Ao professor Mário Tomazello e a todos do Laboratório de Identificação e Anatomia da Madeira do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP, pelo auxílio na realização das análises.

Ao professor Eduardo Alves e a todos do Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Ultraestrutural (LME) do DFP/UFLA, pela ajuda na realização das análises.

Ao professor Mário Guerreiro, pela ajuda na realização de análises na Central de Análises no DQI/UFLA.

A todos do Laboratório de Tecnologia da Madeira do CCA/UFES, pelo apoio na realização das análises.

Aos membros da banca, pela ajuda e sugestões.

Aos colegas do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, pelo apoio para a conclusão deste trabalho.

A Luana, pela amizade, carinho e convivência que sempre será lembrada.

A Selma, pela amizade, carinho, ajuda no decorrer do trabalho e por sempre fazer os dias mais alegres e divertidos.

Ao Edy e Renato, pela amizade, carinho e por vários tribatidos no final de tarde.

A amiga Elzimar e a Babi, pela amizade e acolhida.

A Ana, Marcos e Humberto, pela amizade e carinho.

A Chiquinha, pelo carinho, amizade e atenção.

A todos os colegas de curso cuja convivência tornou melhor a realização deste trabalho.

A todos os meus amigos (são tantos ...) e pessoas aqui não citados que fazem parte de minha vida e colaboraram para a realização deste trabalho (muitas pessoas...), o meu muito obrigado.

SUMÁRIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT	iii
CAPÍTULO 1.....	1
1 Introdução geral	1
2 Referencial teórico.....	4
3 Referências bibliográficas.....	7
CAPÍTULO 2: Variação nas características da madeira de um clone de <i>Eucalyptus grandis</i> W. Hill ex Maiden x <i>Eucalyptus urophylla</i> S. T. Blake	9
1 Resumo	9
2 Abstract.....	10
3 Introdução	11
4 Referencial teórico.....	13
4.1 <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Eucalyptus urophylla</i>	13
4.2 Cerne e alburno.....	15
4.3 Densitometria por raios X.....	17
4.4 Dimensões das fibras	19
4.4.1 Variação das dimensões das fibras no sentido base topo.....	20
4.4.2 Variação das dimensões das fibras no sentido medula casca.....	22
4.5 Composição química da madeira.....	24
5 Material e métodos.....	29
5.1 Material biológico.....	29
5.2 Determinação da proporção de cerne e alburno.....	29
5.3 Determinação da densidade aparente por raios X.....	30
5.4 Determinação das dimensões das fibras	31
5.5 Determinação dos teores de extrativos e lignina.....	32
5.6 Análise elementar da madeira.....	33
6 Resultados e discussão.....	34
6.1 Proporção de cerne e alburno.....	34
6.2 Densidade aparente da madeira por raios X	35
6.3 Dimensões das fibras	38
6.4 Composição química da madeira: variação longitudinal e radial do teor de extrativos, lignina e cinzas.....	48
6.5 Análise elementar da madeira.....	70
6.5.1 Na altura do DAP.....	70
6.5.2 Nas outras alturas no tronco da árvore.....	75
7 Conclusões.....	78
8 Referências bibliográficas.....	80

CAPÍTULO 3: Variação nas características do carvão produzido a partir de um clone de <i>Eucalyptus grandis</i> W. Hill ex Maiden x <i>Eucalyptus urophylla</i> S. T. Blake		87
1	Resumo	87
2	Abstract	88
3	Introdução	89
4	Referencial teórico	91
4.1	Carvão vegetal	91
4.2	Características quantitativas do carvão vegetal	92
4.3	Qualidade do carvão vegetal	96
4.4	Características anatômicas do carvão vegetal	101
5	Material e métodos	103
5.1	Carbonização da madeira e qualidade do carvão	103
5.1.1	Primeira carbonização - carbonização das amostras retiradas de metro em metro	103
5.1.2	Segunda carbonização - carbonização das amostras retiradas no DAP e posições longitudinais	104
5.2	Aplicação da técnica de densitometria de raios X no carvão	105
5.3	Anatomia do carvão vegetal	106
6	Resultados e discussão	107
6.1	Primeira carbonização	107
6.1.1	Características quantitativas do carvão vegetal	107
6.1.2	Avaliação física e química imediata do carvão vegetal	108
6.2	Segunda carbonização	109
6.2.1	Características quantitativas do carvão vegetal	109
6.3	Densitometria por raios X	118
6.4	Anatomia do carvão vegetal	126
7	Conclusões	131
8	Referências bibliográficas	133

RESUMO GERAL

ARANTES, Marina Donária Chaves. **Variação nas características da madeira e do carvão de um clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.** 2009. 137p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.*

Este trabalho foi realizado com o objetivo de determinar a variabilidade existente nas características da madeira e do carvão de um clone de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. Foi utilizado um clone de híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, aos 6 anos, plantado município de Martinho Campos, MG. Utilizaram-se cinquenta árvores, as quais foram distribuídas em três classes de diâmetro. A amostragem consistiu na retirada de discos, de 2,5 cm de espessura, a 2%, 10%, 30% e 70% da altura comercial, além de um a 1,30 m do solo (DAP) e baguetas de 2 cm de diâmetro no DAP, com trado motorizado. Foram tomadas amostras ao longo do raio nos discos, considerando os dois lados opostos à medula. Pelos resultados, verificou-se que a classe diamétrica 14,2 cm apresentou maior proporção de cerne em relação às demais classes, com média de 45%. Os valores mais altos de densidade aparente da madeira utilizando a técnica de raios X foram encontrados para as classes diamétricas de 14,1 e 11,4 cm, com 0,589 e 0,576 g/cm³, respectivamente. A espessura da parede celular reduziu com a diminuição da classe diamétrica. O comprimento da fibra apresentou, de modo geral, valor mais elevado na maior classe diamétrica e idêntico nas outras duas classes. A largura e o diâmetro do lume das fibras apresentaram comportamento bem semelhante, ou seja, maiores valores nas classes 14,2 e 8,1 cm e a classe 11,4 cm, o menor valor médio. Os teores de extrativos e lignina na madeira apresentaram, no geral, padrão decrescente de variação com a distância da medula e tenderam à maior concentração nas partes mais baixas do tronco das árvores. O teor de carbono tendeu a reduzir com a distância da medula, enquanto os teores de hidrogênio e oxigênio tenderam a aumentar. A classe diamétrica 14,2 cm apresentou a maior estimativa de massa de carbono média imobilizada por árvore, sendo de 36,91 kg, o que permite um incremento médio anual de 9211,76 kg/ha.ano, considerando-se 1.500 árvores por hectare. Em relação ao carvão vegetal, concluiu-se que, para a primeira carbonização, a classe diamétrica influenciou significativamente o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, em líquido pirolenhoso e o teor de cinzas do carvão vegetal produzido; o rendimento em gás não condensável, teor de materiais voláteis e de carbono fixo não foi

* Comitê Orientador: Paulo Fernando Trugilho - UFLA (Orientador), José Tarcísio Lima – UFLA e José Reinaldo Moreira da Silva – UFLA.

influenciado pela classe diamétrica; o teor de cinzas foi maior na menor classe diamétrica. Para a segunda carbonização, o rendimento gravimétrico aumentou da casca para a medula para todas as classes diamétricas e ocorreu redução desta característica com a diminuição das classes diamétricas; os valores de densidade relativa aparente tendem a aumentar no sentido medula-casca em todas as classes diamétricas. A técnica de densitometria por raios x mostrou-se confiável para a determinação da densidade relativa aparente do carvão vegetal. Os valores de densidade relativa aparente média do carvão tendem a diminuir com a diminuição da classe diamétrica, ocorrendo um aumento da mesma no sentido medula-casca, para todas as amostras.

Palavras-chave: eucalipto, carvão vegetal, densidade aparente.

ABSTRACT GENERAL

ARANTES, Marina Donária Chaves. **Variation in the characteristics of the wood and coal of a clone of *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.** 2009. 137p. Thesis (Doctors in Wood Science and Tecnology) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. *

This work was intended to determine the variability existing in the characteristics of the wood and coal of a clone of *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. A clone of hybrid of *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* at 6 years, planted in the town of Martinho Campos, MG was utilized. Fifty trees were utilized, which were distributed into three diameter classes. The sampling consisted of the taking of disks 2.5 cm thick at 2%, 10%, 30% e 70% of the commercial height, in addition of one at 1.30 meters from soil (BHD) and increment cores 2 cm in diameter at BHD, with a motorized auger. Samples along the ray on the disks were taken, considering the two sides opposite the pith. From the results, it was found that the diameter class 14.2 cm presented higher proportion of heartwood relative to the other classes with a mean of 45%. The highest values of apparent density of the wood utilizing the x-ray technique were found for the diameter classes of 14.1 and 11.4 cm with 0.589 and 0.576 g/cm³, respectively. The thickness of the cell wall reduced with decreasing diameter class. The fiber length presented, in general, a higher value in the greatest diameter class and identical in the two other classes. Both the width and diameter of the lumen of the fibers showed a quite similar behavior, that is, increased values in the classes 14.2 and 8.1 cm and the class 11.4 cm did the lowest average value. The contents of extractives and lignin in the wood presented, in general, a decreasing standard of variation with the distance of the pith and tended to increased concentration at the lowest parts of the trunk of the trees. Carbon content tended to reduce with the distance form the pith, while the hydrogen contents tended to increase. The diameter class 14.2 cm presented the greatest estimate of average carbon mass immobilized per tree, namely 36.91 kg, which allowed an annual average increase of 9211.76 kg/ha.year, considering 1500 trees per hectare. In relation to charcoal, it follows that for the first carbonization, the diameter class influenced significantly the gravimetric yield in charcoal, in pirogalyc liquid and as content of charcoal produced; the incondensable gas yield, the content of volatile matters and fixed carbon were not influenced by the diameter class; ash content was greatest in the smallest diameter class. For the second carbonization, the gravimetric yield increased

* Guidance Committee: Paulo Fernando Trugilho - UFLA (Major Professor), José Tarcísio Lima – UFLA and José Reinaldo Moreira da Silva – UFLA.

from the bark to the pith for all the diameter classes and reduction of that characteristic took place with decreasing of the diameter classes; the values of apparent relative density tend to increase in the pith-bark direction in all the diameter classes. The X ray densitometry technique proved reliable for determination of the apparent relative density of charcoal. The values of average apparent relative density of charcoal tend to decrease with decreasing diameter class; an increase occurring of it in the pith-bark direction for all the samples.

Key words: eucalyptus, charcoal, apparent density.

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO GERAL

A preocupação com a devastação do meio ambiente, e particularmente com a destruição de matas e florestas, pode ter uma trégua em face da atual crise financeira mundial. A recessão econômica, com escassez de crédito e redução de consumo, pode reduzir a demanda dos principais países importadores do mundo pelos produtos derivados da madeira, como carvão, móveis e madeira para construção. Essa redução de consumo pode representar uma oportunidade para reparar em parte os danos até aqui causados ao meio ambiente e para se pesquisar usos alternativos e mais responsáveis das florestas, dentre outras. Embora, economicamente, essa queda de demanda possa representar perda de renda e divisas no médio prazo, no longo prazo, pode representar ganho sustentável dessa mesma riqueza. A análise recente desses setores confirma a trajetória de declínio nos preços e as ameaças e oportunidade que a crise tem provocado (Silva et al., 2009).

O Brasil é reconhecido não somente como um dos principais países, em termos de área de plantações florestais com espécies de eucaliptos, mas como detentor de elevado nível científico-tecnológico nas diversas áreas da eucaliptocultura, em função das pesquisas realizadas nas universidades, institutos de pesquisa e empresas florestais. Dentre as inúmeras e importantes áreas da pesquisa, cabe destacar às de fisiologia, melhoramento e genética florestal, proporcionando o domínio das técnicas de propagação vegetativa e de obtenção de híbridos e a de tecnologia da madeira, ampliando as possibilidades da utilização da madeira das árvores de eucaliptos (Alzate, 2004).

Sabendo-se da importância da madeira, torna-se necessário o conhecimento de suas características, sendo possível, assim, inferir sobre a

qualidade do produto final, ou seja, as características de um determinado produto estão diretamente relacionadas com a qualidade da madeira de origem. Por exemplo, de maneira geral, quando se tem uma madeira com elevada densidade e alto teor de lignina, o carvão produzido também terá maior densidade e maior rendimento gravimétrico.

Da mesma forma que se avaliam as características da madeira para ser utilizada em um determinado processo, tem-se que avaliar o produto final dela obtido para verificar se o mesmo atende às especificações de uso. Como ocorre com a madeira, a densidade aparente é uma das propriedades mais avaliadas ao se constatar a qualidade do carvão vegetal, entre outras características, como a análise química imediata, o rendimento gravimétrico, a porosidade e a resistência mecânica.

A variação das características do carvão vegetal é bem semelhante à variação das características da madeira que lhe deu origem, mas em proporções menores, pois, durante o processo de carbonização da madeira ocorre a degradação de seus elementos (celulose, hemiceluloses e lignina).

Diante do exposto, o este trabalho foi realizado com o objetivo geral de estudar a variação nas características da madeira e do carvão de um clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.

Os objetivos específicos em relação à madeira foram: 1) determinar a proporção de cerne e alburno; 2) determinar a densidade aparente da madeira, no sentido radial do tronco das árvores, pelo método de densitometria de raios X; 3) determinar a composição elementar da madeira e a variação radial e longitudinal; 4) determinar as dimensões das fibras e a variação radial; 5) determinar o teor de extrativos, os teores de lignina insolúvel, solúvel e total e 6) determinar o teor de cinzas e suas variações radiais e longitudinais. Para o carvão, os objetivos específicos foram: 1) determinar o rendimento gravimétrico em carvão, o rendimento em líquido pirolenhoso e o rendimento de gases não-

condensáveis; 2) determinar o teor de materiais voláteis, cinzas e de carbono fixo; 3) determinar a densidade relativa aparente; 4) verificar a utilização da técnica de raios X para a determinação da densidade relativa aparente no carvão e 5) analisar a anatomia do carvão vegetal.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Eucalipto é a designação vulgar das várias espécies vegetais do gênero *Eucalyptus*, ainda que o nome se aplique ainda a outros gêneros de mirtáceas, nomeadamente dos gêneros *Corymbia* e *Angophora*. São, em termos gerais, árvores e, em alguns raros casos, arbustos, nativos da Oceania, onde constituem o gênero dominante da flora. O gênero inclui mais de setecentas espécies, quase todas originárias da Austrália, existindo apenas um pequeno número de espécies próprias dos territórios vizinhos da Nova Guiné e Indonésia, e mais uma espécie no sul das Filipinas.

Adaptados a praticamente a todas as condições climáticas, os eucaliptos caracterizam a paisagem da Oceania de uma forma que não é comparável a qualquer outra espécie, noutro continente. Algumas das suas espécies foram exportadas para outros continentes, onde têm ganho importância econômica, devido ao fato de crescerem rapidamente e serem muito utilizadas para produzir pasta de celulose, usada no fabrico de papel, carvão vegetal e madeira (Eucalipto, 2009).

Para definir o melhor uso de uma madeira, devem-se estudar as suas características, definindo-se assim sua qualidade que, por sua vez, pode ser definida como um atributo ou condição que distingue um determinado produto. Em termos mais gerais, seria a adequação ao uso que se pretende. Para o caso da madeira, os parâmetros principais da qualidade são: a) tecnológicos – físicos, mecânicos, químicos e anatômicos e b) não tecnológicos - espécie, procedência, idade, ritmo de crescimento, forma, conicidade da árvore, etc. (Barrichelo, 1992).

As principais propriedades físicas e mecânicas da madeira que provocam impacto na qualidade do produto final a ser produzido são identificadas como resistência mecânica, massa específica aparente e

estabilidade dimensional, e os principais impactos tecnológicos nas características das madeiras passam pelo melhoramento florestal e práticas silviculturais e de manejo, além das etapas de processamento primário e secundário. Segundo o mesmo autor, existe unanimidade, entre os pesquisadores da área de produtos florestais, de que a qualidade da madeira para determinados usos pode ser melhorada, modificada ou ter alguns fatores minimizados ou controlados, em considerável extensão (Eucalipto..., 2003).

Dentre as propriedades da madeira, a mais estudada é a densidade, pois é uma quantificação direta do material lenhoso por unidade de volume, estando relacionada a muitas características tecnológicas fundamentais para a produção e a utilização dos produtos florestais. Ela é considerada um dos parâmetros mais importantes entre as diversas propriedades físicas da madeira, pois afeta todas as suas demais propriedades. Seus efeitos, porém, são interativos e difíceis de serem avaliados isoladamente (Shioyama, 1990).

Existe, ainda, na literatura uma indefinição no padrão de variação da densidade da madeira, tanto no sentido longitudinal (base-topo) como no radial (medula-casca), mostrando sempre a necessidade de estudos quando se deseja verificar a qualidade e o uso de uma determinada madeira.

As propriedades da madeira variam conforme o crescimento da árvore, com a ressalva de que a porção da madeira correspondente aos primeiros anéis formados apresenta menor densidade e fibras mais curtas, entre outras características, ou seja, a diferença entre lenho juvenil e adulto. Os mesmos autores constataram que ocorre um aumento da densidade, bem como da espessura da parede celular em anéis sucessivos, a partir do centro para a periferia do tronco da árvore, no sentido medula-casca e que a densidade tende a aumentar com a idade, com conseqüente aumento da espessura da parede celular e diminuição da largura das células (Latorraca & Albuquerque, 2000).

Um dos principais usos da madeira é para a produção de carvão vegetal e, segundo Trugilho et al. (2005), a qualidade e a quantidade do carvão vegetal sofrerão significativa modificação em relação à madeira de origem, pois esse produto está intimamente relacionado com as características químicas, anatômicas e físicas da madeira. Um problema relacionado ao uso do carvão vegetal é a sua variabilidade em qualidade, uma vez que esse produto sofre grande influência da qualidade da madeira e do processo de produção. A variabilidade ocasiona desperdício do material, podendo, inclusive, dificultar a operação dos altos fornos siderúrgicos.

Para Trugilho (1995), a utilização da madeira para a produção de energia, apesar de não ser restritiva, depende de algumas características internas da madeira, como, por exemplo, o teor de lignina e a densidade básica.

Pinheiro et al. (2008) afirmam que a produção de carvão vegetal e sua composição dependem da espécie de madeira, da carga do forno, da temperatura final de carbonização e de outras condições operacionais utilizadas. O conhecimento dos fundamentos da carbonização permite aumentar a produtividade, bem como produzir um carvão vegetal com as características necessárias para uma aplicação específica.

Segundo os mesmos autores, as propriedades mais importantes do carvão vegetal para a operação do alto-forno e uso industrial geral são a resistência à compressão e a composição química. Os principais fatores que influenciam a densidade relativa aparente e a resistência mecânica do carvão vegetal são: espécie de madeira, dimensões da madeira e parâmetros da carbonização. Uma madeira densa produz carvão vegetal denso, portanto, deve ser preferida para a produção de carvão metalúrgico.

3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALZATE, S. B. A. **Caracterização da madeira de árvores de clones de *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* e *E. grandis* x *urophylla***. 2004. 133 p. Tese (Doutorado em Tecnologia de Produtos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

BARRICHELO, L. E. G. Estudo da variação longitudinal da densidade básica de *Eucalyptus* spp. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 4., 1992, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: UFMG, 1992. p. 726-731.

EUCALIPTO. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org>>. Acesso em: 3 ago. 2009.

EUCALIPTO: pesquisa amplia usos. **Revista da Madeira**, Itajaí, n. 75, ago. 2003. Edição especial. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=395&subject=Carvão%20Vegetal&title=O%20eucalipto%20na%20indústria%20de%20carvão%20vegetal>. Acesso em: 1 ago. 2009.

LATORRACA, J. V.; ALBUQUERQUE, C. E. C. Efeito de rápido crescimento sobre as propriedades da madeira. **Revista Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 7, n. 1, p. 279-291, jan./abr. 2000.

PINHEIRO, P. C. C. da; VIANA, E.; REZENDE, M. E. A. de; SAMPAIO, R. S. **A produção de carvão vegetal**. 2. ed. rev. e ampl. Belo Horizonte: [s.n.], 2008. 103 p.

SHIMOYAMA, V. R. **Variações da densidade básica e características anatômicas e químicas da madeira em *Eucalyptus* sp.** 1990. 93 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

SILVA, M. L. da; REZENDE, A.; SOARES, N. S.; MOURA, A. **A crise financeira e o setor florestal brasileiro**. Disponível em: <www.painelflorestal.com.br>. Acesso em: 15 abr. 2009.

TRUGILHO, P. F. **Aplicação de algumas técnicas multivariadas na avaliação da qualidade da madeira e do carvão de *Eucalyptus***. 1995. 160 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, J. R. M.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M.; MENDES, L. F. B. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial da amostragem em clones de *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 178-186, jan./jun. 2005.

CAPÍTULO 2

Varição nas características da madeira de um clone de *Eucalyptus grandis*

W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake

1 RESUMO

Este trabalho foi realizado com o objetivo de determinar a variabilidade existente nas características da madeira de um clone de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. O material utilizado tinha seis anos de idade e foi plantado município de Martinho Campos, MG. Utilizaram-se cinquenta árvores, as quais foram distribuídas em três classes de diâmetro. A amostragem consistiu na retirada de discos, de 2,5 cm de espessura, a 2%, 10%, 30% e 70% da altura comercial, além de um extra a 1,30 m do solo (DAP) e baguetas de 2 cm de diâmetro no DAP, com trado motorizado. Pelos resultados, verificou-se que a classe diamétrica 14,2 cm apresentou maior proporção de cerne em relação às demais classes. Os valores mais altos de densidade aparente utilizando a técnica de raios X foram encontrados para as classes diamétricas de 14,1 e 11,4 cm. A espessura da parede celular reduziu com a diminuição da classe diamétrica. O comprimento da fibra apresentou, de modo geral, um valor mais elevado na maior classe diamétrica e idêntico nas outras duas classes. A largura e o diâmetro do lume das fibras apresentaram comportamento bem semelhante, ou seja, maiores valores nas classes 14,2 e 8,1 cm e a classe 11,4 cm, o menor valor médio. Os teores de extrativos e lignina na madeira apresentaram, no geral, variação decrescente com a distância da medula. O teor de carbono tendeu a reduzir com a distância da medula, enquanto os teores de hidrogênio e oxigênio tenderam a aumentar. A classe diamétrica 14,2 cm apresentou a maior estimativa de massa de carbono média imobilizada por árvore.

Palavras-chave: eucalipto, composição elementar, raios X.

2 ABSTRACT

This work was designed to determine the viability existing in the characteristics of a clone of *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. The material utilized was 6 years old, planted in the town of Martinho Campos, MG. Fifty trees were utilized, which were distributed into three diameter classes. The sampling consisted of the taking of 2.5 cm thick disks at 2%, 10%, 30% and 70% of commercial height, in addition to an extra at 1.30 meters from soil (BHD) and 2 cm-diameter radial ribbons at BHD, with a motorized auger. From the results, it was found that the diameter class of 14.2 cm presented the highest proportion of heartwood in relation to the other classes. The highest values of apparent density by utilizing the x ray technique were found for the diameter classes of 14.1 and 11.4 cm. The cell wall thickness reduced with decreasing diameter class. The fiber length presented, in general, a higher value in the largest diameter class and identical in the other two classes. Both the breadth and diameter of the fiber lumen presented a quite similar behavior, that is, greatest values in the classes of 14.2 and 8.1 cm and the 11.4 cm class the lowest average value. The contents of extractives and lignin in wood presented, in general, decreasing variation with the distance of the pith. The carbon content tended to reduce with the pith distance, while the values of hydrogen and oxygen tended to increase. The diameter class 14.2 cm presented the highest estimate of immobilized average carbon mass per tree.

Key words: eucalyptus, biochemical composition, X ray.

3 INTRODUÇÃO

As áreas de florestas plantadas no Brasil acumularam, em 2008, o total estimado de 6.583.074 hectares com eucalipto, pinus e outras espécies (Associação Brasileira de Florestas - ABRAF, 2009). Segundo os mesmos autores este total representa um acréscimo de cerca de 282.000 hectares plantados em relação ao total estimado do ano anterior (6.301.942 ha); do total plantado em 2008, 28,4% correspondem a plantios de pinus, 64,7% de eucalipto e outras espécies, 6,9%. Verifica-se que houve um crescimento de 7,3% na área plantada com eucalipto e queda de 0,4% no pinus, o que resulta em aumento de 4,38% da área com florestas plantadas acumulada até 2008, em relação a 2007.

A maior parte das empresas do setor florestal foi atingida pelos efeitos da crise econômica mundial no último trimestre de 2008. Como os investimentos neste setor dependem da recuperação da economia, os investimentos em plantios florestais para os próximos anos foram reduzidos, e o ano de 2009, possivelmente, será o mais atingido.

Para o melhor aproveitamento das florestas plantadas, em especial com o eucalipto, se faz necessário o estudo das propriedades de sua madeira para adequar da melhor maneira possível a matéria-prima ao produto final ao qual se deseja.

Segundo Barcellos et al. (2005), considerando o uso final da madeira, parte-se do princípio de que a madeira deve possuir qualidades que atendam a adequadas características relacionadas ao seu uso final. O eucalipto, por ser uma madeira de elevada versatilidade e elevada produtividade, atende, na maioria dos casos, à necessidade como matéria-prima e, principalmente, para a produção com fins energéticos para o país.

As propriedades da madeira variam entre árvores e dentro da própria árvore nos sentidos longitudinal e radial do tronco. Segundo Downes et

al. (1997), essa variação pode sofrer grande interferência dos métodos de avaliação e amostragem, podendo resultar em erros consideráveis de decisão quanto à amostragem adequada do material. Para uma avaliação confiável, quanto maior for a variação, maior deverá ser o número de amostras e de pontos amostrais a serem obtidos e processados e, conseqüentemente, maior será o tempo demandado e o custo da amostragem.

Um dos índices mais importantes para avaliar a qualidade da madeira é a sua densidade, pois leva em consideração suas características químicas e anatômicas. Uma importante ferramenta utilizada para a determinação da densidade hoje em dia é a técnica de raios X, que vem demonstrando eficiência e rapidez na obtenção dos resultados.

Com isso, o objetivo geral deste trabalho foi determinar a variabilidade existente nas características da madeira de um clone de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. Os objetivos específicos foram determinar a proporção de cerne e alburno; determinar a densidade aparente da madeira, no sentido radial do tronco das árvores, pelo método de densitometria de raios X; determinar a composição elementar da madeira e a variação radial e longitudinal; determinar as dimensões das fibras e a variação radial; determinar o teor de extrativos; os teores de lignina insolúvel, solúvel e total e o teor de cinzas e suas variações radiais e longitudinais.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*

O gênero *Eucalyptus*, pertencente à família Myrtaceae, tem sua origem na Austrália, exceto pelas espécies *E. urophylla* e *E. deglupta* que ocorrem em ilhas na Oceania. O *Eucalyptus* é dividido em oito subgêneros: *Blakella*, *Eudesmia*, *Gaubaea*, *Idiogenes*, *Telocalyptus*, *Monocalyptus*, *Symphyomyrtus* e *Corymbia*. Atualmente, tem-se de 600 a 700 espécies já identificadas, com diferentes exigências quanto à fertilidade de solo, tolerância a geadas e à seca, possibilitando seu plantio em mais de 100 países, todos com importância econômica. No Brasil, as principais espécies plantadas são o *E. grandis*, *E. saligna*, *E. urophylla*, *E. viminalis*, híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla*, *C. citriodora* e *E. camaldulensis*, entre outros (Centro de Inteligência em Florestas - CIFLORESTAS, 2009a).

Para Pereira et al. (2000), o gênero *Eucalyptus* compreende um grande número de espécies, com madeiras de características físico-mecânicas e estéticas bastante diferenciadas, o que permite a substituição de várias espécies nativas. No entanto, poucas espécies têm sido plantadas em escala comercial.

Destaca-se, dentre as espécies do gênero, o *Eucalyptus grandis* como uma das mais plantadas no Brasil e no mundo, e considerada uma das espécies de madeira mais versáteis e indicadas para uso múltiplo (Haselein et al., 2004). De acordo com Rocha (2000), o *Eucalyptus grandis* tem boa adaptação em todas as regiões do Brasil, com elevado potencial silvicultural e plantios em larga escala; as árvores possuem boa forma, fornecendo toras adequadas para a produção de serrados e apresenta, ainda, massa específica ideal para a produção de móveis.

O *Eucalyptus grandis* W. Hill ex-Maiden possui madeira medianamente leve e é fácil de ser trabalhada em operações de usinagem. É considerada de

baixa estabilidade, mas de elevada permeabilidade. Quando oriunda de plantações de ciclo longo, a madeira é utilizada intensivamente na Austrália, África do Sul, Brasil e Argentina como madeira de construção e matéria-prima na fabricação de móveis. Quando oriunda de plantações em ciclos curtos, é utilizada em caixotaria, paletes, carvão e mourões. O *Eucalyptus grandis* W. Hill ex-Maiden é uma das espécies mais plantadas no mundo, considerada uma das espécies mais versáteis e indicadas para uso múltiplo. A madeira oriunda de árvores com rápido crescimento apresenta problemas de empenamento, contrações e rachaduras, em operações de desdobro e secagem. As madeiras convenientemente manejadas podem produzir madeira excelente para serraria e laminação. O *Eucalyptus grandis* W. Hill ex-Maiden é considerado a principal matéria-prima para as indústrias de celulose, painéis aglomerados e chapas duras (CIFLORESTAS, 2009b).

Com base na caracterização tecnológica da madeira de árvores matrizes de *Eucalyptus grandis*, Haselein et al. (2004) concluíram que a densidade básica indicou uma tendência decrescente entre 1,30 m do solo e 25% da altura comercial e, a partir daí, crescente até 100% da mesma; o percentual volumétrico de cerne apresentou valores médios crescentes desde a base até 25% da altura comercial e, a partir daí, diminuiu até 100% da altura comercial, tendo a média geral sido de 75,7%; e o comprimento médio das rachaduras de topo nas tábuas foi de 63%.

Outra espécie de ocorrência natural fora do território australiano é o *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, ocorrendo naturalmente na ilha de Timor e em outras ilhas a leste do arquipélago indonésio. A madeira do *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake é considerada medianamente leve e as propriedades de resistência mecânica são moderadas. É uma madeira de relativa estabilidade e alta permeabilidade. No Brasil, é indicada para usos gerais e muito utilizada em

laminação, componentes estruturais para construção, caixotaria, mourões, escoras, celulose e papel, chapas duras, painéis, lenha e carvão.

Inúmeros esforços são realizados para a introdução da espécie fora das condições de sua zona natural. Os resultados são bastante satisfatórios, com a espécie apresentando alta plasticidade, adaptando-se a solos hidromórficos ou francamente arenosos, em diferentes altitudes. É considerada apta para regiões onde não ocorrem geadas e situações de déficits hídricos severos. No Brasil, o *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake tem sido plantado intensivamente em programas de melhoramento genético, principalmente de hibridação, sendo uma espécie que apresenta boa capacidade de regeneração por brotação (CIFLORESTAS, 2009b).

4.2 Cerne e alburno

Em muitas árvores, a parte interna do tronco, chamada cerne, se destaca por sua cor mais escura. A causa da formação do cerne deve-se ao fato de que, com exceção das células parenquimáticas que apresentam maior longevidade e permanecem vivas até certa distância para o exterior do tronco, chamada de alburno, apenas suas camadas mais periféricas são fisiologicamente ativas. Assim, à medida que a árvore cresce, as partes internas distanciam-se do câmbio, perdem gradativamente sua atividade vital e adquirem coloração mais escura em decorrência da deposição de tanino, resinas, gorduras, carboidratos e outras substâncias resultantes da transformação dos materiais de reserva contidos nas células parenquimáticas do alburno interno (Burger & Richter, 1991). Segundo Klock et al. (2005), o número de anos que as células de parênquima vivem e a largura da faixa de alburno variam de espécie para espécie.

Segundo Nogueira & Ballarin (2008), em algumas espécies, pode-se verificar visualmente a transição de alburno para cerne, por meio de um

escurecimento do lenho, devido à deposição dos extrativos, os quais lhe conferem, em algumas situações, maior durabilidade contra deterioração por fungos ou insetos. Esse escurecimento não é condição imprescindível para a ocorrência do cerne.

Burger & Richter (1991) afirmam que a proporção de cerne e alborno varia dentro da própria árvore e também com a espécie, a idade, o solo e o clima.

Tomazello Filho (1985) assegura que existe uma significativa variação nas porcentagens de cerne e alborno no tronco entre as espécies de eucaliptos, refletindo na fisiologia do crescimento das árvores e, principalmente, nas propriedades e na utilização da madeira.

Em termos de determinação da qualidade da madeira e dos seus usos, a dimensão e as características do cerne são determinantes, sendo este, em geral, valorizado pela sua dureza e resistência ao ataque por insetos. A madeira de cerne é, em geral, preferida para usos em que se requeiram durabilidade e resistência mecânica.

Oliveira et al. (1999) avaliaram as características dendrométricas de sete espécies de eucaliptos e encontraram uma porcentagem de alborno maior no *E. paniculata* com valor de 60% na base e quase 100% na posição média do tronco; elevada porcentagem também para o *C. citriodora*, seguindo *E. pilularis*, *E. grandis* e *E. cloeziana*. Ainda, indicaram a necessidade de aplicação de preservantes para a proteção da madeira.

Haselein et al. (2004), estudando as características tecnológicas da madeira de árvores matrizes de *Eucalyptus grandis*, verificaram que o percentual volumétrico de cerne apresentou valores médios crescentes desde a base até 25% da altura comercial e, a partir daí, diminuiu até 100% da altura comercial, tendo a média geral sido de 75,7%.

4.3 Densitometria por raios X

A densidade básica é conceituada como a relação entre a massa de madeira seca e o seu volume verde. Ela é considerada um dos mais importantes índices de qualidade da madeira para os mais diversos usos, seja como matéria-prima industrial ou energética. Essa grande importância está no fato de que a densidade básica, além de ser uma característica de fácil determinação e possuir alta herdabilidade (Rocha, 1983), está relacionada com um grande número de outras propriedades da madeira. A densidade básica não deve ser utilizada como índice de qualidade de forma isolada, em função da alta correlação com outras propriedades da madeira.

Para a determinação da densidade da madeira, alguns métodos são utilizados e entre esses, vem ganhando espaço a densitometria por raios X. Nos últimos anos, as pesquisas com o método se desenvolveram muito, juntamente com a incorporação de técnicas computacionais na leitura dos filmes radiográficos (Tomazello Filho, 2006; Tomazello Filho et al., 2008).

Segundo Amaral (1994), a densitometria de raios X é uma técnica que consiste na obtenção de radiografias de uma fina secção transversal de madeira sobre um filme radiográfico; sendo este filme exposto à fonte de raios X e, pela passagem da radiação através da amostra de madeira, forma-se uma imagem da sua estrutura transversal.

A utilização da densitometria de raios X, segundo Oliveira (1997), permite examinar as variações da densidade da madeira a pequenas distâncias, o que é impossível pelo método gravimétrico convencional, obtendo-se gráficos do padrão de variação radial da densidade e proporcionando a avaliação do desenvolvimento das árvores de espécies diferentes e a seleção das que produzem madeira com densidade mais uniforme ou mais elevada.

Silva (2002) utilizou a densitometria de raios X em madeiras de árvores de *E. grandis*, com quatro diferentes idades, e concluiu que ocorreu um aumento

da densidade aparente da madeira no sentido medula-casca. Para as árvores com dez anos, a densidade aparente média foi de $0,46 \text{ g/cm}^3$, sendo 50% da seção radial próxima da medula formada por madeira juvenil; aos vinte e cinco anos, a densidade aparente média foi de $0,63 \text{ g/cm}^3$, sendo detectada a madeira juvenil mais próxima da medula.

Chagas (2009), caracterizando os anéis de crescimento e a dendrocronologia de árvores de *Grevillea robusta* A., Cunn, *Hovenia dulcis* Thunb., *Persea americana* Mill., *Tabebuia pentaphylla* Hemsl. e *Terminalia catappa* L., nos municípios de Piracicaba e Paulínia, SP, afirma que a aplicação da densitometria de raios X mostrou ser uma ferramenta valiosa na demarcação dos limites dos anéis de crescimento, tornando possível a mensuração da sua largura e a determinação da densidade inter e intra-anéis.

Sette Júnior et al. (2009) estudaram o efeito da aplicação de potássio e sódio nas características do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, aos 24 meses de idade. Estes autores concluíram que o modelo de variação radial da densidade aparente do lenho utilizando a técnica de raios X não mostrou diferenças significativas nas árvores de eucalipto dos três tratamentos utilizados, sendo os perfis radiais de densidade aparente característicos de madeira juvenil de árvores de eucalipto. Observaram também que os maiores valores de densidade aparente do lenho foram observados na medula ($0,80\text{--}1,20 \text{ g/cm}^3$), devido à presença de substâncias de reserva (amido) nas células do parênquima axial, seguindo-se sua redução e estabilização ($0,30\text{--}0,50 \text{ g/cm}^3$) até atingir a casca e, ainda, que a densidade aparente média do lenho das árvores de eucalipto dos tratamentos 1 (testemunha), 2 (aplicação de potássio) e 3 (aplicação de sódio) foi de $0,54$, $0,52$ e $0,53 \text{ g/cm}^3$, respectivamente.

4.4 Dimensões das fibras

As fibras são elementos celulares que constituem a maior percentagem do lenho das folhosas, desempenhando uma função de sustentação no tronco. A proporção e a espessura da parede das fibras influem diretamente na massa específica e no grau de alteração volumétrica e indiretamente nas propriedades de resistência mecânica da madeira (Burger & Richter, 1991). Especificamente para o gênero *Eucalyptus*, a percentagem total de fibras é de 65%, a de vasos é de 17% e a de tecido parenquimatoso é de 18% (Foelkel & Barrichelo, 1975; Barrichelo & Brito, 1976).

As fibras são consideradas os elementos celulares mais importantes na madeira. Por esta razão, o conhecimento da quantidade desses elementos e de sua estrutura é de fundamental importância para a qualificação de madeiras para atividades diversas. Além disso, a análise dos parâmetros referente às fibras fornece subsídios seguros no contexto de qualificação de madeiras para a geração de energia e produção de papel (Paula, 2003).

A constatação da existência de correlação entre dimensões das fibras com a parede celular espessa, diâmetro de lúmen reduzido e densidade elevada indica a possibilidade de produção de carvão vegetal mais denso e com menor volume de poros (Oliveira, 1988). Quanto maior for a fração parede, maior teor de celulose, lignina e hemiceluloses terá a fibra e, conseqüentemente, mais substâncias básicas geradoras de energia. Portanto, madeiras ricas em fibras de fração parede alta devem ser recomendadas para a geração de energia. Contudo, se a fração parede for alta e a madeira como um todo apresentar baixa percentagem de fibras, esta não deve ser recomendada para a geração de energia (Paula, 2003).

A madeira das folhosas apresenta distribuição dos elementos celulares bastante característica, com a maioria dos estudos dirigidos para a avaliação das

fibras. Segundo Downes et al. (1997), o comprimento, a espessura das paredes e o lume das fibras influenciam diretamente a densidade básica da madeira.

Shimoyama (1990), estudando a variação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* spp. nos sentidos longitudinal e radial do tronco, concluiu que as características anatômicas, como as dimensões das fibras, têm maior influência na densidade do que a composição química. Portanto, há a necessidade de se analisar os componentes anatômicos, já que influenciam a densidade da madeira e, conseqüentemente, o seu produto final. Trugilho et al. (1996), estudando a variação das características físico-químicas com a idade na madeira de *Eucalyptus*, verificaram que a densidade básica apresentou, de modo geral, elevados e significativos coeficientes de correlação com as características dimensionais das fibras, exceto para o diâmetro do lume.

Brasil & Ferreira (1972) estudaram a variabilidade das dimensões das fibras em árvores de *E. grandis*, aos cinco anos, observando alta variação entre as árvores e que estas características devem ser consideradas em trabalhos de seleção de árvores matrizes. Estudos demonstraram, ainda, que as dimensões das fibras também são influenciadas pela taxa de crescimento e a idade da árvore.

Trugilho et al. (1996) verificaram menor comprimento das fibras no lenho juvenil.

4.4.1 Variação das dimensões das fibras no sentido base topo

O padrão de variação do comprimento das fibras em relação à altura da árvore, mais verificado na literatura para o gênero *Eucalyptus*, é caracterizado por um aumento inicial com um posterior decréscimo. Esses resultados foram encontrados por Muneri & Raymond (2001), em *Eucalyptus globulus*; por Bamber et al. (1969), Bhat et al. (1990) e Ridout & Sandes (1993), em *E. grandis*; por Hudson et al. (1995, 1996), em *E. nitens* e por Rocha et al. (2004), em *E. grandis*.

Valente et al. (1992) e Hudson et al. (1996) observaram diminuição do comprimento da fibra ao longo do eixo longitudinal da árvore.

Taylor (1973) concluiu que a posição longitudinal de amostragem não influenciou o comprimento de fibra. Da mesma forma, Rao et al. (2002) verificaram, em *E. terenticornis*, uma tendência não definida de variação do comprimento de fibra no sentido base topo dentro do clone e entre árvores.

Bhat et al. (1990) verificaram, em *E. grandis* aos três, cinco, sete e nove anos, a 0%, 25%, 50% e 75% da altura total do tronco, que os valores de espessura de parede não apresentaram diferenças estatísticas significativas.

Rocha et al. (2004) estudaram a variação das dimensões dos elementos anatômicos da madeira de árvores de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden aos sete anos e concluíram, para a avaliação axial (base-topo das árvores), que os maiores valores das dimensões das fibras foram observados entre 0% e 25% da altura comercial; os maiores comprimentos de vaso e a menor frequência foram encontrados a 25% da altura comercial; os vasos mais largos foram verificados a 75% da altura comercial; os raios mais altos e mais largos foram encontrados a 50%, enquanto os mais frequentes a 100% da altura comercial. Maiores valores de Índice de Runkel e fração parede foram observados nas posições mais altas do tronco (50%, 75% e 100%).

Estudando a variação das dimensões dos elementos anatômicos da madeira de *Eucalyptus dunnii* aos sete anos de idade, Florsheim et al. (2009) concluíram que, na avaliação base-topo das árvores, a 50% da altura comercial, foram encontradas fibras mais longas e de maior diâmetro tangencial e maior comprimento de elementos de vaso; a 75% da altura comercial, ocorreram vasos de maiores diâmetros; já a 100% da altura comercial observaram-se fibras mais curtas e com menores diâmetros e lumens, além de maior frequência de vasos. Os raios mais altos e mais largos foram encontrados a 50%, os mais frequentes

na base. Maiores valores de índice de Runkel e fração parede foram observados nas posições mais baixas do tronco.

4.4.2 Variação das dimensões das fibras no sentido medula casca

O modelo de variação medula-casca mais comum se caracteriza pelo aumento do comprimento das fibras em direção à casca. Resultados similares foram encontrados por Bamber & Humphrey (1963), Brasil & Ferreira (1972), Malan & Gericher (1987), Bhat et al. (1990), Shimoyama (1990) e Rocha et al. (2004).

O mesmo padrão foi descrito por Tomazello Filho (1987), verificando aumentos no comprimento das fibras no sentido radial, sem haver uma estabilização até o 10º ano. Os parâmetros largura e espessura da parede das fibras tenderam a aumentar no sentido medula-casca, não sendo observado um modelo de variação para o diâmetro do lúmen. Contudo, Rao et al. (2002) verificaram que os parâmetros anatômicos avaliados em *E terenticornis* não foram afetados pela posição no raio.

Verifica-se, novamente, que existe muita controvérsia com relação à variação das dimensões das fibras no sentido radial do tronco, as quais estão diretamente relacionadas à espécie, à idade, ao sítio, ao tipo de amostragem considerada, entre outros fatores, tal qual ocorre para densidade básica.

Estudando a variação das dimensões dos elementos anatômicos da madeira de árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden aos sete anos, Rocha et al. (2004) descreveram que, na direção radial (medula-casca), todas as dimensões das fibras apresentaram tendência crescente; nos vasos, a tendência crescente foi observada para comprimento e diâmetro tangencial e decrescente para frequência; os maiores valores das dimensões dos raios foram verificados na região da medula e a frequência apresentou tendência decrescente.

A variação das dimensões das fibras e dos vasos da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden com quatro diferentes idades foi estudada por Silva et al. (2007), os quais concluíram que o comprimento, a espessura da parede das fibras e o diâmetro dos vasos mostraram-se positivamente correlacionados com a idade e com a posição radial (medula-casca) e que as variações observadas na posição radial foram mais destacadas que as observadas entre as diferentes idades.

Estudando a estrutura anatômica da madeira de clones de *Eucalyptus*, Alzate (2009) descreve que houve aumento do comprimento e da largura das fibras da medula até 75% do raio e posterior tendência à estabilização. Houve aumento da espessura da parede e redução do diâmetro do lume das fibras até 50%-75% do raio das amostras e os maiores comprimento, largura e espessura da parede das fibras ocorreram nos clones de *E. grandis*, seguidos do híbrido; nos clones de *E. saligna*, o diâmetro do lume das fibras foi superior. Os clones mostraram grande homogeneidade nas dimensões das fibras.

Florsheim et al. (2009) estudaram a variação das dimensões dos elementos anatômicos da madeira de *Eucalyptus dunnii* aos sete anos de idade e observaram, para a avaliação medula-casca, que todas as dimensões das fibras apresentaram tendência crescente neste sentido; os vasos apresentaram tendência crescente para comprimento e diâmetro tangencial e decrescente para frequência; os maiores valores da altura dos raios foram crescentes e mais largos próximos à medula e a frequência apresentou tendência decrescente.

Sette Júnior et al. (2009), estudando o efeito da aplicação de potássio e sódio nas características do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill, aos 24 meses de idade concluíram que, no sentido medula-casca das amostras do lenho das árvores de eucalipto, as fibras de menor largura (16,1–17,4 μm) estão próximas à medula e as de maior largura (17,9–19,3 μm) próximas à casca, sem

apresentar diferenças significativas entre os tratamentos, exceto a 50% do raio, com valor significativamente maior nos tratamentos 2 e 3.

Segundo os mesmos autores, o diâmetro do lume das fibras mostrou tendência de aumento no sentido radial das amostras do lenho dos eucaliptos, sendo significativamente menor a 50% do raio no tratamento 1 (9,7 μm) em relação aos tratamentos 2 e 3, com 11,5 e 11,7 μm , respectivamente. Com relação à espessura da parede das fibras, os autores não visualizaram um modelo de variação, com diferenças significativas a 50% do raio nos tratamentos 2 e 3 (3,7 e 3,4 μm) e a 100% nos tratamentos 1 e 2 (3,5 e 3,9 μm). O comprimento das fibras mostrou tendência de aumento no sentido radial, com diferenças nas regiões próximas à medula e à casca, para os tratamentos 1 e 2 e posição intermediária nos tratamentos 2 e 3.

4.5 Composição química da madeira

A madeira é constituída, aproximadamente, de 50% de carbono, 6% de hidrogênio, 44% de oxigênio e 1% de nitrogênio. Esta composição mantém-se mais ou menos constante, independentemente da espécie, de diferenças genéticas ou da idade. Além desses elementos, encontram-se pequenas quantidades de cálcio, potássio, magnésio e outros, constituindo as substâncias minerais existentes na madeira (Klock et al., 2005).

Do ponto de vista da análise dos componentes da madeira, deve-se fazer distinção entre os componentes macromoleculares constituintes da parede celular, que são celulose, hemicelulose e lignina.

A celulose é o componente majoritário, perfazendo aproximadamente a metade das madeiras tanto de coníferas, como de folhosas. É caracterizada como um polímero linear de alto peso molecular, constituído exclusivamente de β -D-glucose. Devido às suas propriedades químicas e físicas, bem como à sua

estrutura supramolecular, preenche sua função como o principal componente da parede celular dos vegetais (Klock et al., 2005).

Segundo o mesmo autor, as hemiceluloses estão em estreita associação com a celulose na parede celular. Suas cadeias moleculares são muito mais curtas que a de celulose, podendo existir grupos laterais e ramificações em alguns casos. As folhosas, de maneira geral, contêm maior teor de polioses que as coníferas e sua composição é diferenciada.

Outro constituinte da parede celular é a lignina, que é um polímero de natureza aromática e tridimensional, com alto peso molecular, que tem como base estrutural unidades de fenil-propano ligadas a grupos metoxílicos e hidroxílicos, dependendo do tipo de madeira. A lignina encontra-se intimamente associada aos carboidratos da madeira (hemiceluloses), não só por meio de entrelaçamento físico, mas também de ligações químicas (Barrichelo & Brito, 1985). A lignina se apresenta como o componente mais hidrofóbico da madeira, atuando como material cimentante ou adesivo entre as fibras (Pettersen, 1984), além de conferir dureza e rigidez à parede celular.

A composição química da madeira exerce considerável influência sobre as propriedades físico-químicas do carvão vegetal. Normalmente, quando se carboniza uma madeira rica em lignina, obtém-se um elevado rendimento gravimétrico e carvão com alto teor de carbono. Este fato está relacionado com a maior resistência à decomposição térmica que a lignina possui, em relação aos demais constituintes estruturais da madeira (Andrade, 1993).

Poucas são as informações disponíveis na literatura sobre a variação do teor de lignina, tanto no sentido longitudinal como no sentido radial do tronco.

Vital et al. (1994) estudaram a variabilidade genética das características de crescimento e as características da madeira e do carvão vegetal de 25 progênies de *Eucalyptus camaldulensis* Dehn, e concluíram que a densidade básica média foi igual a $0,48 \text{ g/cm}^3$; os teores médios de lignina e holocelulose

foram, respectivamente, iguais a 29,65% e 70,35% e que a carbonização da madeira produziu, em média, 32,36% de carvão com 72,28% de carbono fixo, 22,95% de material volátil e 0,77% de cinzas.

Trugilho et al. (1996), estudando a variação das características físico-químicas da madeira de *Eucalyptus* com a idade, encontraram correlação negativa entre densidade básica e teor de lignina, sugerindo que madeiras com elevados teores de lignina possuem densidades básicas menores. Esses autores concluíram que as características químicas da madeira estão sujeitas a grandes variações iniciais na madeira juvenil, tendendo a valores mais estáveis na madeira adulta.

Os demais componentes da madeira presentes em menor quantidade são compostos de baixo peso molecular denominados extrativos, encontrados notadamente na casca e abrangendo terpenos, óleos, graxas, taninos, corantes e outros.

Segundo Pereira et al. (2000), os extrativos são compostos químicos acidentais, considerados não essenciais para a estrutura das paredes celulares e lamela média; são solúveis em água ou outros solventes orgânicos neutros. Entre os extrativos, citam-se os terpenos, as resinas, os óleos voláteis, as graxas, as ceras e os taninos.

Os extrativos compõem uma extraordinária diversidade de compostos. As proporções exibem ampla variação e alguns desses componentes são encontrados em quantidade significativa somente em algumas espécies ou gêneros. Assim, determinadas madeiras podem ser caracterizadas pela natureza e quantidade de seus extrativos. Os extrativos ocorrem na casca, nas folhas e em acículas, flores, frutos e sementes e quase sempre as quantidades nessas partes da árvore são proporcionalmente maiores que na madeira. A pesquisa sobre os extrativos da madeira tem tido sua motivação para a descoberta e a caracterização de novas estruturas químico-orgânicas, a classificação

taxonômica de espécies, os processos de crescimento da árvore, a obtenção de novos produtos e subprodutos de valor comercial e a determinação dos problemas quando de alguns usos da madeira (Klook et al., 2005).

Os extrativos são resultados de modificações sofridas pelos carboidratos no processo fisiológico da árvore. Os locais de formação e posterior deslocamento para um local definitivo na madeira dependem da função do extrativo. Se o extrativo consiste numa substância de reserva, seu teor atinge um valor máximo pouco antes de se iniciar a estação desfavorável e passa pelo seu mínimo ao final desta estação.

As resinas das madeiras de folhosas estão localizadas nas células de parênquima do raio que estão conectados com os vasos. São constituídas, geralmente, por gorduras, ceras e esteroides. A acessibilidade das substâncias de impregnação depende das dimensões dos poros bem como da estabilidade mecânica das células do parênquima do raio. Variações consideráveis ocorrem entre diferentes espécies. O cerne das folhosas é rico em polifenóis e em extrativos gordurosos que formam as tiloses.

Em relação ao uso da madeira, quanto maior o teor de lignina e de extrativos, menor será o rendimento em celulose, prejudicando, assim, a qualidade do papel produzido; para a produção de carvão vegetal, teores altos de extrativos contribuem para um maior poder calorífico; no processo de colagem de madeiras, os extrativos podem influenciar negativamente, contaminando a superfície a ser colada.

Almeida & Silva (2001), examinando o efeito da quantidade de extrativos e da acessibilidade do licor na polpação Kraft de clones de *Eucalyptus*, encontraram valores médios de 2% de extrativos totais.

Segundo Lima et al. (2007), os extrativos voláteis chamados óleos essenciais, que são responsáveis pelo odor característico das plantas, estão presentes em quantidades significativas nas gimnospermas e em menor

proporção nas angiospermas. Esses compostos constituem terpenos, álcoois, ésteres, aldeídos, cetonas, ácidos orgânicos, hidrocarbonetos alifáticos e fenóis de baixa massa molecular.

Ferreira et al. (2006) analisaram a avaliação tecnológica de clones de eucalipto e descrevem que, em média, os valores encontrados para os extrativos totais foram de 0,33%.

Silvério et al. (2006) estudaram uma metodologia de extração e determinação do teor de extrativos em madeiras de eucalipto e verificaram que, para o *E. urophylla* x *E. grandis*, a mistura de tolueno:etanol (2:1) foi mais eficiente para a remoção de extrativos totais, que foi de 2,23%.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Material biológico

Foram amostradas 50 árvores de um clone de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis* aos seis anos de idade, plantado em espaçamento 3 x 2 m, procedente do grupo ArcelorMittal Florestas. O clone foi plantado em área localizada em Martinho Campos, estado de Minas Gerais. No local de amostragem foi lançada uma parcela de 10 linhas x 10 plantas, onde foi mensurado o diâmetro de todas as árvores para a classificação por diâmetro.

Foram consideradas três classes diamétricas e o número de árvores amostradas por classe foi definido pelo percentual participativo em relação à população, como se observa na Tabela 1. Definido o número de indivíduos por classe diamétrica, foram selecionadas aquelas árvores que se encontravam dentro desses intervalos.

TABELA 1 Distribuição das árvores do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, nas classes diamétricas.

Classe (cm)	Centro de classe (cm)	Frequência	Participação na parcela (%)
12,8 a 17,0	14,2	23	47
9,7 a 12,7	11,4	19	38
3,1 a 9,5	8,1	8	15
Total		50	100

5.2 Determinação da proporção de cerne e alburno

As proporções de cerne e alburno foram determinadas nas alturas de 0,7; 0,9; 1,1; 1,3 e 1,5 m a partir do solo e por classe diamétrica. Foram mensurados os perímetros externos e também demarcados e mensurados os limites do cerne e

do alburno em cada disco, para a determinação da sua área, utilizando para tal o software AutoCAD®.

5.3 Determinação da densidade aparente por raios X

O estudo foi desenvolvido no Laboratório de Identificação e Anatomia da Madeira do Departamento de Ciências Florestais, da ESALQ/USP. As baguetas, retiradas das árvores a altura de 1,30 m do solo por meio de um trado motorizado, foram coladas em suporte de madeira e seccionadas com 2,0 mm de espessura, em serra circular dupla paralela.

As seções transversais do lenho foram acondicionadas em câmara climática com temperatura de 20°C e umidade relativa de 50% UR, até atingirem 12% de umidade. Após a climatização, as amostras foram dispostas sobre filme de raios X (Kodak, Mamography Film MIN-R 2000, 180x240 mm), com uma cunha de calibração de acetato de celulose (densidade: 1,48 g/cm³), em condições de câmara escura. As amostras do lenho e a cunha de calibração foram transferidas para equipamento de raios X (Hewlett Packard, Faxitron 43805 N; 1,20 m distância da fonte de raios X-filme) e irradiadas (5 minutos de exposição, 16 Kv de tensão aceleradora no tubo, 3 mA de corrente de aquecimento do cátodo). Os filmes radiográficos das amostras de madeira e cunha de calibração foram revelados em aparelho Macrotec MX-2, segundo os procedimentos descritos por Amaral & Tomazello Filho (1997).

Para a análise dos filmes radiográficos das amostras do lenho, eles foram digitalizados em scanner Hewlett Packard ScanJet 6100C/T, a uma resolução de 1.000 dpi (pixel por polegada), em escala de cinza de 256 graus. Na imagem digitalizada foram feitas comparações entre a escala de cinza das amostras de madeira com a da curva padrão, cujos valores de densidade são conhecidos (densidade média de 1,48 g/cm³), sendo determinados os valores de densidade e são convertidos para o arquivo tipo DEN, por meio do software CRAD. Na

sequência, o arquivo DEN é lido com auxílio do software CERD, considerando 500 pontos de determinação de valores de densidade ao longo do comprimento de uma seção da amostra do lenho (eixo X) e 10 em sua altura (eixo Y), para os segmentos de 25% do comprimento total. As análises das seções transversais do lenho originam um arquivo tipo TXT contendo os valores pontuais de densidade e os respectivos gráficos dos perfis de densidade aparente do lenho de todos os raios das árvores obtidos por meio do Microsoft Office Excel (Chagas, 2009).

5.4 Determinação das dimensões das fibras

Utilizaram-se os discos retirados a 1,30 m de altura do solo (DAP), sendo amostrados os dois lados em relação à medula. Para a medição das dimensões das fibras, foi produzido um macerado com o material proveniente das áreas de crescimento, três a quatro posições, dependendo do diâmetro do disco, conforme Figura 1. As amostras foram cobertas com uma solução composta de ácido acético glacial e peróxido de hidrogênio 60 volumes na proporção de 5:1 e deixadas em estufa, a 40°C, durante 48 horas, para a produção do macerado.



FIGURA 1 Esquema da retirada das amostras na amostragem radial nos discos a 1,30 m de altura do solo (DAP) em (A) e amostras (B) na madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.

Foram preparadas lâminas histológicas com as fibras de cada posição radial considerada, sendo medidas, no total, 30 fibras por região. As dimensões das fibras (comprimento, espessura de parede, largura e diâmetro do lume) foram obtidas em equipamento de análise de imagens, microscópio trinocular com câmara e monitor de vídeo, utilizando-se o software de análise de imagem “Image Pro-plus” para as medições.

5.5 Determinação dos teores de extrativos e lignina

Para a determinação dos teores de extrativos e lignina foram retiradas amostras no sentido longitudinal a 2%, 10%, 30% e 70% da altura comercial da árvore e, no sentido radial de cada posição longitudinal, o número de amostras foi dependente do diâmetro do disco. Essa amostragem alternativa a 2%, 10%, 30% e 70% da altura comercial da árvore foi escolhida, pois foram os pontos com melhores resultados encontrados no trabalho de Pádua (2009). Para o presente trabalho, foi utilizado o mesmo clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.

Para a análise, todo o material foi transformado em serragem utilizando-se um moinho tipo Wiley. A serragem utilizada foi aquela que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retida na peneira de 60 mesh.

O teor de extrativos foi obtido conforme a norma da Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel - ABTCP (1974), M 3/69.

O teor de lignina insolúvel (Klason) foi determinado de acordo com o procedimento descrito por Gomide & Demuner (1986). O teor de lignina solúvel em ácido sulfúrico foi determinado por meio da espectrofotometria, sendo utilizada a equação descrita por Goldschimid (1971). A lignina total foi tomada como sendo a soma das ligninas solúvel e insolúvel.

5.6 Análise elementar da madeira

A composição elementar da madeira foi determinada na Central de Análises no Departamento de Química da Universidade Federal de Lavras. Para este procedimento, utilizaram-se três miligramas de serragem, as quais foram adicionadas no equipamento FLASH EA série 1012. Vale ressaltar que a serragem utilizada neste equipamento foi oriunda das amostras retiradas radialmente, a 2%, 10%, 30% e 70% da altura das árvores. Também, para a análise de composição elementar, amostras oriundas do DAP foram utilizadas. Tanto para as amostras retiradas longitudinalmente e radialmente, da amostragem alternativa e do DAP, obtiveram-se os teores de nitrogênio, carbono, hidrogênio, enxofre e, por diferença, o teor de oxigênio.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Proporção de cerne e alburno

Na Tabela 2 encontram-se as proporções de cerne determinadas por altura a partir do solo e por classe diamétrica. Verifica-se que a classe diamétrica 14,2 cm apresentou maior proporção de cerne que as demais classes, tendo a classe 8,1 cm, em média, apresentado 22% de cerne aos seis anos de idade, o que representa menos da metade do observado na maior classe. Este percentual de variação do cerne pode prejudicar a utilização do material para a produção de energia, pois contribuiu com o menor teor de carbono na madeira da classe 8,1 cm, como será discutido mais adiante.

TABELA 2 Proporção de cerne mensurado na madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.

Altura a partir do solo (m)	Cerne (%)		
	Classe 14,2 cm	Classe 11,4 cm	Classe 8,1 cm
0,7	44	36	20
0,9	45	35	19
1,1	46	34	23
1,3	45	34	23
1,5	45	34	20
Média	45	35	22

A variação entre as proporções de cerne já era esperada, devido às variações entre os constituintes da madeira nos sentidos longitudinal (base-topo) e radial (medula-casca). Burger & Richter (1991) afirmam que a proporção de cerne e alburno varia dentro da própria árvore e também com a espécie, a idade, o solo e o clima. Na Figura 2 observa-se a variação da proporção de cerne em relação às classes diamétricas, notando-se que a proporção de cerne tende a aumentar com o aumento da classe diamétrica.

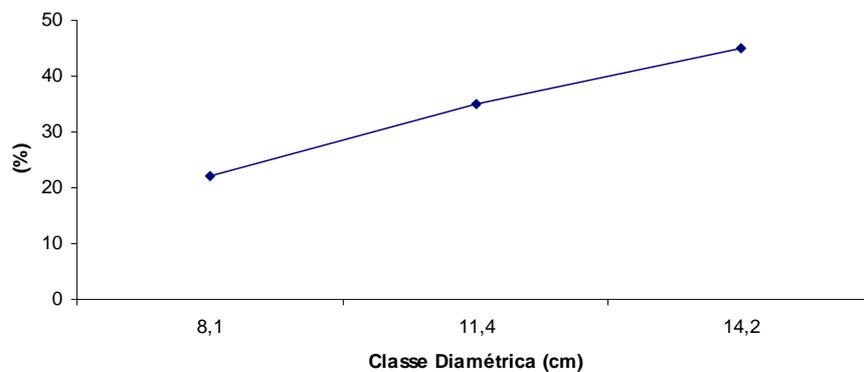


FIGURA 2 Porcentagens de cerne em relação às classes diamétricas na madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.

Avaliando as características dendrométricas de sete espécies de eucaliptos, Oliveira et al. (1999) encontraram uma porcentagem de albúrnio maior no *E. paniculata* com valor de 60% na base e quase 100% na posição média do tronco; elevada porcentagem também para o *C. citriodora*, seguindo-se *E. pilularis*, *E. grandis* e *E. cloeziana*. No presente trabalho, os valores de albúrnio para a classe de 14,2 cm foram, em média, de 55% entre 0,7 e 1,5 m do solo.

Levando-se em consideração a média geral da porcentagem de cerne para as três classes diamétricas, esse valor está abaixo do encontrado por Haselein et al. (2004). Entretanto, a retirada de amostras foi em posições diferentes (0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial e DAP) às deste trabalho.

6.2 Densidade aparente da madeira por raios X

Os valores de densidade aparente média, mínima e máxima das amostras do lenho das árvores por classe diamétrica estão apresentados na Tabela 3.

TABELA 3 Densidade aparente média, máxima e mínima das amostras do lenho das árvores do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.

Classe (cm)	Densidade aparente (g/cm ³)		
	Média	Máxima	Mínima
14,2	0,589	0,989	0,398
11,4	0,576	1,049	0,387
8,1	0,517	0,962	0,357

A densidade aparente tendeu a diminuir com a redução da classe diamétrica, nos valores médios e mínimos, enquanto os valores máximos não apresentaram esse mesmo comportamento. A tendência de redução da densidade com a classe diamétrica foi semelhante à dos valores encontrados para dimensões das fibras. Este fato demonstra uma correspondência direta entre as dimensões das fibras e a densidade aparente da madeira.

Como ilustração, os perfis densitométricos do lenho das amostras diamétricas das árvores 1, 30 e 44, referentes às classes diamétricas 14,2; 11,4 e 8,1 cm, respectivamente, podem ser observados na Figura 3.

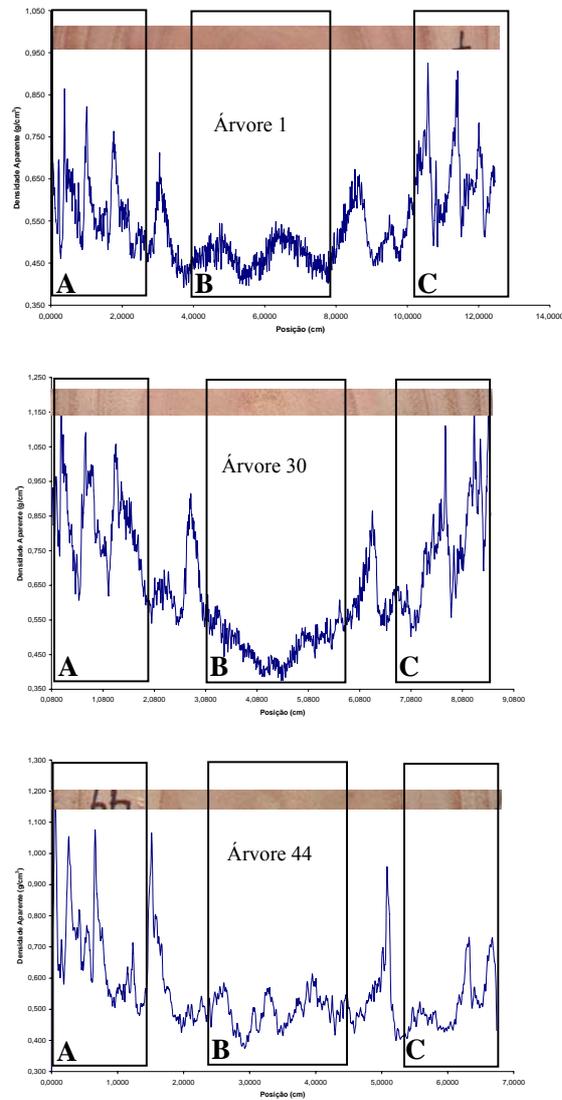


FIGURA 3 Perfil da densidade aparente do lenho das amostras diamétricas por raios X das árvores 1, 30 e 44, referentes às três classes diamétricas, 14,2; 11,4 e 8,1 cm, respectivamente, em que A e C representam a região externa e B, a região interna.

O perfil da densidade aparente do lenho possibilitou verificar importantes respostas das árvores, tais como a presença de picos de densidade delimitando regiões distintas no lenho das mesmas, uma região interna (C), da medula e duas regiões externas (A e B), com variações nos comprimentos dependentes das classes diamétricas, indicando a presença nítida da região medular (B). Tomazello et al. (2008) informam que há ocorrência de menores valores de densidade aparente do lenho na região central, com aumento gradativo em direção à casca; oscilações dos valores radiais devido aos elementos de vaso de maior diâmetro; picos de densidade nas camadas de crescimento de fibras espessadas e menor diâmetro dos vasos, etc.

No entanto, o perfil da variação da densidade aparente verificado neste trabalho foi diferente do observado por Sette Júnior et al. (2009) que, estudando o efeito da aplicação de potássio e sódio nas características do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, aos 24 meses de idade, obtiveram valores mais altos de densidade próximos à medula, seguidos de redução e estabilização, próximo a casca.

As regiões internas do lenho (B) em todas as classes diamétricas estudadas apresentaram modelos semelhantes de variação. Nesses segmentos, a densidade aparente mínima e máxima foi 0,397; 0,375; 0,377 g/cm³ e 0,549; 0,541; 0,587 g/cm³, respectivamente, para as três classes diamétricas.

As regiões externas do lenho (A e C) apresentam modelos de variação da densidade aparente característicos para as três classes diamétricas, além do comprimento diferenciado dos raios. Observa-se que ocorreu um aumento da densidade aparente no sentido medula-casca em todas as amostras.

6.3 Dimensões das fibras

Na Tabela 4 são apresentados os valores médios das dimensões das fibras determinadas a 1,30 m de altura do solo (DAP) nos dois lados em relação

à medula. Verifica-se que os valores dimensionais das fibras da madeira estão de acordo com o normalmente observado para o gênero *Eucalyptus*. Verifica-se que a espessura da parede celular apresentou comportamento idêntico ao da densidade básica da madeira, ou seja, de reduzir com a diminuição da classe diamétrica. O comprimento da fibra apresentou, de modo geral, valor mais elevado na maior classe diamétrica e idêntico nas outras duas classes. A largura e o diâmetro do lume das fibras apresentaram comportamento semelhante, ou seja, maiores valores médios nas classes 14,2 e 8,1 cm e menor na classe 11,4 cm.

TABELA 4 Valores médios de dimensões das fibras nas três classes diamétricas das amostras de madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.

Classe (cm)	Comprimento (mm)	Espessura da parede (μm)	Largura (μm)	Diâmetro do lume (μm)
14,2	1,07	3,87	15,41	7,68
11,4	0,99	3,66	14,55	7,28
8,1	0,99	3,51	14,73	7,7

O gráfico da Figura 4 ilustra a variação da espessura da parede celular das fibras nos dois lados em relação à medula, para a classe diamétrica 14,2 cm.

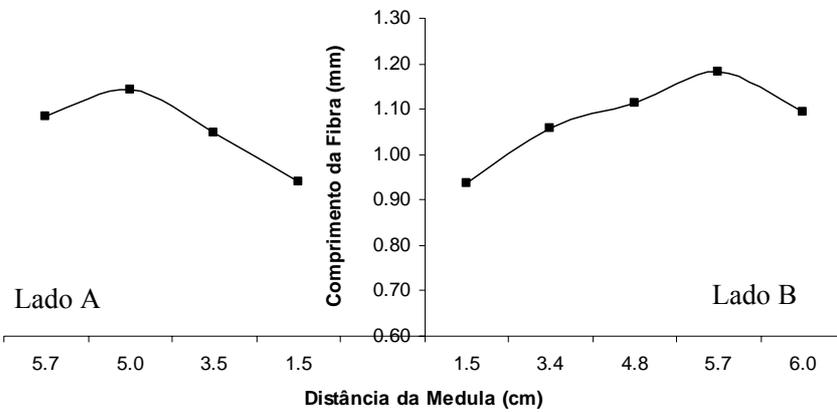


FIGURA 4 Variação radial do comprimento das fibras para os dois lados em relação à medula na altura do DAP, para as amostras de madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, para a classe diamétrica 14,2 cm.

Observa-se, pelo gráfico da Figura 4, que o comprimento das fibras tende a aumentar à medida que se afasta da medula, comportamento já esperado, tendo em vista que a madeira juvenil tende a apresentar fibras de menor comprimento. O mesmo comportamento foi verificado por Malan & Gericher (1987) e Rocha et al. (2004).

Nos gráficos das Figuras 5 e 6 está ilustrada a variação do comprimento das fibras nos dois lados em relação à medula, para as classes 11,4 e 8,1 cm, respectivamente. Pode-se observar que o comportamento foi semelhante ao da classe 14,2 cm, ou seja, tendência de aumento do comprimento das fibras com o afastamento da medula.

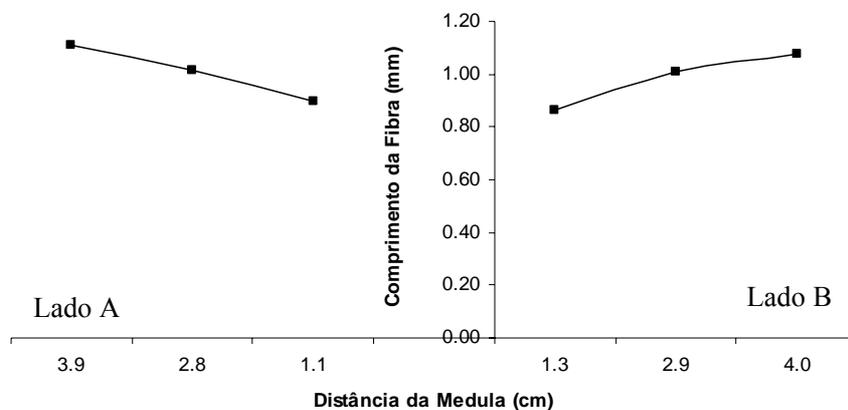


FIGURA 5 Variação radial do comprimento das fibras para os dois lados em relação à medula na altura do DAP para as amostras de madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, para a classe diamétrica 11,4 cm.

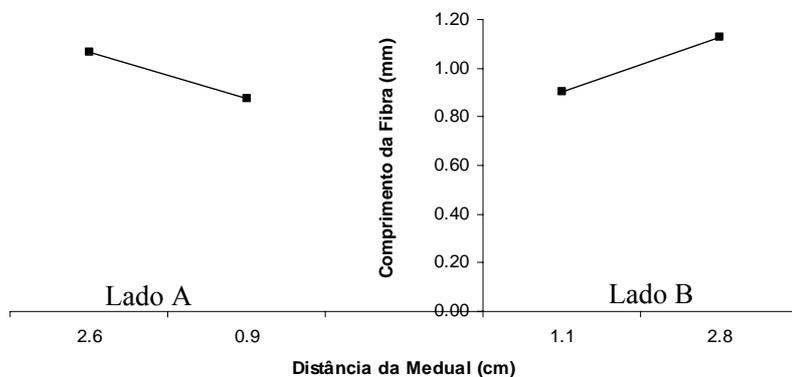


FIGURA 6 Variação radial do comprimento das fibras para os dois lados em relação à medula na altura do DAP, para as amostras de madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, para a classe diamétrica 8,1 cm.

O gráfico da Figura 7 ilustra a variação radial da espessura da parede celular para a classe diamétrica 14,2 cm. Verifica-se que a variação da espessura

da parede celular apresentou comportamento similar ao da densidade básica da madeira. Este mesmo comportamento foi descrito por Trugilho et al. (1996). Este fato explica a razão de a densidade básica apresentar elevada associação com a espessura da parede celular.

Estudando a variação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* spp., nos sentidos longitudinal e radial do tronco, Shimoyama (1990) comenta que as características anatômicas, como as dimensões das fibras, têm maior influência na densidade do que a composição química.

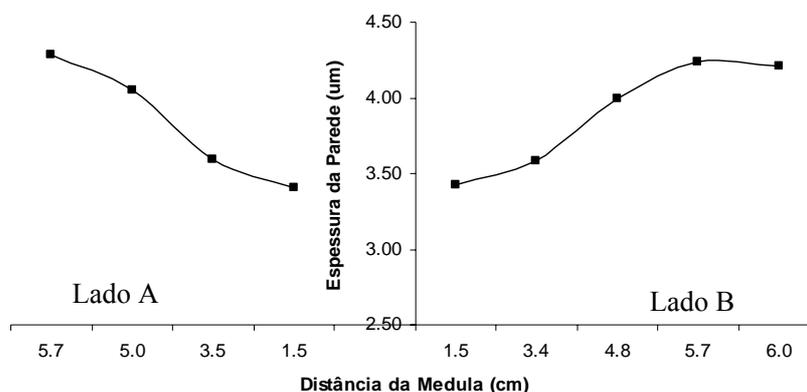


FIGURA 7 Variação radial da espessura da parede celular para os dois lados em relação à medula na altura do DAP, para as amostras de madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, para a classe diamétrica 14,2 cm.

O gráfico das Figuras 8 e 9 ilustram a variação da espessura da parede da fibra, para as classes 11,4 e 8,1 cm, respectivamente. Pode-se observar que o comportamento foi o parecido ao da classe 14,2 cm, ou seja, de aumento da espessura da parede da fibra com o distanciamento da medula.

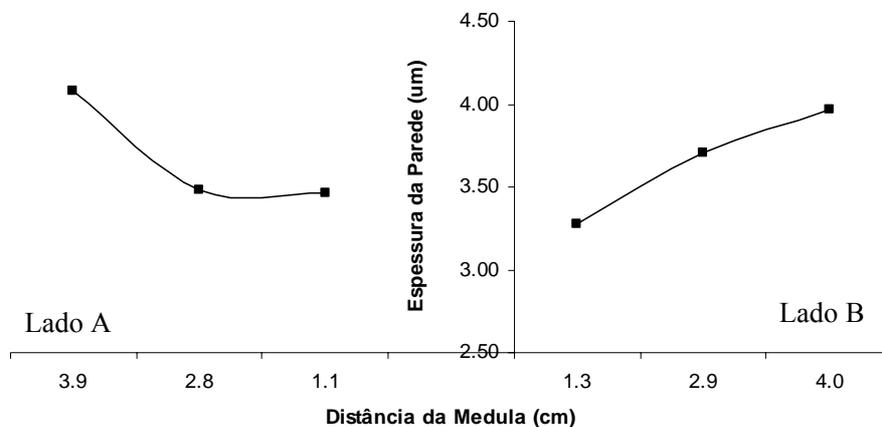


FIGURA 8 Variação radial da espessura da parede celular para os dois lados em relação à medula na altura do DAP, para as amostras de madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, para a classe diamétrica 11,4 cm.

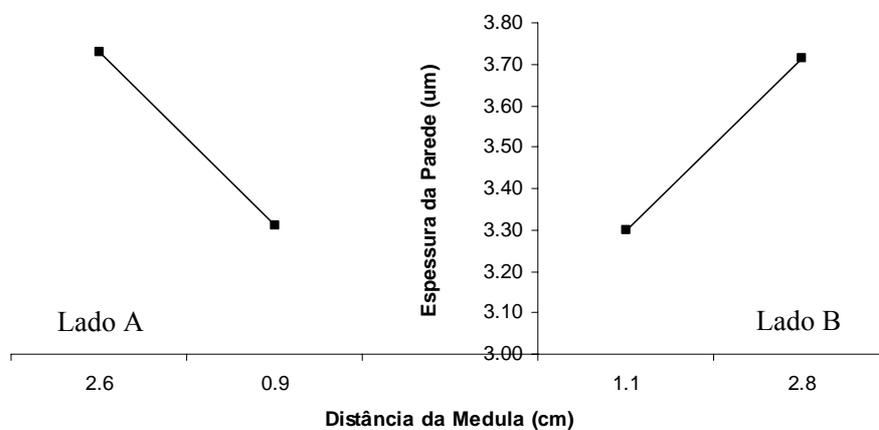


FIGURA 9 Variação radial da espessura da parede celular para os dois lados em relação à medula na altura do DAP, para as amostras de madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, para a classe diamétrica 8,1 cm.

O gráfico da Figura 10 ilustra a variação observada para largura da fibra na classe diamétrica 14,2 cm nos dois lados em relação à medula. Verifica-se tendência de redução dos valores de largura da fibra com o distanciamento da medula.

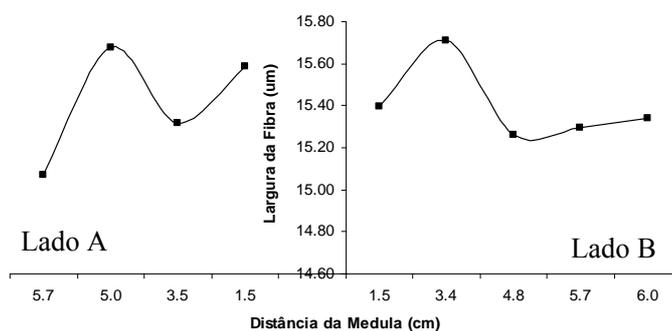


FIGURA 10 Variação radial da largura da parede das fibras para os dois lados em relação à medula na altura do DAP, para as amostras de madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, para a classe diamétrica 14,2 cm.

Os gráficos das Figuras 11 e 12 ilustram a variação da largura das fibras para as classes 11,4 e 8,1 cm, respectivamente. Observa-se que a largura das fibras tende a aumentar com o distanciamento da medula, apresentando desempenho diferente do verificado na classe 14,2 cm.

Ao estudarem a variação das dimensões dos elementos anatômicos da madeira de *Eucalyptus dunnii* aos sete anos de idade, Florsheim et al. (2009) observaram, no sentido medula-casca, que todas as dimensões das fibras apresentaram tendência crescente.

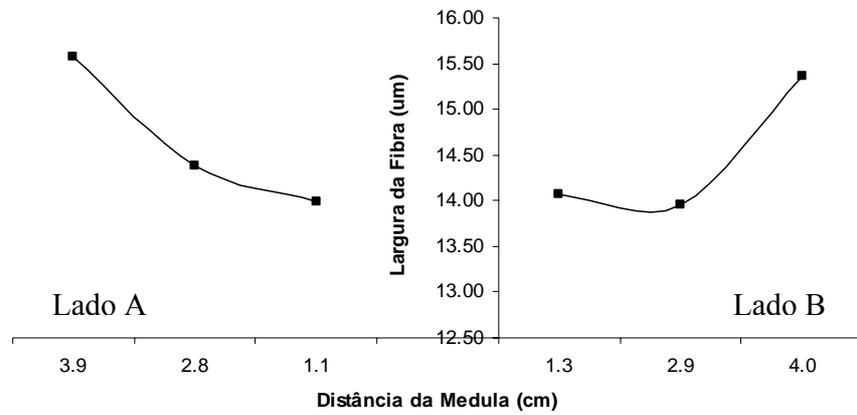


FIGURA 11 Variação radial da largura da parede das fibras para os dois lados em relação à medula na altura do DAP, para as amostras de madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, para a classe diamétrica 11,4 cm.

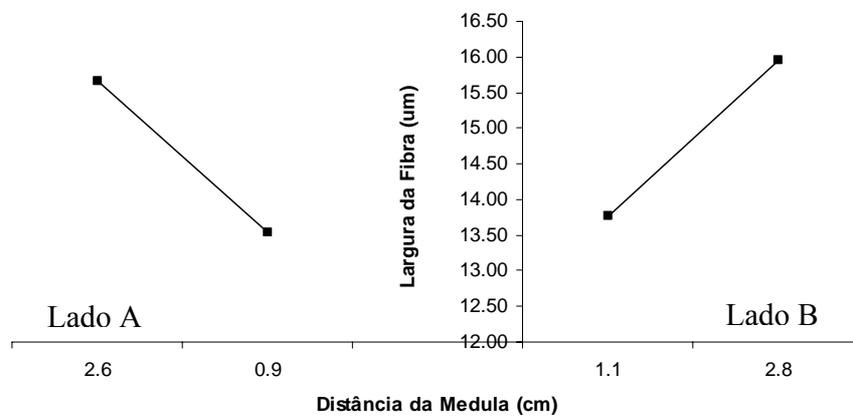


FIGURA 12 Variação radial da largura da parede das fibras para os dois lados em relação à medula na altura do DAP, para as amostras de madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, para a classe diamétrica 8,1 cm.

O gráfico da Figura 13 ilustra a variação observada para o diâmetro do lume das fibras na classe diamétrica 14,2 cm, nos dois lados em relação à medula. Verifica-se que o comportamento do diâmetro do lume foi o inverso do comprimento e da espessura da parede das fibras, ou seja, com tendência de redução à medida que se distancia da medula. Este fato era esperado, pois as características das fibras da madeira mais juvenil, especialmente a produzida nas proximidades da medula, são a pequena espessura de parede, o pequeno comprimento e o grande diâmetro de lume.

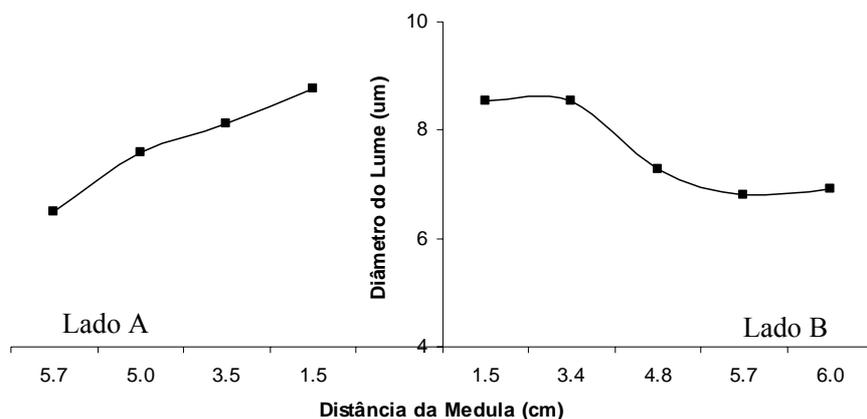


FIGURA 13 Variação radial do diâmetro do lume das fibras para os dois lados em relação à medula na altura do DAP, para as amostras de madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, para a classe diamétrica 14,2 cm.

Os gráficos das Figuras 14 e 15 ilustram a variação do diâmetro do lume das fibras para as classes 11,4 e 8,1 cm, respectivamente. Verifica-se que o comportamento dessas duas classes foi diferente do apresentado pela classe 14,2 cm, ou seja, de aumento com o distanciamento da medula. Este resultado não era

esperado e pode estar relacionado ao pequeno número de amostras utilizadas nessas duas classes diamétricas.

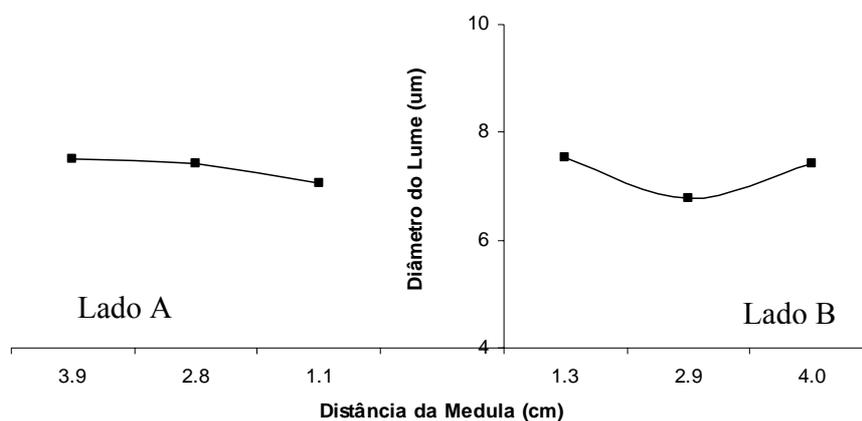


FIGURA 14 Variação radial do diâmetro do lume das fibras para os dois lados em relação à medula na altura do DAP, para as amostras de madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, para a classe diamétrica 11,4 cm.

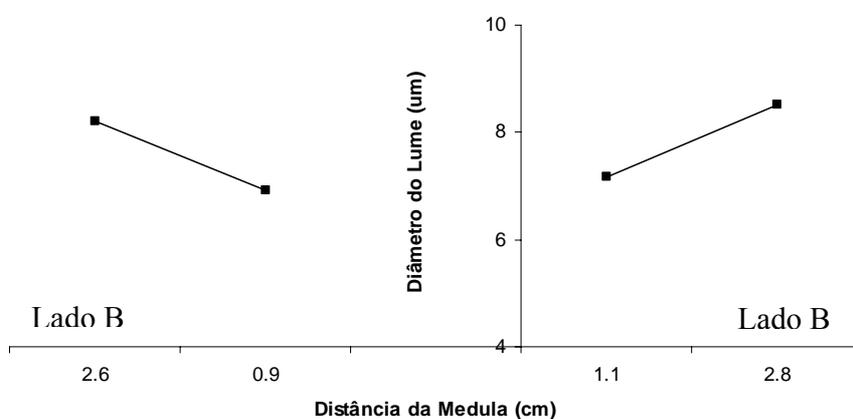


FIGURA 15 Variação radial do diâmetro do lume das fibras para os dois lados em relação à medula na altura do DAP, para as amostras de madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, para a classe diamétrica 8,1 cm.

Os dados encontrados neste trabalho estão de acordo com os da literatura, em que, de forma geral, as dimensões das fibras apresentam tendência crescente com o distanciamento da medula, como foi verificado por Rocha et al. (2004), Alzate (2009), Florsheim et al. (2009) e Sette Júnior et al. (2009).

6.4 Composição química da madeira: variação longitudinal e radial do teor de extrativos, lignina e cinzas

Na Tabela 5 são apresentados os valores médios dos teores de extrativos totais por posição radial e longitudinal de amostragem para as classes diamétricas. Observa-se que existe variação nos teores de extrativos totais, tanto no sentido radial como no longitudinal de amostragem.

Como se observa na classe de 14,2 cm, de forma geral, os valores de extrativos totais tendem a diminuir na direção medula-casca. O mesmo comportamento foi observado para as classes de 11,4 e 8,1 cm.

Para a classe 14,2 cm, ocorre uma redução inicial, seguida por um aumento nos valores de extrativos totais da base para o topo das árvores. As classes de 11,4 e 8,1 cm também apresentaram esse comportamento.

Considerando as três classes diamétricas, o valor médio de teor de extrativos foi de 2,91 %, diferente dos encontrados na literatura, como, por exemplo, por Silvério et al. (2006) que, estudando a metodologia de extração e determinação do teor de extrativos em madeiras de *Eucalyptus urophylla*, *E. camaldulensis* e *E. urophylla* x *E. grandis*, relatou 2,23%.

TABELA 5 Valores médios percentuais dos teores de extrativos totais por posição radial e longitudinal da madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.

		Classe 14,2 cm											
Altura (%)	Lado A	Distância da medula (cm)										Lado B	
		6,0	5,7	5,0	3,5	1,5	1,5	3,4	4,8	5,7	6,0		
2	3,80	3,27	2,41	4,37	4,26	4,7	5,01	4,65	4,39	2,97	2,94	3,99	
10	2,93	1,85	2,18	3,92	2,58	4,12	4,01	2,67	3,9	1,82	2,72	3,02	
30	2,66		2,32	1,83	2,91	3,59	2,82	2,68	1,45	2,27		2,31	
70	2,88				3,32	2,44	3,3	1,99				2,65	
Média		2,56	2,30	3,37	3,27	3,71	3,79	3,33	3,25	2,40	2,83		
		Classe 11,4 cm											
Altura (%)	Lado A	Distância da medula (cm)										Lado B	
2	3,96		2,9	3,88	4,63	4,41	5,14	4,95	1,84	1,69		3,41	
10	3,04		2,44	2,66	3,16	3,92	3,27	3,13	1,86	4,14		3,10	
30	2,61			2,82	2,61	2,41	2,75	2,30	2,43			2,49	
70	2,15				2,33	1,97	3,27	2,52				2,89	
Média			2,67	3,12	3,18	3,18	3,61	3,22	2,04	2,91			
		Classe 8,1 cm											
Altura (%)	Lado A	Distância da medula (cm)										Lado B	
2	4,50			2,90	4,33	6,28	6,34	2,70	2,61			3,88	
10	2,96			2,91	2,78	3,19	3,15	3,19	2,75			3,03	
30	1,88			1,32	2,43	1,90	2,10	2,31	1,83			2,08	
70	1,63				1,91	1,34	1,21	2,66				1,94	
Média				2,38	2,86	3,18	3,20	2,71	2,40				

Na Figura 16 observa-se a variação radial para os teores de extrativos totais da madeira dentro da classe 14,2 cm por altura relativa. Pode-se verificar tendência de redução do teor de extrativos com o distanciamento da medula em todas as alturas consideradas, exceto para 70% da altura comercial do tronco. Na posição mais próxima da casca ocorreu tendência de aumento no teor de extrativos, o que pode estar relacionado a maiores teores de açúcares nestes locais, próximo do câmbio vascular. Na parte voltada para a medula, a maior quantidade de extrativos deve estar relacionada à formação do cerne e, portanto, maior quantidade de polifenóis deve estar presente.

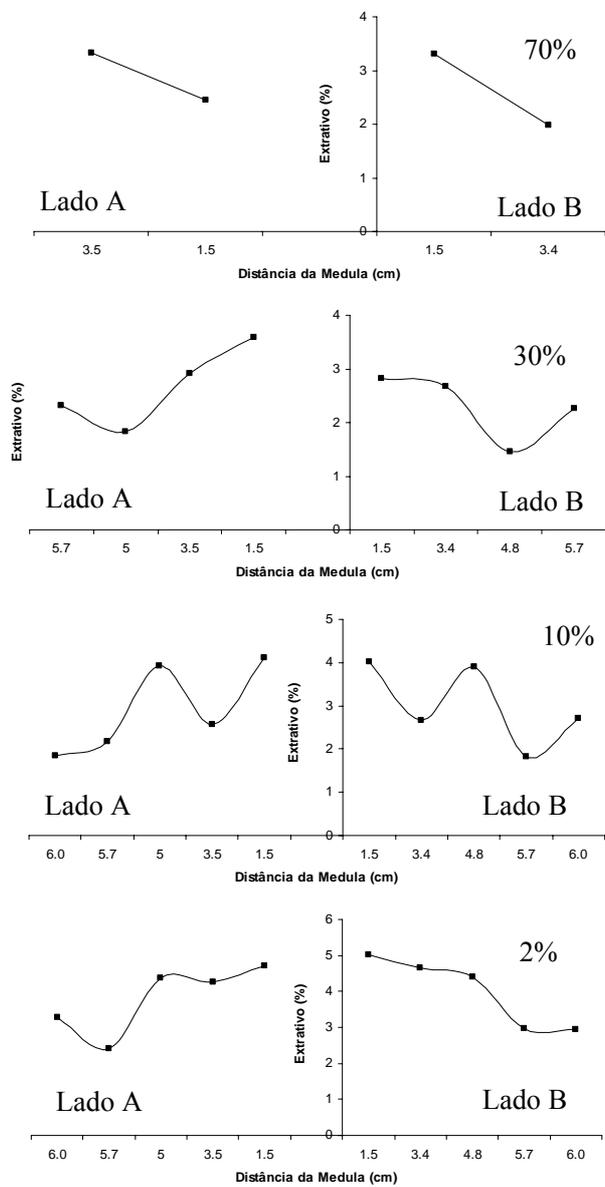


FIGURA 16 Variação radial para o teor de extrativos totais da madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, para a classe diamétrica 14,2 cm.

A variação longitudinal do teor de extrativos totais para a classe 14,2 cm está ilustrada na Figura 17. Verifica-se que o teor de extrativos totais tende a reduzir com a altura até 30% e aumenta em 70% da altura comercial do tronco da árvore. Esse aumento deve estar relacionado com a maior quantidade de açúcares nas maiores alturas do tronco, mais próximo ao meristema apical.

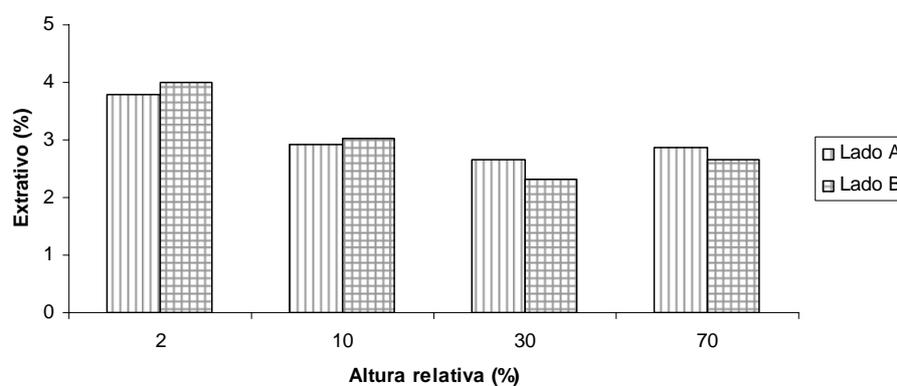


FIGURA 17 Variação longitudinal do teor de extrativos totais na madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, para a classe diamétrica 14,2 cm.

Na Figura 18 observa-se a variação radial para o teor de extrativos totais da madeira para a classe 11,4 cm por altura relativa. Pode-se notar uma tendência de redução do teor de extrativos com o distanciamento da medula para 2% e 10% da altura comercial do tronco da árvore. Para 2% da altura relativa, essa tendência é mais nítida. Em 10% da altura relativa (lado B), ocorreu um aumento brusco na posição mais próxima da casca, que pode ter sido provocado pela presença de bolsas de resina (quino), muito comum na madeira de *Eucalyptus*. Na posição mais próxima da casca ocorre uma tendência de aumento no teor de extrativos, o que pode estar relacionado a maiores teores de açúcares nestes locais, próximo do câmbio vascular. Na parte voltada para a

medula, a maior quantidade de extrativos deve estar relacionada à formação do cerne e, portanto, maior quantidade de polifenóis. Esses resultados são semelhantes aos observados na classe 14,2 cm.

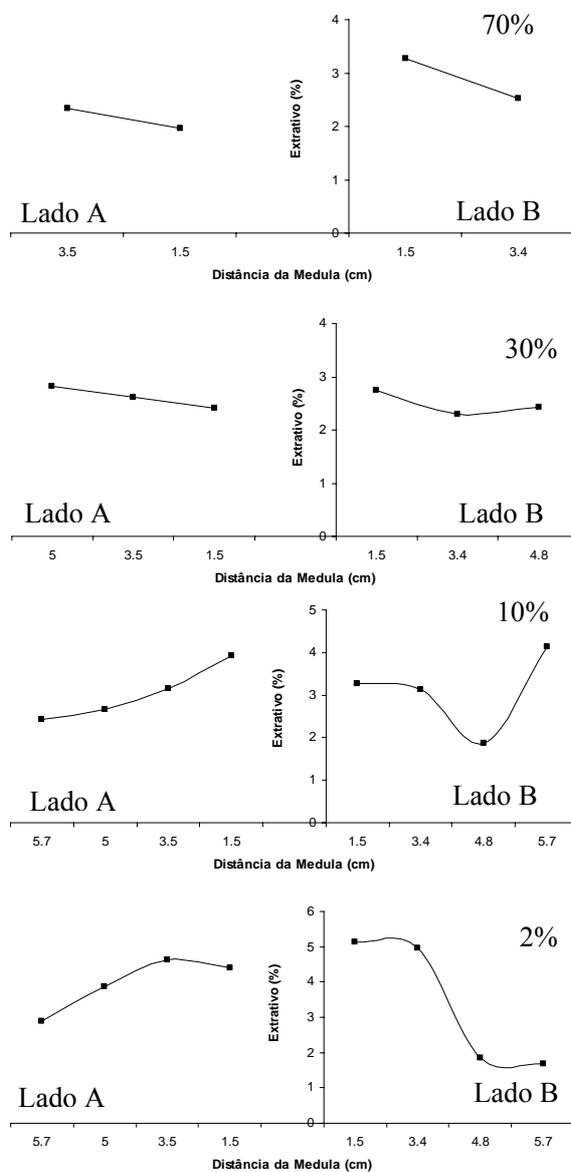


FIGURA 18 Variação radial do teor de extrativos totais na madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, para a classe diamétrica 11,4 cm.

No gráfico da Figura 19 observa-se a variação longitudinal do teor de extrativos totais para a classe 11,4 cm. Verifica-se que o teor de extrativos totais tende a reduzir com a altura até 30% e aumenta em 70% da altura comercial do tronco da árvore. Esse aumento deve estar relacionado com a maior concentração de carboidratos de baixo peso molecular nas maiores alturas do tronco, próximo do meristema apical. Este resultado foi parecido ao observado para a classe 14,2 cm.

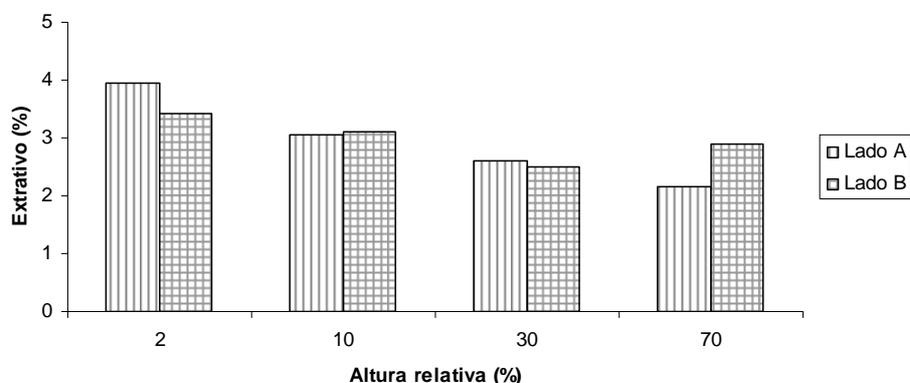


FIGURA 19 Variação longitudinal do teor de extrativos totais na madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, para a classe diamétrica 11,4 cm.

A variação radial para o teor de extrativos totais da madeira para a classe 8,1 cm por altura relativa é apresentada na Figura 20. Pode-se verificar que a variação foi semelhante à observada nas duas classes diamétricas discutidas anteriormente. Na posição mais próxima da casca ocorre uma tendência de aumento no teor de extrativos, o que pode estar relacionado a maiores teores de açúcares nestes locais, próximo do câmbio vascular. Observa-se maior teor de extrativos a 2% da altura relativa em relação às classes 14,2 e 11,4 cm, o que reforça a ideia de que esses extrativos são formados principalmente por carboidratos de baixo peso molecular presentes no alburno, tendo em vista que a

classe diamétrica de 8,1 cm apresenta porcentagem baixa de cerne. De modo geral, os resultados foram semelhantes aos observados nas classes de 11,4 e 14,2 cm.

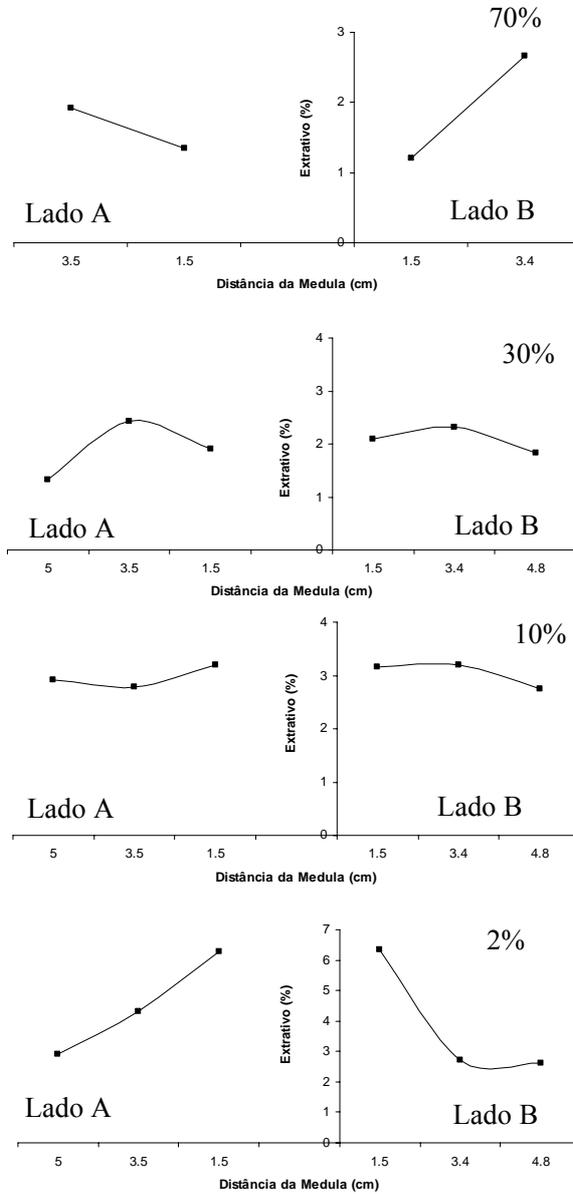


FIGURA 20 Variação radial do teor de extrativos totais na madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, para a classe diamétrica 8,1 cm.

Pelos gráficos das Figuras 16, 18 e 20 observa-se que a variação radial para o teor de extrativos foi parecida em todas as classes diamétricas, tendendo sempre em ligeira redução da medula para a casca.

No gráfico da Figura 21 está ilustrada a variação longitudinal do teor de extrativos totais para a classe 8,1 cm. Verifica-se que o teor de extrativos totais tende a reduzir consideravelmente com a altura relativa, tendendo a estabilizar a 70% da altura comercial do tronco da árvore. Para essa classe diamétrica, o comportamento do teor de extrativos não foi diferente das classes 11,4 e 14,2 cm.

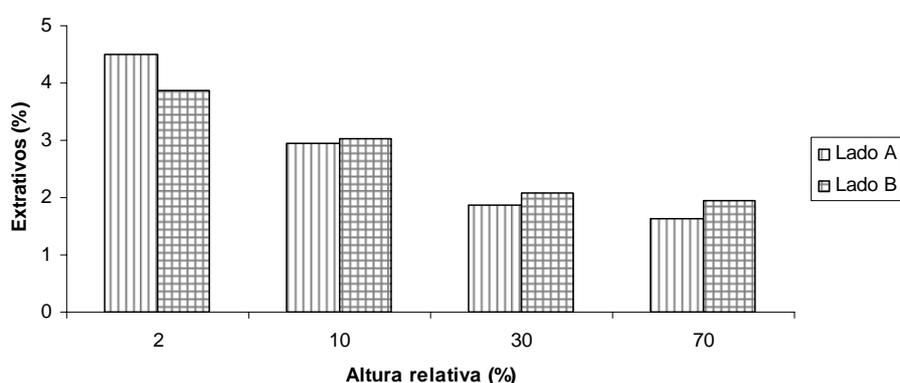


FIGURA 21 Variação longitudinal do teor de extrativos totais na madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, para a classe diamétrica 8,1 cm.

Na Tabela 6 são apresentados os valores médios do teor de lignina insolúvel por altura relativa, posição radial de amostragem e classe diamétrica. Observa-se que ocorre tendência de redução do teor de lignina insolúvel com a altura relativa da árvore, para todas as classes diamétricas. De modo geral, o teor de lignina insolúvel não variou muito com a distância da medula. Porém, os

maiores teores se concentraram nas posições mais internas do tronco, nas três classes diamétricas estudadas.

Na Tabela 7 são apresentados os valores médios do teor de lignina solúvel por altura relativa, posição radial de amostragem e classe diamétrica. Verifica-se que o teor de lignina solúvel não apresenta um padrão de variação definido.

Os valores médios do teor de lignina total e a soma do teor de lignina insolúvel e solúvel por altura relativa, posição radial de amostragem e classe diamétrica são apresentados na Tabela 8. O comportamento do teor de lignina total foi semelhante ao observado para a lignina insolúvel.

TABELA 6 Valores médios do teor de lignina insolúvel (%) por altura relativa, posição radial de amostragem e classe diamétrica na madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.

		Classe 14,2 cm										
Altura (%)	Lado A	Distância da medula (cm)										Lado B
		6,0	5,7	5,0	3,5	1,5	1,5	3,4	4,8	5,7	6,0	
2	28,16	25,83	20,63	31,30	34,87	28,17	32,30	30,63	28,73	24,50	27,50	28,73
10	28,67	33,40	24,57	27,60	26,80	30,97	27,23	28,33	32,63	24,10	32,20	28,90
30	26,92		29,27	25,43	24,87	28,10	28,40	25,57	27,10	23,60		26,17
70	26,97				26,27	27,67	27,00	25,60				26,30
Média		29,62	24,82	28,11	28,20	28,73	28,73	27,53	29,49	24,30	29,85	
		Classe 11,4 cm										
Altura (%)	Lado A	Distância da medula (cm)										Lado B
2	29,31		28,53	30,23	29,20	29,27	27,17	22,50	27,67	23,97		25,32
10	26,81		25,50	23,77	28,90	29,07	31,67	31,33	25,20	27,37		28,89
30	25,68			24,50	25,87	26,67	27,03	26,07	26,53			26,54
70	26,05				26,90	25,20	26,83	25,40				26,12
Média			27,02	26,17	27,72	27,55	28,18	26,32	26,47	25,67		
		Classe 8,1 cm										
Altura (%)	Lado A	Distância da medula (cm)										Lado B
2	30,23			29,53	28,20	32,97	32,40	28,97	26,33			29,23
10	23,91			20,70	24,40	26,63	25,87	24,37	22,50			24,24
30	23,20			23,57	24,80	21,23	22,47	23,50	22,60			22,86
70	24,18				22,03	26,33	26,27	26,87				26,57
Média				24,60	24,86	26,79	26,75	25,93	23,81			

TABELA 7 Valores médios do teor de lignina solúvel (%) por altura relativa, posição radial de amostragem e classe diamétrica na madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.

		Classe 14,2 cm											
Altura (%)	Lado A	Distância da medula (cm)										Lado B	
		6,0	5,7	5,0	3,5	1,5	1,5	3,4	4,8	5,7	6,0		
2	3,10	2,86	3,32	2,89	3,32	3,09	3,46	3,19	3,10	2,99	3,24	3,20	
10	3,25	3,45	3,82	3,10	3,00	2,90	3,17	3,69	3,17	3,71	3,72	3,49	
30	3,34		3,16	3,56	3,19	3,46	3,45	3,28	3,55	4,43		3,68	
70	3,48				3,42	3,54	4,89	2,97				3,93	
Média		3,16	3,43	3,18	3,23	3,25	3,74	3,28	3,27	3,71	3,48		
		Classe 11,4 cm											
Altura (%)	Lado A	Distância da medula (cm)										Lado B	
2	3,17		3,39	3,57	2,89	2,85	3,13	2,50	3,70	3,49		3,20	
10	3,34		2,96	3,65	3,28	3,48	3,98	3,64	3,61	3,33		3,64	
30	3,67			3,61	3,52	3,88	3,22	3,41	2,97			3,20	
70	3,54				3,38	3,69	3,31	3,27				3,29	
Média			3,17	3,61	3,27	3,47	3,41	3,20	3,42	3,41			
		Classe 8,1 cm											
Altura (%)	Lado A	Distância da medula (cm)										Lado B	
2	3,34			3,45	3,35	3,21	2,77	3,41	4,05			3,41	
10	5,47			5,17	5,35	5,91	5,96	5,57	5,40			5,64	
30	4,36			3,56	5,27	4,25	4,32	4,29	3,73			4,11	
70	3,64				3,59	3,69	3,55	3,11				3,33	
Média				4,06	4,39	4,26	4,15	4,10	4,39				

TABELA 8 Valores médios do teor de lignina total (%) por altura relativa, posição radial de amostragem e classe diamétrica na madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.

		Classe 14,2 cm												
Altura (%)		Distância da medula (cm)												
	Lado A	6,0	5,7	5,0	3,5	1,5	1,5	3,4	4,8	5,7	6,0	Lado B		
	2	31,26	28,70	23,96	34,19	38,18	31,25	35,76	33,82	31,83	27,49	30,74	31,93	
	10	32,12	37,22	27,67	30,60	29,70	30,97	30,92	31,50	36,35	27,82	35,69	32,46	
	30	30,26		32,43	28,99	28,06	31,56	31,85	28,84	30,65	28,03		29,84	
	70	30,45				29,68	31,21	31,89	28,57				30,23	
	Média		32,96	28,02	31,26	31,41	31,25	32,61	30,68	32,94	27,78	33,22		
☞			Classe 11,4 cm											
	Altura (%)		Distância da medula (cm)											
		Lado A											Lado B	
		2	32,48		31,92	33,81	32,09	32,11	30,29	25,00	31,36	27,46		28,53
		10	30,15		28,46	27,42	32,18	32,55	35,64	34,97	28,81	30,70		32,53
	30	29,35			28,11	29,39	30,54	30,25	29,47	29,50			29,74	
	70	29,59				30,28	28,89	30,14	28,67				29,41	
	Média			30,19	29,78	30,98	31,02	31,58	29,53	29,89	29,08			
		Classe 8,1 cm												
Altura (%)		Distância da medula (cm)												
	Lado A											Lado B		
	2	33,57			32,98	31,55	36,18	35,17	32,38	30,38			32,64	
	10	29,39			25,87	29,75	32,54	31,82	29,93	27,90			29,89	
	30	27,56			27,13	30,07	25,48	26,78	27,79	26,33			26,97	
	70	27,82				25,63	30,02	29,82	29,98				29,90	
	Média				28,66	29,25	31,06	30,90	30,02	28,20				

Nos gráficos da Figura 22 observa-se a variação radial do teor de lignina total na madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, para a classe diamétrica de 14,2 cm por altura relativa. Observa-se que o comportamento do teor de lignina na madeira não apresenta um padrão de variação radial bem definido. Todavia, verifica-se que, de modo geral, os maiores teores de lignina se concentram mais próximos da medula e os menores teores são observados mais próximos ao alburno.

A quantidade de lignina é importante para a destinação de uso da madeira. Como comentado por Andrade (1993), a composição química da madeira exerce considerável influência sobre as propriedades físico-químicas do carvão vegetal, pois, quando se carboniza uma madeira rica em lignina, obtém-se elevado rendimento gravimétrico e carvão com alto teor de carbono. Esse fato está relacionado com a maior resistência à decomposição térmica que a lignina possui em relação aos demais constituintes estruturais da madeira.

No gráfico da Figura 23 observa-se a variação longitudinal do teor de lignina para a classe diamétrica 14,2 cm, verificando-se que os maiores teores de lignina, no geral, se concentram nas posições mais próximas da base da árvore.

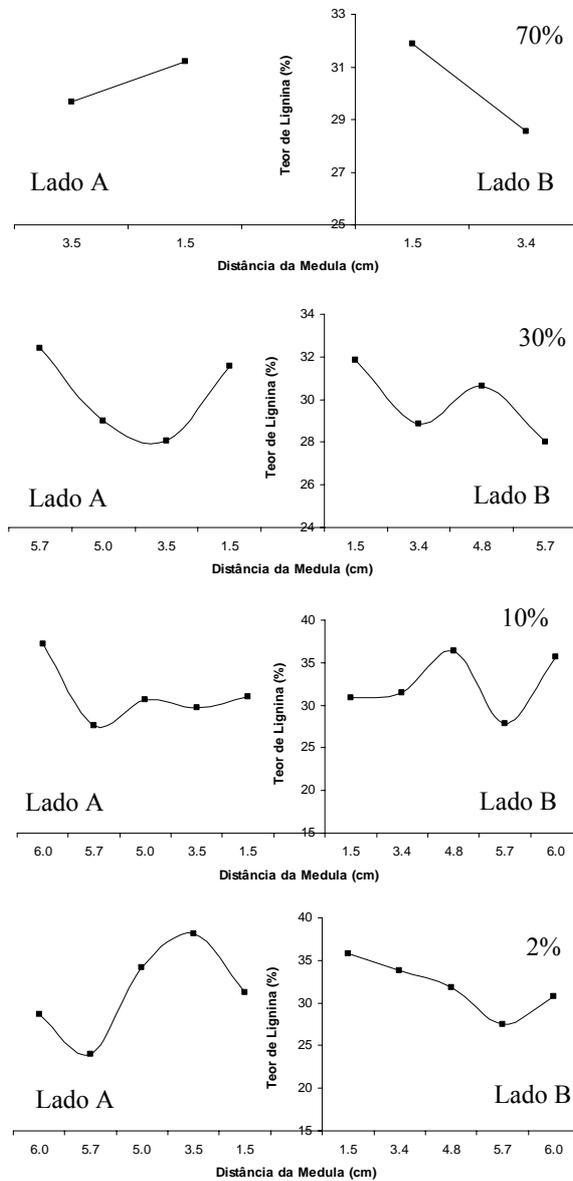


FIGURA 22 Variação radial do teor de lignina total na madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, para a classe diamétrica 14,2 cm.

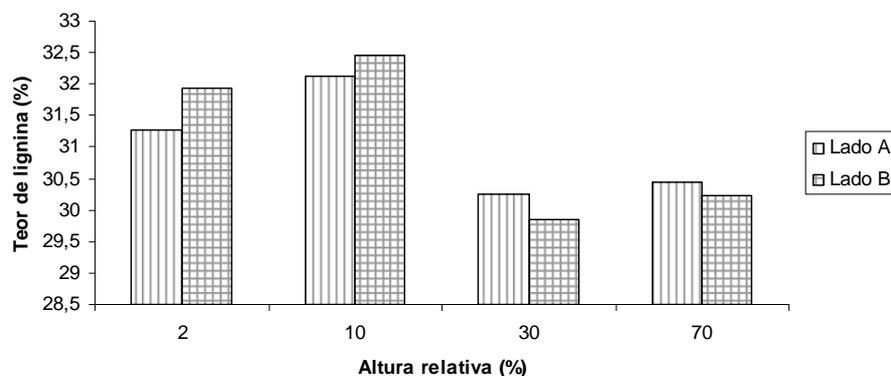


FIGURA 23 Variação longitudinal do teor de lignina para a classe diamétrica 14,2 cm na madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.

Nos gráficos da Figura 24 está ilustrada a variação radial do teor de lignina total na madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, para a classe diamétrica de 11,4 cm por altura relativa. Observa-se também que o comportamento do teor de lignina na madeira não apresenta um padrão de variação radial bem definido. Todavia, verifica-se que, de modo geral, os maiores teores de lignina se concentram mais próximo da medula e menores valores mais próximos ao alburno. Este resultado foi semelhante ao observado na classe 14,2 cm de diâmetro.

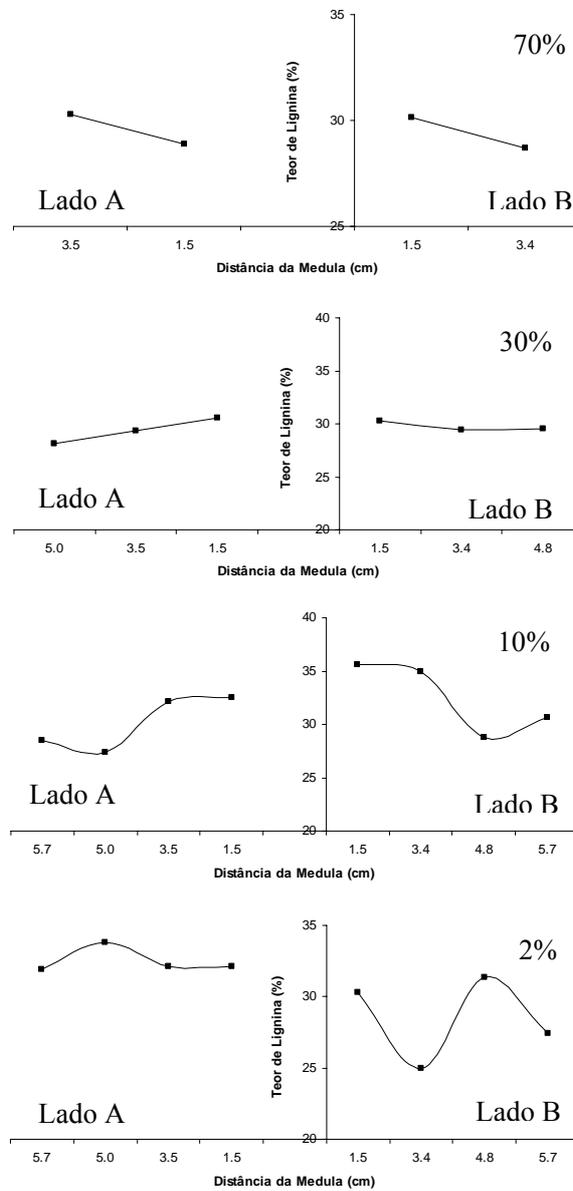


FIGURA 24 Variação radial do teor de lignina total na madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, para a classe diamétrica 11,4 cm.

O gráfico da Figura 25 ilustra a variação longitudinal do teor de lignina para a classe diamétrica 11,4 cm. Verifica-se que os maiores teores de lignina, em geral, se concentram nas posições da base do caule, como ocorreu para a classe diamétrica de 14,2 cm. Esse fato pode estar associado à maior proporção de cerne na madeira das partes mais de baixo da árvore. Observa-se que existe tendência de aumento até 10% da altura comercial e redução seguida de estabilização do teor de lignina em 30% e 70% da altura comercial do tronco.

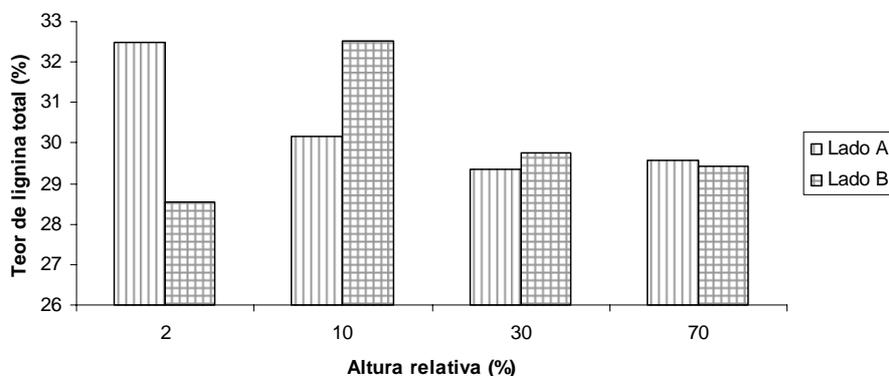


FIGURA 25 Variação longitudinal do teor de lignina total para a classe diamétrica 11,4 cm na madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.

Na Figura 26 observa-se a variação radial do teor de lignina total na madeira do clone avaliado para a classe diamétrica de 8,1 cm por altura relativa. Observa-se também que o comportamento do teor de lignina na madeira apresenta um padrão de variação radial de redução com a distância da medula, especialmente em 2% e 10% da altura comercial do tronco. Verifica-se, ainda, que, de modo geral, os maiores teores de lignina se concentram próximo da medula e uma região de menor teor próximo ao albúrnio, resultado semelhante ao observado nas classes 14,2 e 11,4 cm de diâmetro.

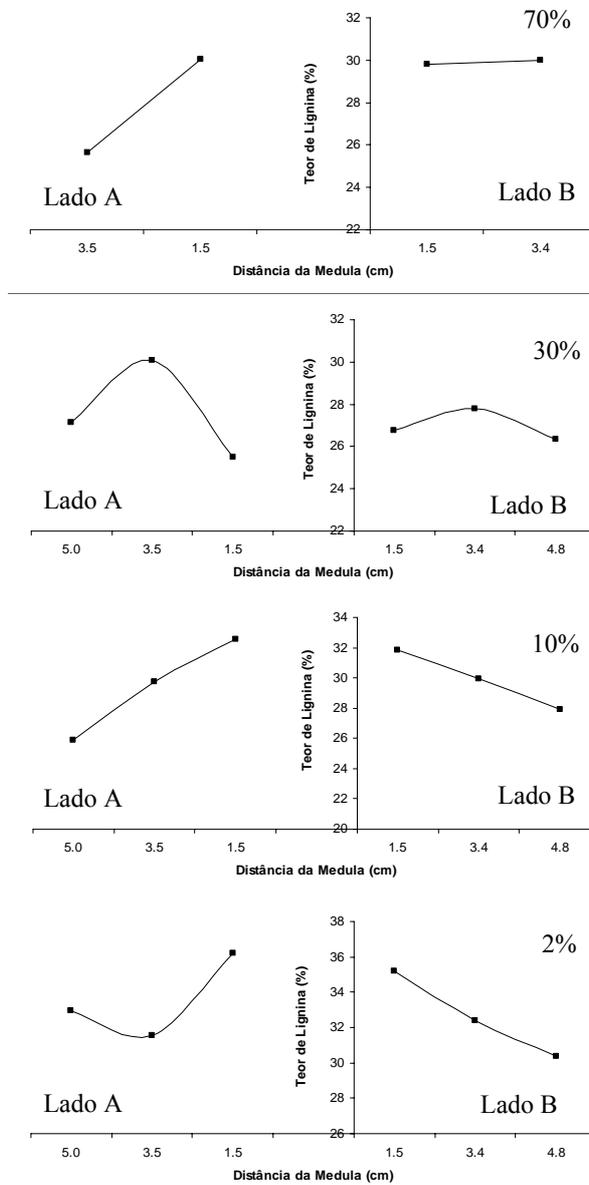


FIGURA 26 Variação radial do teor de lignina total na madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, para a classe diamétrica 8,1 cm.

O gráfico da Figura 27 ilustra a variação longitudinal do teor de lignina para a classe diamétrica 8,1 cm. Verifica-se que os maiores teores de lignina, no geral, se concentram nas posições da base da árvore, especialmente na altura relativa de 2%, como ocorreu nas classes diamétricas de 14,2 e 11,4 cm. Este fato pode estar associado à maior proporção de cerne na madeira das partes mais de baixo da árvore, especialmente para esta classe diamétrica que apresenta pequena proporção de cerne devido ao seu pequeno diâmetro. Observa-se que ocorre uma queda após 2% da altura comercial do tronco e os teores permanecem mais ou menos inalterados a partir de 10% da altura comercial. Aparentemente, em alturas superiores a 10% da altura comercial do tronco, para esta classe diamétrica, a madeira não apresentaria a formação do cerne.

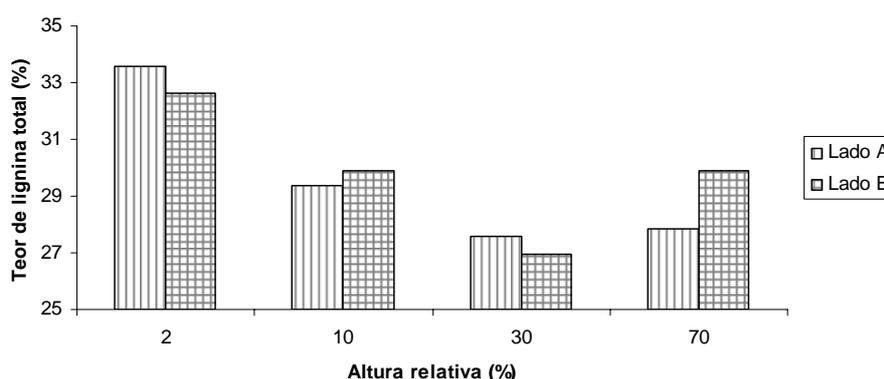


FIGURA 27 Variação longitudinal do teor de lignina total para a classe diamétrica 8,1 cm na madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.

Na Tabela 9 estão apresentados os valores médios dos teores de lignina insolúvel, solúvel e total e do teor de cinzas na madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake por classe diamétrica, bem como os coeficientes de variação (CV). Verifica-se que os coeficientes de variação foram baixos para todas as características, inclusive o

teor de cinzas, o qual geralmente é bem elevado. A classe diamétrica de 14,2 cm apresentou o maior valor médio para o teor de lignina, indicando ser de maior proporção de cerne que as demais classes diamétricas. As duas outras classes diamétricas não apresentaram diferença entre os teores de lignina na madeira. O teor de cinzas não foi muito variável entre as classes diamétricas, porém, no geral, apresentou tendência de aumento com a redução da classe diamétrica, mesmo comportamento do teor de lignina insolúvel.

TABELA 9 Valores médios dos teores de lignina e cinzas na madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.

Classe (cm)	Teor de Lignina (%)			Teor de Cinzas (%)
	Insolúvel	Solúvel	Total	
14,2	28,09	3,05	31,14	0,21
CV (%)	3,79	9,07	3,24	17,57
11,4	26,09	2,85	28,95	0,24
CV (%)	3,19	16,16	2,78	13,26
8,1	25,72	3,24	28,96	0,26
CV (%)	3,25	12,11	2,54	12,47
Média	26,95	3,01	29,96	0,23
CV (%)	5,25	13,03	4,71	17,34

6.5 Análise elementar da madeira

6.5.1 Na altura do DAP

Na Tabela 10 são apresentados os valores médios de carbono, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio e enxofre na madeira do clone avaliado a 1,30 m de altura do solo (DAP). Verifica-se que os teores desses elementos não diferem entre as classes diamétricas, o que era esperado. Esses valores estão de acordo com os relatados por Tsoumis (1991).

Nota-se, ainda, que não foi encontrado teor de enxofre na madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake aos seis anos de idade.

Cunha et al. (1989) comentam que a madeira, quando utilizada como combustível, apresenta menores problemas de poluição quando comparada aos combustíveis fósseis, tendo em vista que esta possui baixo teor de enxofre.

TABELA 10 Valores médios de carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio na madeira no DAP do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.

Classe (cm)	Carbono	Hidrogênio	Nitrogênio	Oxigênio	Enxofre
14,2	50,14	6,36	0,05	43,45	0,00
11,4	50,05	6,34	0,00	43,61	0,00
8,1	50,29	6,36	0,05	43,29	0,00
Média	50,14	6,35	0,03	43,47	0,00

Todos os valores dos teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio e enxofre, em porcentagem (%).

Os gráficos da Figura 28 ilustram a variação radial dos teores de carbono, oxigênio e hidrogênio observados na madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, para a classe diamétrica 14,2 cm. Verifica-se que os teores de carbono e oxigênio permanecem inalterados, porém, tendem a reduzir e a aumentar, respectivamente, na parte mais próxima da casca, ou seja, mais próxima da zona meristemática do tronco (câmbio vascular). Já o teor de hidrogênio apresentou tendência de aumento com a distância da medula até determinado ponto, voltando a reduzir próximo da casca.

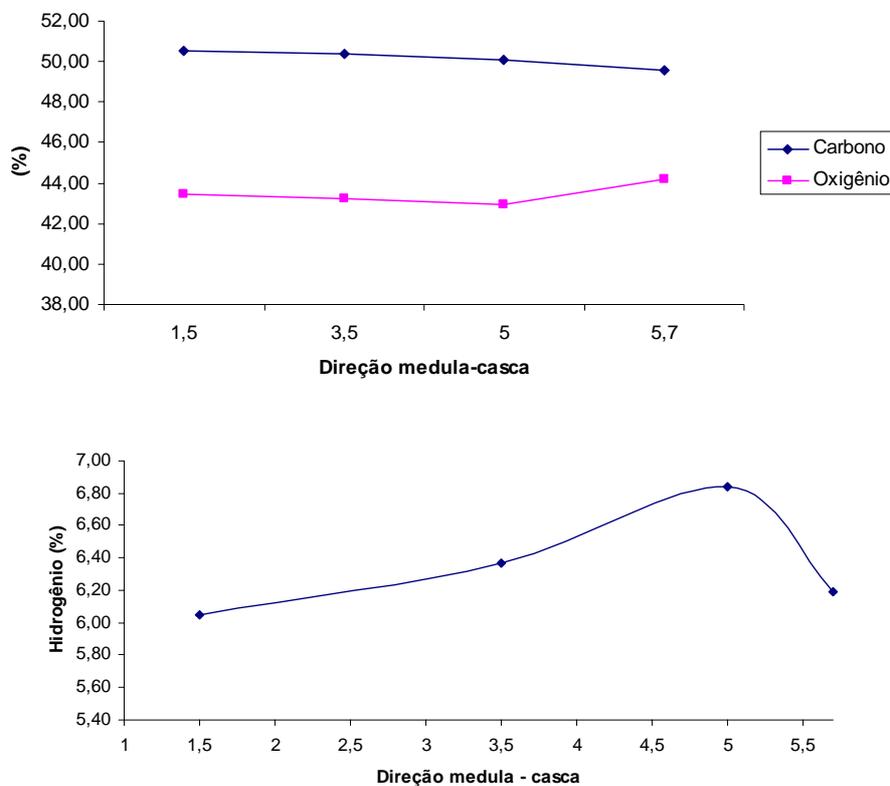


FIGURA 28 Variação radial médio dos teores de carbono, oxigênio e hidrogênio no DAP, para a classe de 14,2 cm, na madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.

Os gráficos da Figura 29 ilustram a variação radial médio dos teores de carbono, oxigênio e hidrogênio observados na madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, para a classe diamétrica 11,4 cm. Observa-se que o teor de carbono apresentou o mesmo comportamento da classe 14,2 cm, enquanto os teores de oxigênio e hidrogênio tiveram pequena variação. Essa variação pode estar relacionada ao número

diferente de pontos, em função dos diâmetros das árvores na classe diamétrica menor.

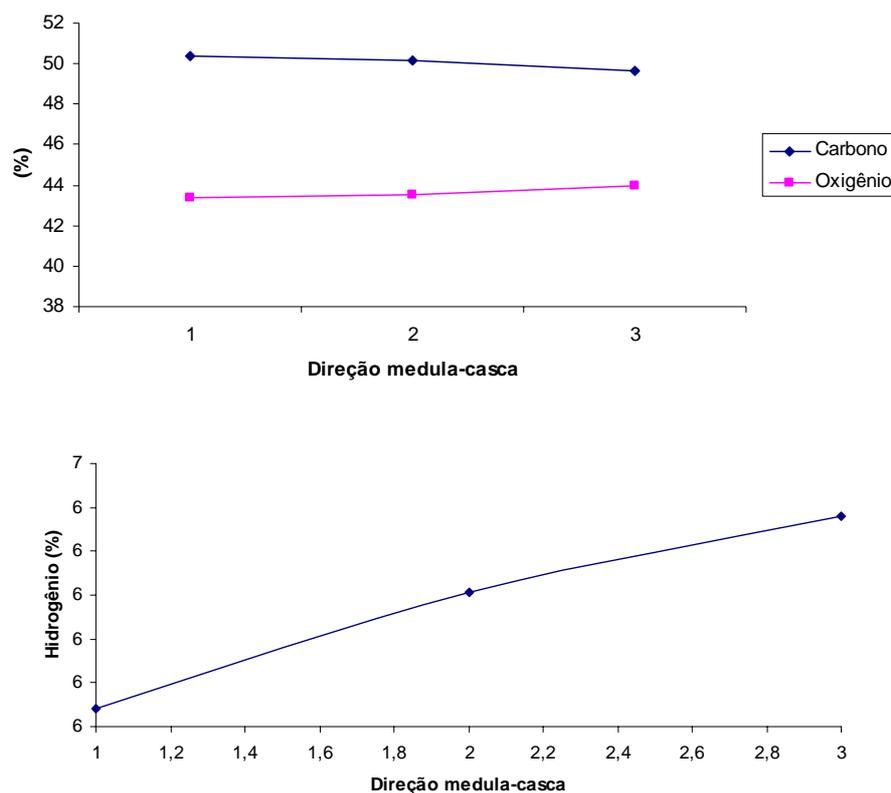


FIGURA 29 Variação radial médio dos teores de carbono, oxigênio e hidrogênio no DAP, para a classe de 11,4 cm, na madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.

Os gráficos da Figura 30 ilustram a variação radial médio dos teores de carbono, oxigênio e hidrogênio observados na madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, para a classe diamétrica 8,1 cm. Observa-se uma mesma tendência de variação radial para os

teores de carbono e oxigênio, como na classe 11,4 cm e que o teor de hidrogênio permaneceu constante, diferentemente das duas classes anteriores.

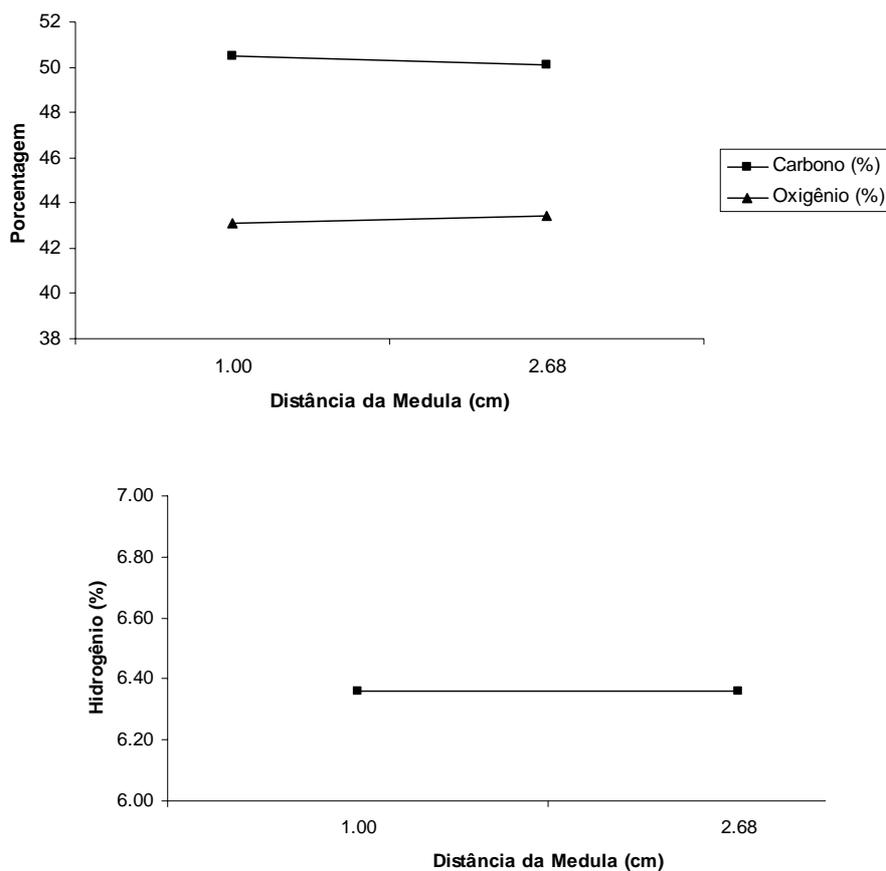


FIGURA 42 Variação radial médio dos teores de carbono, oxigênio e hidrogênio no DAP, para a classe de 8,1 cm, na madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.

6.5.2 Nas outras alturas no tronco da árvore

Na Tabela 11 estão apresentados os valores médios dos teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio e enxofre da madeira do clone avaliado, por altura relativa e classe diamétrica. Observa-se que o teor de carbono foi maior nas partes mais baixas do caule, principalmente em 2% da altura comercial do tronco, em todas as classes diamétricas consideradas. Esse resultado é semelhante ao observado para o teor de lignina na madeira, o que pode demonstrar estreita relação entre o teor de carbono e o de lignina. Verifica-se que os teores de hidrogênio e oxigênio não apresentaram grandes variações com a altura relativa em todas as classes diamétricas, porém, há tendência de aumento. De modo geral, a madeira apresentou 49,74%, 6,36%, 0,18% e 43,74% de carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio, respectivamente.

TABELA 11 Teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio da madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, por altura relativa e classe diamétrica.

Altura relativa (%)	Classe 14,2 cm				
	Carbono	Hidrogênio	Nitrogênio	Oxigênio	Enxofre
2	50,56	6,31	0,3	42,83	0,00
10	49,43	6,22	0,05	44,3	0,00
30	49,46	6,37	0,01	44,16	0,00
70	49,84	6,45	0,64	43,07	0,00
Média	49,84	6,32	0,19	43,65	0,00
Altura relativa (%)	Classe 11,4 cm				
	Carbono	Hidrogênio	Nitrogênio	Oxigênio	Enxofre
2	50,28	6,27	0,08	43,38	0,00
10	50,03	6,47	0,21	43,28	0,00
30	49,12	6,31	0,06	44,51	0,00
70	49,43	6,41	0,14	44,02	0,00
Média	49,81	6,36	0,13	43,71	0,00
Altura Relativa (%)	Classe 8,1 cm				
	Carbono	Hidrogênio	Nitrogênio	Oxigênio	Enxofre
2	50,02	6,24	0,2	43,54	0,00
10	49,33	6,42	0,13	44,12	0,00
30	49,17	6,37	0,25	44,21	0,00
70	49,52	6,49	0,36	43,63	0,00
Média	49,51	6,37	0,23	43,89	0,00
Média geral	49,74	6,35	0,18	43,74	0,00

Valores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio e enxofre, em porcentagem (%).

Observa-se, ainda pelos dados da Tabela 11, que não foi encontrado enxofre na madeira, o que é muito importante para a sua utilização como combustível, como foi comentado por Cunha et al. (1989). Além disso, Ingham (1999) afirma que possui o aspecto ambiental favorável, já que a emissão de CO₂ da queima da biomassa na atmosfera, geralmente, é compensada pela absorção no plantio da biomassa.

Na Tabela 12 são apresentados os valores estimados de massa de carbono e incremento médio em carbono do clone por classe diamétrica. Esses valores foram determinados considerando-se os valores médios de porcentagem de carbono na madeira (Tabela 10) e os valores médios das estimativas de massa seca e incremento em massa seca do clone, por classe diamétrica, descrito por Pádua (2009). Essa estimativa foi possível, pois o material em estudo foi o mesmo nos dois trabalhos. Os resultados indicam que a classe diamétrica 14,2 cm apresentou a maior estimativa de massa de carbono média imobilizada por árvore, que variou de 36,37 kg (considerando a densidade básica estimada pelo método tradicional) a 36,91 kg (considerando a densidade básica estimada pelo método de metro em metro), o que permite um incremento médio anual de 9.093,63 a 9.211,76 kg/ha.ano. Estes valores representam a capacidade desse clone em retirar o CO₂ da atmosfera, estocá-lo ou imobilizá-lo em sua madeira e contribuir para a redução do efeito estufa. Os resultados mostrados na Tabela 12 mostram a importância do incremento volumétrico e da densidade básica da madeira na imobilização do CO₂ atmosférico pelas florestas.

TABELA 12 Valores estimados de massa de carbono e incremento médio em carbono do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, por classe diamétrica.

Classe (cm)	Carbono (%)	Mc1	Mc2	Mc3	IMAC1	IMAC2	IMAC3
14,2	49,84	36,91	36,37	36,85	9228,47	9093,63	9211,76
11,4	49,81	21,67	21,47	21,64	5418,39	5368,23	5409,73
8,1	49,74	10,46	10,39	10,41	2615,57	2597,27	2603,40

Mc1, 2 e 3 = representam as estimativas de massa de carbono média estocada por árvore (kg), IMAC1, 2 e 3 = representam as estimativas de incremento médio de massa de carbono por área, considerando a densidade básica média da amostragem de metro em metro, tradicional e alternativa, para 1.500 árvores por ha (kg carbono/ha.ano).

7 CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos pode-se concluir que:

- ✓ a classe diamétrica 14,2 cm apresentou maior proporção de cerne em relação às demais classes, com 45%;
- ✓ os valores mais altos de densidade aparente foram encontrados para as classes diamétricas de 14,2 e 11,4 cm, com 0,589 e 0,576 g/cm³, respectivamente;
- ✓ a espessura da parede celular reduziu com a diminuição da classe diamétrica;
- ✓ o comprimento da fibra apresentou, de modo geral, valor mais elevado na maior classe diamétrica e idêntico nas outras duas classes;
- ✓ a largura e o diâmetro do lume das fibras apresentaram comportamento bem semelhante, ou seja, maiores valores nas classes de 14,2 e 8,1 cm e a classe de 11,4 cm, o menor valor médio;
- ✓ o teor de extrativos e a lignina na madeira apresentaram, no geral, padrão decrescente de variação com a distância da medula e tenderam a maior concentração nas partes mais de baixo do tronco das árvores;
- ✓ o teor de carbono tendeu a reduzir com a distância da medula, enquanto os teores de hidrogênio e oxigênio tenderam a aumentar;

- ✓ a classe diamétrica 14,2 cm apresentou a maior estimativa de massa de carbono média imobilizada por árvore, que variou de 36,37 kg a 36,91 kg, o que permite um incremento médio anual de 9.093,63 a 9.211,76 kg/ha.ano.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, J. M. de; SILVA, D. de J. Efeito da quantidade de extrativos e da acessibilidade do licor na polpação kraft de clones de *Eucalyptus*. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 34., 2001, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 2001. p. 1-12.

ALZATE, B. A. Estrutura anatômica da madeira de clones de *Eucalyptus*. **Revista Investigaciones Aplicadas**, Santiago, n. 5, p. 1-14, 2009.

AMARAL, A. C. B. **Implantação da metodologia de densitometria de raios X em madeira**. 1994. 143 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

AMARAL, A. C. B.; TOMAZELLO FILHO, M. Avaliação das características dos anéis de crescimento de *Pinus taeda* pela técnica de microdensitometria de raios X. **Revista de Ciência e Tecnologia**, Piracicaba, v. 6, n. 11/12, p. 17-23, nov./dez. 1998.

ANDRADE, A. M. **Efeitos da fertilização mineral e da calagem na produção e na qualidade da madeira e do carvão de eucalipto**. 1993. 105 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FLORESTAS. **Florestas plantadas no Brasil**. Disponível em: <www.abraf.com.br>. Acesso em: 20 nov. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. **Normas técnicas ABTCP**. São Paulo, 1974. 18 p.

BAMBER, R. K.; FLOYD, A. G.; HUMPHREYS, F. R. Wood properties of flooded gum. **Australian Forestry**, Queen Victoria, v. 33, n. 1, p. 3-12, 1969.

BAMBER, R. K.; HUMPHREYS, F. R. A preliminary study of some wood properties of *Eucalyptus grandis*. **Journal of the Institute of Wood Science**, Madison, v. 11, p. 66-70, 1963.

BARCELLOS, D. C.; COUTO, L. C.; MÜLLER, M. D.; COUTO, L. O estado-da-arte da qualidade da madeira de eucalipto para produção de energia: um foco nos tratamentos silviculturais. **Biomassa & Energia**, Botucatu, v. 2, n. 2, p. 141-158, 2005.

BARRICHELO, L. C.; BRITO, J. O. **Madeira das espécies de Eucalipto como matéria prima para a indústria de celulose e papel**. Brasília: PRODEPEF, 1976. 45 p. (Série de Divulgação, 13).

BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O. **Química da madeira**. Piracicaba: ESALQ, 1985. 125 p.

BHAT, K. M.; BHAT, K. V.; DHAMODARAN, T. K. Wood density and fiber length of *Eucalyptus grandis* grown in Kerala, India. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 22, n. 1, p. 54-61, Jan. 1990.

BRASIL, M. A. M.; FERREIRA, M. Variação da densidade básica e das características das fibras em *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden ao nível do DAP: análise preliminar. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Piracicaba, n. 5, p. 81-90, dez. 1972.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 154 p.

CENTRO DE INTELIGÊNCIA EM FLORESTAS. **Aspectos botânicos do eucalipto**. Disponível em: <www.ciflorestas.com.br>. Acesso em: 1 out. 2009a.

CENTRO DE INTELIGÊNCIA EM FLORESTAS. **Eucalipto**. Disponível em: <<http://www.ciflorestas.com.br>>. Acesso em: 2 out. 2009b.

CHAGAS, M. P. **Caracterização dos anéis de crescimento e dendrocronologia de árvores de *Grevillea robusta* A. Cunn, *Hovenia dulcis* Thunb., *Persea americana* Mill., *Tabebuia pentaphylla* Hemsl. e *Terminalia catappa* L. nos municípios de Piracicaba e Paulínia, SP**. 2009. 93 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

CUNHA, M. P. S. C.; PONTES, C. L. F.; CRUZ, I. A.; CABRAL, M. T. F. D.; CUNHA NETO, Z. B.; BARBOSA, A. P. R. Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 3., 1989, São Carlos. **Anais...** São Carlos: UFSCar, 1989. v. 2, p. 93-121.

DOWNES, G. M.; HUDSON, I. L.; RAYMOND, C. A.; DEAN, G. H.; MICHELL, A. J.; SCHIMLECK, R.; EVANS, R.; MUNERI, A. **Sampling plantation eucalypts**: for wood and fibre properties. Melbourne: CSIRO, 1997. 126 p.

FERREIRA, C. R.; FANTINI JUNIOR, M.; COLODETTE, J. L.; GOMIDE, J. L.; CARVALHO, A. M. M. L. Avaliação tecnológica de clones de eucalipto: parte 1: qualidade da madeira para produção de celulose Kraft. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 70, p. 161-170, abr. 2006.

FLORSHEIM, S. M. B.; COUTO, H. T. Z. do; LIMA, I. L. de; LONGUI, E. L. Variação nas dimensões dos elementos anatômicos da madeira de *Eucalyptus dunnii* aos sete anos de idade. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 21, n. 1, p. 79-91, jun. 2009.

FOELKEL, C. E. B.; BARRICHELO, L. E. G. Relações entre características de madeiras e propriedades da celulose e papel. **O Papel**, São Paulo, n. 36, p. 49-53, set. 1975.

GOLDSCHIMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K. V.; LUDWIG, C. H. **Lignins**: occurrence, formation, structure and reactions. New York: J. Wiley, 1971. p. 241-298.

GOMIDE, J. L.; DEMURE, 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.

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

HUDSON, I.; WILSON, L. van; BEVEREN, K.; SANDERCOCK, C.; SANDS, R. Pattern of variability of wood quality indices with height and within-ring in eighteen-year-old *E. nitens* Deane and Maiden from three genotypes. In: ANNUAL GENERAL CONFERENCE, 49., 1995, Hobart. **Proceedings...** Hobart: Appita, 1995. p. 363-374.

HUDSON, I.; WILSON, L. van; BEVEREN, K.; SANDS, R. Between pulp yield family differences in patterns of longitudinal (with height) and radial variation of wood quality indices in 6 *E. nitens* trees. In: ANNUAL GENERAL CONFERENCE, 50., 1996, Auckland. **Proceedings...** Auckland: Appita, 1996. p. 265-272.

INGHAM, J. M. Biomassa no mundo e no Brasil. In: MONTENEGRO, A. de A. (Ed.). **Fontes não-convencionais de energia**: as tecnologias solar, eólica e de biomassa. 2. ed. Florianópolis: UFSC, 1999. p. 111-124, 160 p.
KLOCK, U.; MUNIZ, G. I. B.; HERNANDEZ, J. A.; ANDRADE, A. S. **Química da madeira**. 3. ed. Curitiba: UFPR, 2005. 86 p.

LIMA, S. R. de; OLIVEIRA, G. S. de; MORAIS, S. A. L.; NASCIMENTO, E. A. do; CHANG, R. Estudo dos constituintes macromoleculares, extrativos voláteis e compostos fenólicos da madeira de candeia: *Moquinia polymorpha* (less.) dc. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 17, n. 2, p. 145-155, maio/jun. 2007.

MALAN, F. S.; GERISCHER, G. F. R. Wood property differences in South African grown *Eucalyptus grandis* trees of different growth stress intensity. **Holzforschung**, Berlin, v. 41, n. 6, p. 331-335, Jan. 1987.

MUNERI, A.; RAYMOND, C. A. Nondestructive sampling of *Eucalyptus globulus* and *E.nitens* for wood properties: II., fiber length and coarseness. **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 35, n. 1/2, p. 41-56, Feb. 2001.

NOGUEIRA, M.; BALLARIN, A. W. Efeito da idade na qualificação mecânica da madeira serrada de *Eucalyptus* sp. com uso de ensaios não- destrutivos. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 23, n. 3, p. 74-94, jul./set. 2008.

OLIVEIRA, E. **Correlações entre parâmetros de qualidade da madeira e do carvão de *Eucalyptus grandis* (W.Hill ex. Maiden)**. 1988. 47 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

OLIVEIRA, J. T. da S. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil**. 1997. 429 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

OLIVEIRA, J. T. da S.; HELLMMEISTER, J. C.; SIMÕES, J. W.; TOMAZELLO FILHO, M. Caracterização da madeira de sete espécies de eucaliptos para a construção civil: 1., avaliações dendrométricas das árvores. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 56, p. 113-124, dez. 1999.

PÁDUA, F. A. de. **Amostragem para avaliação da densidade básica da madeira de um híbrido de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake**. 2009. 87 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

PAULA, J. Caracterização anatômica da madeira de sete espécies da Amazônia com vistas à produção de energia e papel. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 33, n. 2, p. 243-262, abr./jun. 2003.

PEREIRA, J. C. D.; STURION, J. A.; HIGA, A. R.; HIGA, R. C. V.; SHIMIZU, J. Y. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no brasil**. Colombo: EMBRAPA Florestas, 2000. 113 p. (EMBRAPA Florestas. Documentos, 38).

PETTERSEN, R. C. The chemical composition of wood. In: ROWELL, R. (Ed.). **The chemistry of solid wood**. Washington: American Chemical Society, 1984. p. 54-126.

RAO, R. V.; SHASHIKALA, S.; SREEVANI, P.; KOTHIYAL, V.; SARMA, C. R.; LAL, P. Within-tree variation in anatomical properties of some clones of *Eucalyptus tereticornis* Sm. **Wood Science and Technology**, New York, n. 36, p. 271-285, 2002.

RIDOUTT, B. G.; SANDS, R. Within-tree variation in cambial anatomy and xylem cell differentiation in *Eucalyptus globulus*. **Trees**, Berlin, n. 8, p. 18-22, 1993.

ROCHA, F. T.; FLORSEIM, 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 do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 43-55, jan./jun. 2004.

ROCHA, M. G. B. **Variação da densidade básica e correlações entre caracteres de progênies jovens de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden em duas etapas de crescimento**. 1983. 54 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ROCHA, M. P. *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus dunii* Maiden como fontes de matéria-prima para serrarias. 2000. 186 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SETTE JÚNIOR, C. R.; TOMAZELLO FILHO, M.; DIAS, C. T. dos S.; CHAGAS, M. P.; LACLAU, J. P. Efeito da aplicação de potássio e sódio nas características do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* w.hill, aos 24 meses de idade. **Floresta**, Curitiba, v. 39, n. 3, p. 535-546, jul./set. 2009.

SHIMOYAMA, V. R. S. **Variação da densidade básica e características anatômicas e químicas da madeira em *Eucalyptus* spp.** 1990. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

SILVA, J. C. **Caracterização da madeira de *E. grandis* de diferentes idades, visando a sua utilização na indústria moveleira.** 2002. 160 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Paraná, Curitiba.

SILVA, J. C.; TOMAZELLO FILHO, M.; OLIVEIRA, J. T. da S.; CASTRO, V. R. de. Influência da idade e da posição radial nas dimensões das fibras e dos vasos da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 6, p. 1081-1090, nov./dez. 2007.

SILVÉRIO, F. O.; BARBOSA, L. C. de A.; GOMIDE, J. L.; REIS, F. P.; PILÓ-VELOSO, D. Metodologia de extração e determinação do teor de extrativos em madeiras de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 30, n. 6, p. 1009-1016, nov./dez. 2006.

TAYLOR, F. W. **Differences in wood *Eucalyptus grandis* grown in different parts of South Africa.** Pretoria: Council for Scientific and Industrial Research, 1973. 1026 p. (Special Report, 75).

TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira de *Eucalyptus saligna* e *E. grandis*. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Piracicaba, n. 30, p. 45-53, set. 1985.

TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica em estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus globulus*, *E. pellita*, *E. acmenioides*. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Piracicaba, n. 36, p. 35-42, ago. 1987.

TOMAZELLO FILHO, M. **Efeito da irrigação e fertilização nas propriedades do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis x urophylla***. 2006. 146 p. Tese (Livre Docência em Ciência e Tecnologia de Madeira) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

TOMAZELLO FILHO, M.; BRAZOLIN, S.; CHAGAS, M. P.; OLIVEIRA, J. T. S.; BALLARIM, A. W.; BENJAMIN, C. A. Application of X-ray technique in nondestructive evaluation of *Eucalypt* Wood. **Maderas: Ciência y Tecnología**, Concepción, v. 10, n. 2, p. 139-149, 2008.

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

TSOUMIS, G. **Science and technology of wood**: structure, properties and utilization. New York: V.N. Reinold, 1991. 494 p.

VALENTE, C. A.; SOUZA, A. P. M. de; FURTADO, F. P.; CARVALHO, A. P. Improvement program for *Eucalyptus globulus* at Portucel: technological component. **Appita Journal**, Victoria, v. 45, n. 6, p. 403-407, Nov. 1992.

VITAL, B. R.; ALMEIDA, J.; VALENTE, O. F.; PIRES, I. E. Características de crescimento das árvores e de qualidade da madeira de *Eucalyptus camaldulensis* para a produção de carvão. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Piracicaba, n. 47, p. 22-28, maio 1994.

CAPÍTULO 3

Variação nas características do carvão produzido a partir de um clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake

1 RESUMO

Este trabalho foi realizado com os objetivos de: i) determinar a variação no sentido radial dos rendimentos gravimétricos da carbonização da madeira de um clone de *Eucalyptus*; ii) determinar a qualidade do carvão vegetal produzido e a sua variação no sentido radial do fuste da árvore; iii) verificar da utilização da técnica de raios X para determinação da densidade relativa aparente do carvão e a sua variação no sentido radial e iv) fazer análise anatômica do carvão vegetal via microscopia eletrônica de varredura. Foi utilizado um clone de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, aos 6 anos, plantado no município de Martinho Campos, MG. As árvores foram distribuídas em três classes de diâmetro e foram amostradas, na forma de discos de 2,5 cm de espessura, em diferentes alturas do fuste comercial da árvore, além de um a 1,30 m do solo (DAP) e baguetas com trado motorizado. Foram tomadas amostras ao longo do raio nos discos, considerando os dois lados em relação à medula. As amostras foram carbonizadas em forno elétrico de laboratório, sendo determinados os rendimentos e a qualidade do carvão vegetal produzido. Pelos resultados, verificou-se que a classe diamétrica influenciou significativamente o rendimento gravimétrico em carvão vegetal e líquido pirolenhoso; o rendimento em gás não condensável, o teor de materiais voláteis e o de carbono fixo não foram influenciados pela classe diamétrica; os teores de cinzas e de carbono fixo apresentaram tendência de redução, enquanto o teor de materiais voláteis apresentou tendência de aumento em relação à classe diamétrica. Verificou-se que o rendimento gravimétrico de carvão vegetal aumentou da casca para a medula, em todas as classes diamétricas. A técnica de densitometria por raios X mostrou-se confiável para a determinação da densidade relativa aparente do carvão vegetal. Os valores de densidade relativa aparente tenderam a aumentar no sentido da medula em direção à casca em todas as classes diamétricas. Para as três classes diamétricas, a frequência de poros por milímetro apresentou comportamento crescente da região mais externa para a interna das amostras.

Palavras-chave: eucalipto, carvão, densidade relativa aparente, microscopia eletrônica.

2 ABSTRACT

This work was intended to: i) determine the variation in the radial direction of the gravimetric yields of the wood carbonization of a clone of *Eucalyptus*; ii) determine the quality of the charcoal produced and its variation in the radial direction of the tree stem; iii) verify the utilization of the X ray technique for determination of the apparent relative density of charcoal and its variation in the radial direction; iv) do anatomical analysis of charcoal via scanning electron microscopy. A clone of *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, at 6 years, planted in the town of Martinho Campos, MG was utilized. The trees were distributed into three diameter classes and were sampled in the form of 2.5 cm thick disks at different heights of the commercial stem of the tree, in addition to one at 1.30 meters from soil (BHD) and radial ribbons with a motorized gauge. Samples were taken along the ray on the disks, considering the two sides in relation to the pith. The samples were carbonized in an electric laboratory furnace, the yields and quality of charcoal produced being determined. From the results, it was found that the diameter class influenced significantly the gravimetric yield in charcoal and pirogalic liquid; the yield in non condensable gas, content of volatile materials and fixed carbon were not influenced by the diameter class; the contents of ashes and fixed carbon presented reduce trend, while the content of volatile materials presented increase trend in relation to the diameter class. It was found that the gravimetric yield of charcoal increased from the bark to the pith in all the diameter classes. The X ray densitometry technique proved reliable for determination of the apparent relative density of charcoal. The values of apparent relative density tended to increase in the direction of the pith towards the bark in all the diameter classes; for the three diameter classes, the frequency of pores per millimeter growing behavior of the region outermost to the innermost of the samples.

Key words: eucalyptus, charcoal, apparent relative density, electron microscopy.

3 INTRODUÇÃO

A preocupação com o futuro abastecimento de madeira é uma realidade e os segmentos industriais que a utilizam maciçamente, tal como o setor siderúrgico, têm intensificado os esforços para garantir o suprimento dessa matéria-prima. Além do aumento da área reflorestada, outro fator de grande importância é o estudo das propriedades da madeira que afetam o produto final, visando uma maior economia do recurso florestal.

O carvão vegetal é largamente utilizado no Brasil devido às suas qualidades como combustível e redutor do minério de ferro. Cerca de 90% do carvão vegetal produzido no país é destinado ao setor siderúrgico (Bancha & Barros, 2004).

Segundo Brito et al. (2009), o consumo brasileiro de carvão vegetal situa-se na ordem de 9 milhões de toneladas anuais, sendo a maior parte destinada ao setor industrial, com destaque para a siderurgia, setor em que sua utilização evoluiu, mesmo após o advento do coque neste setor. O consumo do carvão vegetal siderúrgico nacional concentra-se, prioritariamente, em usinas não-integradas, que produzem somente ferro-gusa. Tais usinas predominam em Minas Gerais e na região da Estrada de Ferro de Carajás, abrangendo os estados do Pará e Maranhão, onde estão concentradas as maiores reservas de minério de ferro brasileiro. Os outros consumos majoritários ocorrem nas usinas integradas, que operam as três fases do processo siderúrgico - redução, refino e laminação (15%) e na produção de ferros-liga (Associação Mineira de Silvicultura - AMS, 2009).

A qualidade do carvão para atender a um determinado uso depende muito da espécie de madeira e do processo de carbonização. Inúmeros estudos relatam as altas correlações existentes entre as características do carvão vegetal e as propriedades da madeira de origem, tais como a densidade básica (Brito &

Barrichelo, 1980; Coutinho, 1984), o teor de lignina (Trugilho, 1995) e as dimensões da fibra (Oliveira, 1988). Variações na composição química, na distribuição dos tecidos e componentes químicos na madeira afetam de forma significativa tanto a produção como a qualidade do carvão vegetal.

Diante do exposto, esse trabalho foi realizado com os objetivos de: i) determinar a variação no sentido radial dos rendimentos gravimétricos da carbonização da madeira de um clone de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*; ii) determinar a qualidade do carvão vegetal produzido e a sua variação no sentido radial ao fuste da árvore; iii) verificar a utilização da técnica de raios X para determinar a densidade relativa aparente do carvão e a sua variação no sentido radial e iv) fazer análise anatômica do carvão vegetal mediante aplicação da microscopia eletrônica de varredura.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Carvão vegetal

O carvão vegetal é utilizado para diversos fins. Como produto químico, é utilizado como carvão ativado, com alto poder absorvente, sendo empregado como descorante, desgaseificante, purificador de águas e vinhos, além de vários usos medicinais. Pode também ser fonte de carbono na fabricação de sulfureto e tetracloreto de carbono, cianeto, etc.

Industrialmente, o carvão vegetal é o mais importante combustível e redutor do minério de ferro, em operações siderúrgicas e metalúrgicas. Os primitivos processos de metalurgia de ferro se iniciaram apoiados no carvão vegetal, quando ainda nem se pensava na utilização do carvão mineral para a obtenção do coque em operações industriais. A utilização do carvão vegetal, no Brasil, apresenta inúmeras vantagens em relação ao carvão mineral: é renovável, menos poluente, tem baixo teor de cinzas, é praticamente isento de enxofre e fósforo, é mais reativo, o processo de produção e transporte não é centralizado e propicia a poupança de divisas com a eliminação de importações de combustíveis fósseis. O carvão vegetal tem sido utilizado nas indústrias de cimento, cal e cerâmicas (O Eucalipto..., 2003).

Segundo Duboc et al. (2007), a quase totalidade da produção de carvão vegetal no Brasil destina-se ao consumo interno, estimulado pela produção siderúrgica, com pequeno volume de exportações. Nos últimos vinte anos, mais de 84% do consumo de carvão vegetal destina-se às indústrias de ferro-gusa, aço e ferros-liga. O setor residencial consumiu cerca de 8% da produção de carvão vegetal, seguido pelo setor comercial, com 1,1%, representado por pizzarias, padarias e churrascarias.

Segundo Silva et al. (2009), o mercado de carvão sofreu os impactos da crise financeira internacional, principalmente em decorrência da queda da

demanda de ferro-gusa da indústria siderúrgica brasileira. Segundo o Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS), a produção brasileira de aço bruto, em setembro de 2009, foi de 2,7 milhões de toneladas, representando crescimento de 1,5% em relação a agosto e queda de 9,9%, na comparação com o mesmo mês em 2008. A produção acumulada de janeiro a setembro de 2009 totalizou 18,5 milhões de toneladas de aço bruto, significando queda de 31,3% em relação ao mesmo período de 2008 (Instituto Brasileiro de Siderurgia - IBS, 2009).

4.2 Características quantitativas do carvão vegetal

A carbonização pode ser definida como a decomposição térmica da madeira na ausência ou na presença controlada de ar ou oxigênio, resultando em duas fases: uma sólida, que é o carvão vegetal e uma gasosa, composta por gases condensáveis e gases não condensáveis.

A quantidade de carvão produzido por unidade de massa de madeira é expressa pelo rendimento gravimétrico, que é definido como a relação entre massa seca de madeira enfiada e massa seca de carvão vegetal produzido.

Alguns fatores devem ser levados em consideração para o aumento do rendimento gravimétrico que são a temperatura máxima média de carbonização na faixa de 400°C e taxa mais lenta de aquecimento.

A carbonização é um processo de concentração de carbono pela liberação de voláteis. Assim, quanto maior a temperatura de carbonização, maior o teor de carbono fixo e menor o rendimento gravimétrico de carvão vegetal e, dessa forma, o aumento do teor de carbono fixo no carvão é obtido com a diminuição do rendimento gravimétrico do processo.

Nos fornos de carbonização existe uma perda térmica para o meio ambiente. Se essas perdas forem grandes, o carvão pode não atingir a temperatura de carbonização e produzir um carvão de qualidade inferior. As variações das condições ambientais sazonais modificam a perda de calor do

forno e influencia a produção de carvão. Assim, nas estações frias e chuvosas existe uma diminuição no rendimento do forno, que são maiores quanto maior é a perda térmica. Nos fornos de alvenaria nos meses chuvosos esta perda pode chegar a 10%, e de 15% nos fornos metálicos. Para fazer um carvão de boa qualidade em qualquer época do ano, é necessário que as temperaturas de carbonização sejam mantidas nos valores recomendados (Pinheiro et al., 2008).

O rendimento gravimétrico tem correlação positiva com o teor de lignina total e o teor de extrativos, correlação positiva com a densidade básica da madeira e correlação negativa entre largura e diâmetro dos lumes das fibras (Oliveira, 1988).

A avaliação da carbonização pelo rendimento gravimétrico, apesar de ser a mais recomendável, não é perfeita, pois não contempla o grau de transformação da carbonização. O carvão vegetal não é um composto químico definido. Alguns carvões são quase carbono puro, enquanto outros sofreram um processo parcial de carbonização contendo quantidades significativas de oxigênio e hidrogênio (Pinheiro et al., 2005).

Assis et al. (2008) estudaram um novo sistema alternativo para carbonização de madeira e concluíram que o rendimento gravimétrico médio da carbonização, com resfriamento fora e dentro da unidade de carvoejamento, foi de 33,73% e 32,24%, respectivamente e que esses valores estão de acordo com estudos de outros autores e que o teor de carbono fixo e o teor de materiais voláteis não apresentaram diferenças significativas, independentemente da forma de resfriamento.

Pinheiro et al. (2005) estudaram a influência da temperatura e da taxa de aquecimento da carbonização nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus camaldulensis*, *E. cloeziana* e *Corimbia citriodora*, com idades entre 6,5 e 7,5 anos e verificaram que, para todas as espécies analisadas, quanto menor a temperatura e a taxa de aquecimento, maior é o rendimento da carbonização. Os

mesmos autores concluíram que a temperatura ótima do processo de carbonização foi na faixa de 300°-450°C, para todas as espécies analisadas, tanto do ponto de vista quantitativo (rendimento gravimétrico) quanto do ponto de vista qualitativo (teor de carbono fixo).

A qualidade e a quantidade do carvão vegetal produzido são influenciadas pela qualidade da madeira, características químicas, físicas, anatômicas, processo utilizado para produção do carvão vegetal e mão-de-obra empregada no processo de produção.

Outro produto da carbonização são os gases voláteis liberados durante o processo de decomposição térmica da madeira que possuem muitos subprodutos úteis. Esses gases podem ser condensados, obtendo-se um líquido composto por duas frações, o licor pirolenhoso e o alcatrão (Pinheiro et al., 2008).

O licor pirolenhoso é a fração aquosa marrom do líquido condensado e seus principais componentes são a água e produtos químicos importantes, como ácido acético, metanol e acetona.

De acordo com Pimenta & Barcelos (2000), a composição final do licor pirolenhoso é dependente de vários fatores, como espécie, umidade, idade da madeira e temperatura de carbonização, isto é, quanto maior a temperatura de carbonização, maior será o grau de decomposição da madeira e, como resultado, maior produção de vapores que, após serem condensados, resultam numa substancial mudança na composição dos líquidos e gases não condensáveis.

Oliveira et al. (1982) estudaram tecnologias sobre o melhor aproveitamento de madeira de *Eucalyptus grandis* de sete localidades diferentes e coco babaçu para a produção de carvão vegetal em escala de laboratório. Estes autores concluíram que a composição química dos gases provenientes da destilação depende sensivelmente da temperatura, tornando-se mais rica à medida que aumenta a temperatura de carbonização, que os componentes monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂) participam em maior

quantidade na composição do gás e que o maior componente do licor pirolenhoso é o ácido acético, sem considerar a água, existindo uma quantidade apreciável de alcatrão solúvel.

O alcatrão insolúvel é a fração negra oleosa e pesada do condensado. É mais denso e viscoso que o licor pirolenhoso, do qual se separa por simples decantação. O alcatrão decantado possui composição rica em compostos químicos, entre eles benzol, tolueno, xilenol, parafinas, fenol, cresol, pirocatequina, guaiacol, furfural, ácido acético e metanol. Esses compostos podem ser utilizados como imunizantes de madeira, para a produção de solventes, tintas e vernizes. O alcatrão tem ampla utilização como combustível para cocção, secagem, geração de vapor, eletricidade, iluminação e pode substituir a lenha em processos industriais, tais como fornos de tijolos (Pinheiro et al., 2008).

De acordo com os mesmos autores, os gases não condensáveis da fumaça da carbonização possuem, em sua composição, gás carbônico, monóxido de carbono, hidrogênio e hidrocarbonetos. Carbonizando a madeira a altas temperaturas e mantendo os produtos gasosos à alta temperatura, o gás combustível produzido pode ser queimado em uma câmara de combustão e eliminado na atmosfera ou utilizado como combustível em processos de secagem ou cogeração.

Pelo fato de não haver conscientização em relação ao uso desses compostos que são gerados, o processo de carbonização da madeira ainda uma atividade poluidora. Mas, a avaliação dos problemas ambientais causados é difícil, devido, principalmente, à falta de dados sobre as emissões gasosas geradas nos sistemas convencionais de carbonização (Pimenta & Barcelos, 2000). Entretanto, a carbonização da madeira é garantia de não emissão de óxidos de enxofre, que são causadores da chuva ácida e, com a reposição das florestas plantadas para fins energéticos, por meio do sequestro de carbono,

obtém-se um equilíbrio entre as emissões e a utilização do CO₂, que é um dos principais responsáveis pelo efeito estufa.

4.3 Qualidade do carvão vegetal

Para qualificar e prever uma melhor utilização econômica do carvão vegetal é necessário que este seja avaliado. Para isso existem procedimentos e normas a serem seguidas. Um exemplo é a análise química imediata do carvão vegetal, na qual se determinam a umidade, os teores de materiais voláteis, o carbono fixo e as cinzas.

A umidade do carvão influencia seu rendimento nos processos em que são empregados. O carvão tem grande facilidade em ganhar e perder umidade, dependendo do ambiente em que se encontra.

Ainda segundo os mesmos autores, a umidade afeta o volume de carvão utilizado. Quanto maior for a umidade do carvão, maior será a quantidade de carvão necessária para a redução do minério de ferro. Dessa forma, o excesso de carvão ocupa um lugar no forno que poderia ser utilizado pela carga de minério, diminuindo a produtividade do processo de redução.

O teor de voláteis é uma das características mais importantes dos combustíveis sólidos. Ele determina a facilidade de ignição, a estabilidade da chama e a velocidade de combustão. Um alto teor de voláteis facilita a ignição e a combustão. Os combustíveis com 100% de voláteis (líquidos e gases) têm combustão praticamente instantânea, enquanto para a combustão dos sólidos é necessário um tempo inversamente proporcional ao teor de voláteis (Pinheiro et al., 2008).

Segundo Carmo (1988), os fatores que influenciam o teor de materiais voláteis do carvão vegetal são a composição química da madeira, a taxa de aquecimento e a temperatura de carbonização, sendo este último o parâmetro principal que regula os teores de materiais voláteis e carbono fixo.

Quanto maior o teor de materiais voláteis, maior expansão gasosa haverá durante a descida do carvão no alto-forno, gerando mais trincas e maior porosidade. Com o aumento desta última, as reações de gaseificação tendem a ocorrer no interior do carvão, ocasionando perda de massa interna. O carvão assim enfraquecido tende a se degradar com mais facilidade nas condições de operação do alto-forno, aumentando a geração de finos. O teor de materiais voláteis pode influenciar a degradação do carvão no alto-forno, ao acarretar mudanças na porosidade e na resistência mecânica (Pimenta & Barcelos, 2000).

O carbono fixo é definido como a quantidade de carbono presente no carvão. A quantidade de carbono fixo é reflexo da porcentagem de lignina presente na madeira. Alguns estudos, porém, demonstram que essa afirmação não se aplica para algumas espécies (Carmo, 1988).

Segundo Oliveira (1988), o rendimento em carbono fixo apresenta relação diretamente proporcional à densidade básica e aos teores de lignina, extrativo e inversamente proporcional ao teor de hemicelulose.

O comportamento térmico da madeira reflete a soma das respostas térmicas de seus três principais componentes: hemicelulose, celulose e lignina. Destes, as hemiceluloses e a celulose representam cerca de 70% da composição da madeira e são os componentes menos estáveis e se degradam entre 225° e 375°C. Pode-se deduzir que a perda acentuada de massa deve-se à degradação desses dois componentes. A lignina é mais estável e se degrada de modo mais lento, sendo a principal responsável pela formação do carvão vegetal (Goldstein, 1977).

Segundo ainda este mesmo autor, para temperaturas inferiores a 375°C, o rendimento em gases condensáveis varia em função da temperatura devido à estabilidade térmica dos componentes da madeira que na decomposição irão constituir os gases condensáveis e que, acima de 450°C, a formação de gases

condensáveis é desprezível, pois nessa temperatura a lignina atinge seu pico máximo de decomposição.

Estudando o comportamento isolado da lignina e da celulose da madeira frente à carbonização, Brito & Barrichelo (1977a) concluíram que, sob o aspecto de produção de carvão vegetal, os resultados alcançados em seus trabalhos permitem, teoricamente, deduzir que, na carbonização, a celulose da madeira rapidamente se degrada, não conseguindo contribuir com o teor de carbono fixo do carvão. Por outro lado, a lignina, pela sua maior estabilidade, consegue suportar os níveis da carbonização que irão permitir a concentração de carbono fixo no carvão. Em termos práticos, tais fatos confirmam os estudos que demonstram a existência da correlação entre teor de lignina na madeira e teor de carbono fixo no carvão. Confirma-se, portanto, que, na escolha de espécies madeiras para a produção de carvão vegetal, devem-se procurar aquelas com altos teores de lignina.

O teor de cinzas é a massa do resíduo sólido inorgânico existente, após a queima do carvão, na biomassa de origem, ou de terra incorporada ao carvão durante sua manipulação (Pinheiro et al., 2008).

Segundo esses mesmos autores, o carvão vegetal retém todas as cinzas da madeira de origem. O carvão pode conter até 3% de cinzas, compostas, principalmente, de cálcio, potássio e fósforo, além do magnésio, ferro e silício. As madeiras tropicais possuem grande variação do teor de cinzas, algumas com alto teor de sílica. O teor de cinzas é função da espécie e da idade da madeira que lhe deu origem. Ele é mais elevado nas folhosas que nas coníferas e quanto mais velha é a madeira, menor o teor de cinzas e essas possuem menor teor de fósforo e potássio.

Segundo Pimenta & Barcelos (2000), altos teores de cinzas, bem como os sais que estão presentes na composição do carvão vegetal, podem prejudicar a produção de ferro-gusa, ferros-liga e metais não ferrosos, podendo provocar, no

caso do ferro gusa, o fenômeno da segregação, que é o acúmulo de impurezas no centro das peças do metal solidificado, deixando-os duros e quebradiços, menos maleáveis e com campos favoráveis à propagação de fissuras.

Vital et al. (1994) estudaram a variabilidade genética das características de crescimento e das características da madeira e do carvão vegetal de 25 progênies de *Eucalyptus camaldulensis* Dehn, com trinta meses de idade. Esses autores concluíram, em relação às características do carvão vegetal, que os teores médios de lignina e holocelulose foram, respectivamente, iguais a 29,65% e 70,35%. A carbonização da madeira produziu, em média, 32,36% de carvão com 72,28% de carbono fixo, 22,95% de material volátil e 0,77% de cinzas.

Para expressar a qualidade da madeira e do carvão vegetal, a densidade é considerada como um dos melhores parâmetros.

Mendes et al. (1982) afirmam que a densidade é uma característica muito importante na qualidade do carvão, pois, afetará as suas demais propriedades e, ainda, que a densidade do carvão é variável em função de suas características, como granulometria e presença de trincas.

Fatores relacionados com o processo de carbonização podem afetar a densidade do carvão produzido, como a temperatura final de carbonização e a velocidade de aquecimento.

Em seus trabalhos, Oliveira et al. (1982) estudaram tecnologias para o melhor aproveitamento da madeira de *Eucalyptus grandis* de sete localidades diferentes e do coco babaçu para a produção de carvão vegetal em escala de laboratório. Concluíram, para as características de densidade verdadeira e porosidade, que estas aumentam com a temperatura de carbonização. A densidade relativa aparente do carvão tem estreito relacionamento com a densidade da madeira que lhe deu origem. Foi observado, nesse trabalho, que quanto maior a densidade da madeira maior também foi a densidade do carvão produzido e menor a porosidade, e que o carvão proveniente de babaçu tem

maior densidade aparente e menor porosidade do que o carvão de *Eucalyptus grandis*.

Uma densidade muito baixa do carvão vegetal acarreta menor utilização do volume do alto-forno. A densidade do carvão vegetal é cerca de metade da densidade do coque e, quando mais denso o carvão vegetal para um mesmo teor de carbono fixo, maior o tempo de residência da carga metálica na zona de reserva térmica do alto-forno e maior também a capacidade de carga do equipamento em termos de mais carbono carregado por volume. A densidade do carvão vegetal depende diretamente da madeira que lhe deu origem. Assim, mantidas constantes outras propriedades, para usos siderúrgicos e metalúrgicos, a densidade do carvão vegetal deve ser a maior possível (Pimenta & Barcelos, 2000).

Mendes et al. (1982) encontraram um decréscimo na densidade relativa aparente com o aumento da taxa de aquecimento, sugerindo, para usos siderúrgicos, carvões provenientes de carbonizações mais lentas, pois esses apresentam melhores características físicas para tais processos.

Brito & Barrichelo (1977b) verificaram a influência da densidade básica da madeira e teor de lignina sobre o rendimento e a qualidade do carvão, sob o aspecto químico, a partir de madeiras de *Eucalyptus* spp. De acordo com os resultados obtidos, esses autores observaram que houve correlação positiva e altamente significativa entre o rendimento gravimétrico e o teor de carbono fixo. O contrário foi observado com os teores de voláteis e cinzas, que apresentaram correlações negativas com o rendimento.

Trugilho et al. (2005) avaliaram os rendimentos e as características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem na madeira de seis clones de *Eucalyptus* spp. Estes autores observaram tendência de maior produção de carvão vegetal nas posições intermediária e central, exceto para os clones 5 e 6 e também que a densidade relativa aparente do carvão apresentou

comportamento inverso, ou seja, foi maior na posição radial externa e menor na posição radial central, exceto para o clone 3. Esse comportamento era esperado, uma vez que a densidade da madeira apresenta tendência de aumento do centro para a periferia do tronco.

4.4 Características anatômicas do carvão vegetal

A descrição anatômica de lenhos carbonizados é uma ferramenta eficaz, que pode ser utilizada para diversos fins e em estudos de áreas variadas, como, por exemplo, botânica, ecologia, arqueologia e paleontologia, além de facilitar a identificação taxonômica, que pode ser utilizada tanto para fins conservacionistas como prover meios para estudos antracológicos nos trópicos e propiciar estudos paleoambientais e paleoclimáticos (Gonçalves et al., 2008).

Alguns estudos indicam que determinadas características do processo de carbonização podem influenciar a anatomia do carvão vegetal. Entre esses trabalhos cita-se o realizado por Pinheiro & Figueiredo (2001) com *Eucalyptus camaldulensis*, utilizando diferentes temperaturas finais de carbonização. Esses autores demonstraram que quanto maior a temperatura final de carbonização menor é a taxa de conversão de carvão vegetal, consequência da maior degradação da biomassa e da maior liberação de voláteis e gases não condensados. Os mesmos autores afirmam que quanto menor a taxa de aquecimento, menor a decomposição do carvão vegetal após a temperatura de estabilização da carbonização. Isto se deve à existência de uma diferença de temperatura entre o forno e o interior da amostra, diferença esta que é função da taxa de aquecimento e dos mecanismos de transferência de calor e massa no interior da amostra.

Um dos aparelhos utilizados para estudos de anatomia em carvão vegetal é o microscópio eletrônico de varredura (MEV), que é um dos mais versáteis instrumentos disponíveis para a observação e a análise de características

microestruturais de objetos sólidos. A principal razão de sua utilidade é a alta resolução que pode ser obtida quando as amostras são observadas. Valores da ordem de 2 a 5 nanômetros são geralmente apresentados por instrumentos comerciais, enquanto instrumentos de pesquisa avançada são capazes de alcançar uma resolução melhor que 1 nm (Nagatani et al., 1987).

Outra característica importante do MEV é a aparência tridimensional da imagem das amostras, resultado direto da grande profundidade de campo. Permite também o exame em pequenos aumentos e com grande profundidade de foco, o que é extremamente útil, pois a imagem eletrônica complementa a informação dada pela imagem óptica.

Para Mannheim (2002), a formação da imagem do microscópio de varredura foi, provavelmente, o desenvolvimento mais importante em microscopia no século XX, introduzindo um novo conceito na visualização de microestruturas.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Carbonização da madeira e qualidade do carvão

5.1.1 Primeira carbonização - carbonização das amostras retiradas de metro em metro

Para a carbonização em escala de laboratório foi utilizado o material proveniente da amostragem de metro em metro. De cada árvore, em todas as classes diamétricas (14,2; 11,4 e 8,1 cm), foram retirados discos de 2,5 cm de espessura nas posições da base, 1,3 m de altura do solo (DAP) e, a partir desse ponto, de metro em metro, até a altura comercial do tronco, considerado até 5 cm de diâmetro. Dos discos foram utilizadas duas cunhas opostas para a carbonização.

As carbonizações foram realizadas em um forno elétrico (mufla) adaptado (Figura 1). O controle do aquecimento foi manual, com incrementos de 50°C a cada 30 minutos, o que corresponde a uma taxa média de 1,67°C por minuto. A temperatura inicial foi sempre igual a 150°C e a temperatura máxima, de 450°C, permanecendo estabilizada por um período de 30 minutos. O tempo total da carbonização foi, portanto, de 4 horas.

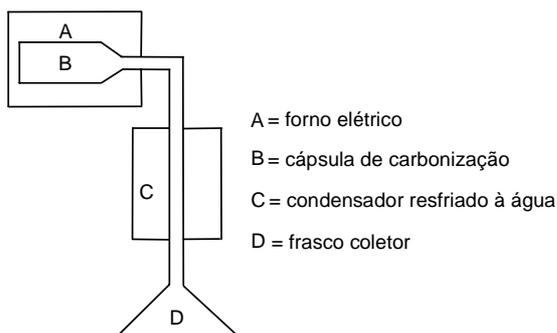


FIGURA 1 Esquema do equipamento utilizado nas carbonizações.

Após cada carbonização, foi determinado o rendimento gravimétrico de carvão, de líquido pirolenhoso e por diferença de gases não-condensáveis, todos em relação à massa da madeira seca. Foi determinado, também, o rendimento em carbono fixo.

Realizou-se análise química imediata do carvão para determinar o teor de materiais voláteis, cinzas e de carbono fixo, conforme a Norma NBR 8112 (Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 1983).

Devido à pequena quantidade de carvão produzido, a densidade relativa aparente do carvão vegetal foi determinada pelo método hidrostático, por meio da imersão em água. A densidade relativa aparente média foi considerada como sendo a média aritmética, levando-se em consideração todos os pontos de amostragem longitudinal ao longo do tronco, para cada árvore.

5.1.2 Segunda carbonização - carbonização das amostras retiradas no DAP e posições longitudinais

Foram utilizados os discos retirados a 1,30 m de altura do solo (DAP) e a 2%, 10%, 30% e 70% da altura comercial, considerada até 5 cm de diâmetro, sendo amostrados os dois lados em relação à medula, em que o número de amostras radiais retiradas foi dependente do diâmetro do disco. Para facilitar a operação de carbonização das amostras, as mesmas foram agrupadas em feixes, como se observa na Figura 2.

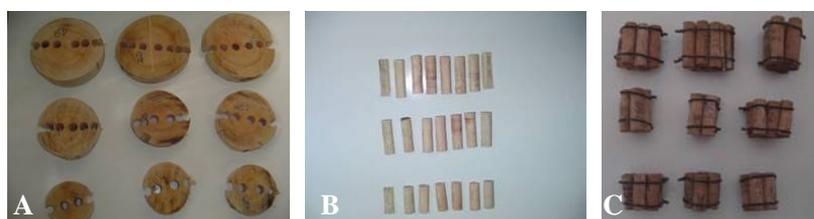


FIGURA 2 Esquema da retiradas das amostras radiais nos discos (A), amostras (B) e feixes para carbonização (C).

As carbonizações foram realizadas em um forno elétrico (mufla) adaptado. O controle do aquecimento foi digital, com incrementos de 15°C a cada 30 minutos, o que corresponde a uma taxa média de 0,5°C por minuto. A temperatura inicial foi sempre igual a 150°C e a temperatura máxima de 450°C, permanecendo estabilizada por um período de 30 minutos. O tempo total de carbonização foi, portanto, de 10 horas.

Após cada carbonização, para as amostras retiradas no DAP, foram determinados os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal e realizada a análise química imediata, conforme a Norma NBR 8112 (ABNT, 1983).

A densidade relativa aparente foi determinada nas amostras retiradas no DAP e nas posições de 2%, 10%, 30% e 70% da altura comercial, em três árvores. Foi utilizado o procedimento de imersão em água, descrito na norma NBR 11941 (ABNT, 2003).

5.2 Aplicação da técnica de densitometria de raios X no carvão

As seções transversais do lenho utilizadas para a determinação da densidade aparente por raios X da madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake foram carbonizadas no Laboratório de Energia da Biomassa da Universidade Federal de Lavras. As carbonizações foram realizadas em um forno elétrico (mufla) adaptado; o controle do aquecimento foi digital, com incrementos de 15°C a cada 30 minutos, o que corresponde a uma taxa média de 0,5°C por minuto. A temperatura inicial foi sempre igual a 150°C e a temperatura máxima, de 450°C, permanecendo estabilizada por um período de 30 minutos. O tempo total de carbonização foi, portanto, de 10 horas.

Do total de amostras carbonizadas foram selecionadas doze, as quais apresentavam superfície de melhor qualidade e estas foram encaminhadas ao Laboratório de Identificação e Anatomia da Madeira do Departamento de

Ciências Florestais, da ESALQ/USP, onde foram analisadas, seguindo a mesma metodologia aplicada à madeira, descrita no item 3.3 deste trabalho.

5.3 Anatomia do carvão vegetal

Das amostras das seções transversais do lenho utilizadas para a determinação da densidade aparente por raios X da madeira que foram carbonizadas, três foram utilizadas para análise em um microscópio eletrônico de varredura (MEV), no Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Ultraestrutural (LME) do Departamento de Fitopatologia da Universidade Federal de Lavras.

As porções de carvão vegetal retiradas em três posições radiais de cada amostra foram fixadas em suportes de alumínio, “stubs”, com fita de carbono dupla face colocada sobre uma película de papel alumínio. Estas amostras foram secas em estufa a 75°C e, depois, observadas no microscópio MEV LEO EVO 40 XVP.

Foram analisadas três posições ao longo do raio, sendo uma externa, uma intermediária e uma central. Foram observados o número e o diâmetro dos poros e verificado o comportamento anatômico da madeira, frente ao processo de carbonização.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Primeira carbonização

6.1.1 Características quantitativas do carvão vegetal

Os valores médios das características quantitativas da carbonização da madeira encontram-se na Tabela 1. Observa-se que o rendimento gravimétrico em carvão vegetal apresentou tendência de aumento com a classe diamétrica, enquanto os rendimentos em líquido pirolenhoso e gases não condensáveis não apresentaram tendência definida. Verifica-se que os coeficientes de variação podem ser considerados baixos para o rendimento gravimétrico em carvão e em líquido pirolenhoso, sendo um pouco mais elevados para os gases não condensáveis. O menor rendimento observado nas classes de menor diâmetro pode estar relacionado com o processo de cernificação da madeira. Nas classes de menor diâmetro, a porcentagem de cerne é menor que a de alburno, o que pode estar relacionado ao menor rendimento em carvão. Trugilho et al. (2005) encontraram maiores rendimentos em carvão na madeira obtida na porção central do lenho.

TABELA 1 Valores médios para as características quantitativas da carbonização da madeira do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.

Classe (cm)	Rendimento gravimétrico (%)		
	Carvão	Líquido pirolenhoso	Gases*
8,1	33,68	48,27	18,05
	(3,30)	(6,98)	(15,26)
11,4	34,35	48,32	17,33
	(2,94)	(4,12)	(10,32)
14,2	35,07	46,69	18,24
	(3,11)	(3,81)	(12,84)

Valores entre parênteses representam os coeficientes de variação (%).

* Gases não condensáveis.

6.1.2 Avaliação física e química imediata do carvão vegetal

Na Tabela 2 estão apresentados os valores médios de densidade relativa aparente e da análise química imediata do carvão vegetal. Observa-se que o efeito de classe diamétrica somente foi significativo para o teor de cinzas no carvão vegetal. Verifica-se também a baixa magnitude dos coeficientes de variação, exceto para a umidade e o teor de cinzas. A maior variação observada no teor de umidade ocorreu devido ao fato de o carvão ficar guardado, esperando para análise, em recipiente não lacrado, o que provocou o seu umedecimento com o passar do tempo.

Trugilho et al. (2005) encontraram valores maiores de cinzas na madeira produzida mais externamente ao tronco das árvores, ou seja, na região do alburno. Esse fato pode explicar a diferença nos teores de cinzas nas classes diamétricas, em que o maior teor ocorreu na menor classe, a que apresentou a maior porcentagem de alburno.

Vital et al. (1994), estudando a variabilidade genética das características de crescimento e das características da madeira e do carvão vegetal de 25 progênies de *Eucalyptus camaldulensis* Dehn, encontraram, em média, 32,36% de carvão com 72,28% de carbono fixo, 22,95% de material volátil e 0,77% de cinzas.

TABELA 2 Valores médios da densidade relativa aparente (DRA) e análise química imediata do carvão do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.

Classe (cm)	DRA (g/cm ³)	Teor de (%)			
		Umidade	Materiais voláteis	Cinzas	Carbono fixo
8,1	0,368 A (4,53)	4,09 (36,34)	26,72 A (8,60)	0,21 A (36,79)	73,07 A (3,21)
11,4	0,361 A (6,12)	3,54 (27,43)	26,99 A (8,98)	0,17 AB (21,95)	72,84 A (3,34)
14,2	0,364 A (12,15)	4,41 (24,83)	27,30 A (8,69)	0,16 B (22,66)	72,54 A (3,33)

Valores entre parênteses representam os coeficientes de variação (%).

Valores médios seguidos de mesma letra, nas colunas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Pelos dados da Tabela 2, verifica-se, ainda, que os teores de cinzas e de carbono fixo apresentaram tendência de redução, enquanto o teor de materiais voláteis apresentou tendência de aumento com a classe diamétrica. Apesar da tendência de redução para o teor de carbono fixo e de aumento para o teor de materiais voláteis, com a classe diamétrica verifica-se que esse efeito não é significativo. Este fato está de acordo com o normalmente observado na literatura (Botrel et al., 2007), em que os teores de carbono e materiais voláteis são mais influenciados pela temperatura e pela taxa de aquecimento do sistema, o que, neste trabalho, foi constante para todos os tratamentos.

6.2 Segunda carbonização

6.2.1 Características quantitativas do carvão vegetal

Os valores médios de rendimento gravimétrico para as amostras retiradas a 1,30 m do solo (DAP), em relação à posição radial, considerando os dois lados em relação à medula, para as três classes diamétricas em estudo, são apresentados na Tabela 4. Observa-se que os valores de rendimento gravimétrico tenderam a aumentar da casca para a medula, para todas as classes diamétricas.

Nota-se também que os valores médios de rendimento gravimétrico em carvão vegetal tenderam a diminuir com a redução da classe diamétrica.

TABELA 4 Valores médios de rendimento gravimétrico (%) em carvão do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, para as três classes diamétricas no DAP.

Classe (cm)	Lado A	Distância da medula (cm)										Lado B
		5,7	5	3,5	1,5	1,50	3,40	4,80	5,70	6,00		
14,2	34,20	32,31	32,97	35,40	36,13	36,40	35,88	33,08	33,06	32,39	34,16	
		Distância da medula (cm)										
11,4			3,9	2,8	1,1	1,3	2,9	4				
	33,48		32,10	33,09	35,23	35,68	34,83	32,58			34,36	
		Distância da medula (cm)										
8,1			2,6	0,9	1,1	2,8						
	33,11		32,82	33,40	33,13	32,92					33,03	

Considerando as três classes diamétricas, o valor médio de rendimento gravimétrico encontrado neste trabalho (33,8%) foi próximo ao encontrado por Botrel et al. (2007), de 35,03%, mas superior ao valor encontrado por Ribeiro & Machado (2005), estudando *Eucalyptus urophylla*, que foi 26,91%.

A classe diamétrica de 14,2 cm foi a que apresentou, de forma geral, os valores mais altos para o rendimento gravimétrico, com 34,2% e a classe diamétrica de 8,1 cm apresentou os menores valores médios, em torno de 33%. Os valores de rendimento gravimétrico em carvão vegetal encontrados neste trabalho estão de acordo com os relatados por Assis et al. (2008).

O gráfico da Figura 3 ilustra a variação radial médio do rendimento gravimétrico para a classe 14,2 cm. Observa-se que o comportamento da variação do rendimento gravimétrico é semelhante para os lados em relação à medula e que os maiores valores de rendimento gravimétricos ocorreram próximos à medula, havendo uma redução no sentido da casca. Trugilho et al.

(2005) também verificaram uma tendência de maior produção de carvão vegetal nas posições intermediária e central das amostras carbonizadas.

O rendimento gravimétrico tem correlação positiva com o teor de lignina total e o teor de extrativos. Comparando com os valores de extrativos totais e de lignina da madeira de origem, verifica-se semelhança na variação dos valores numéricos.

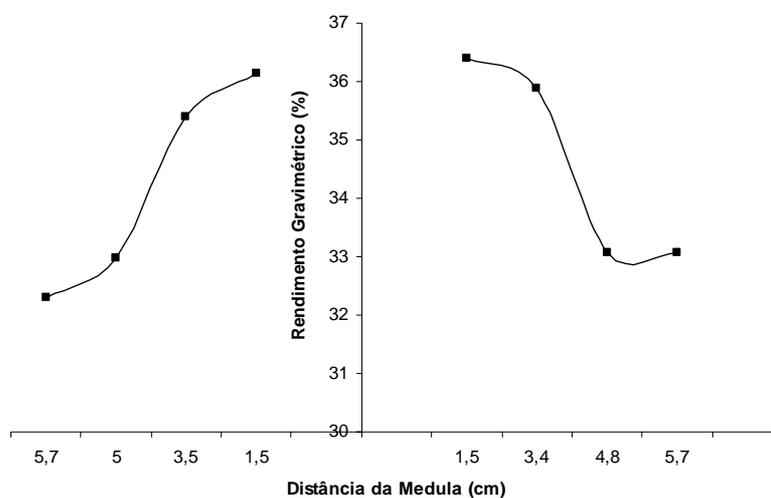


FIGURA 3 Variação radial médio do rendimento gravimétrico de carvão do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, para a classe 14,2 cm.

Na Tabela 5 observam-se os valores médios de densidade relativa aparente do carvão para as amostras de madeira retiradas a 1,30 m do solo em relação à posição radial, considerando os dois lados em relação à medula, para as três classes diamétricas.

TABELA 5 Valores médios de densidade relativa aparente (g/cm^3) do carvão do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, por classe diamétrica no DAP.

Classe (cm)	Lado A	Distância da medula (cm)										Lado B
		5,7	5	3,5	1,5	1,50	3,40	4,80	5,70	6,00		
14,2	0,400	0,488	0,444	0,341	0,327	0,341	0,336	0,454	0,454	0,325	0,396	
		Distância da medula (cm)										
11,4	0,400	3,9	2,8	1,1	1,3	2,9	4				0,379	
		0,471	0,378	0,351	0,326	0,376	0,435					
		Distância da medula (cm)										
8,1	0,394	2,6	0,9	1,1	2,8						0,401	
		0,430	0,358	0,349	0,453							

Pelos dados da Tabela 5 observa-se que os valores médios de densidade relativa aparente aumentaram, no sentido medula-casca, em todas as classes diamétricas. Observa-se também que não ocorreu diferença significativa entre os valores de densidade relativa aparente entre as classes diamétricas, com valor médio geral de $0,395 \text{ g/cm}^3$. A classe diamétrica de 11,4 cm apresentou valor médio de densidade relativa aparente ligeiramente inferior, de $0,390 \text{ g/cm}^3$.

Trugilho et al. (2005) também verificaram o mesmo comportamento de variação da densidade relativa aparente do carvão vegetal, ou seja, maior na posição radial externa e menor na posição radial central. Esse comportamento era esperado, uma vez que a densidade da madeira apresenta tendência de aumento do centro para a periferia do tronco.

O gráfico da Figura 4 ilustra a variação radial médio da densidade relativa aparente para a classe 14,2 cm. Observa-se similaridade entre os lados em relação à medula, o que também ocorre para a classe 11,4 cm (Figura 5), porém, com menor intensidade, o que pode ser explicado pelo número de amostras, as quais foram dependentes do diâmetro do disco.

Como se observa nos gráficos das Figuras 4 e 5, os valores de densidade relativa aparente tendem a aumentar da medula para casca nas classes 14,2 e 11,4 cm, comportamento este inverso ao rendimento gravimétrico, que tende a diminuir com o afastamento da medula. Trugilho et al. (2005) também encontram valores mais elevados de densidade relativa aparente na região próxima à casca, sendo esse comportamento esperado, uma vez que a densidade da madeira apresenta tendência de aumento do centro para a periferia do tronco.

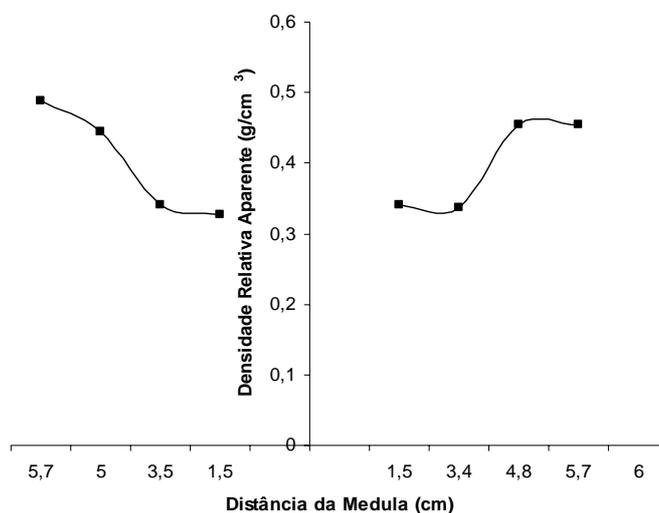


FIGURA 4 Variação radial médio da densidade relativa aparente do carvão do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, para a classe 14,2 cm.

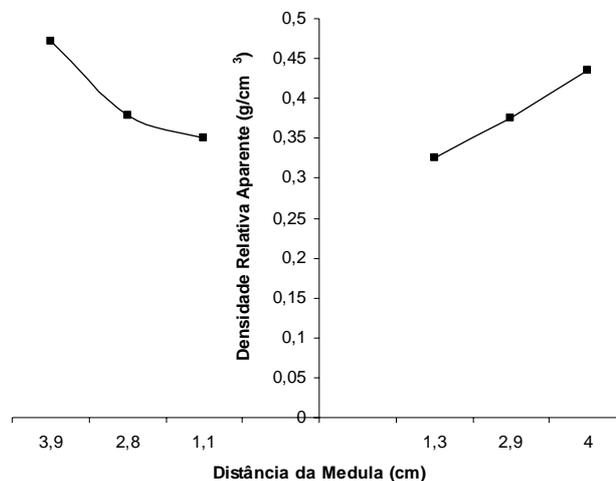


FIGURA 5 Variação radial médio da densidade relativa aparente do carvão do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, para a classe 11,4 cm.

Na Tabela 6 são apresentados os valores médios de densidade relativa aparente do carvão no sentido radial e longitudinal. Verifica-se que os valores médios de densidade relativa aparente tendem a aumentar no sentido medula-casca e base-topo para as classes diamétricas, considerando os dois lados em relação à medula. Este resultado foi menos percebido na classe diamétrica de 11,4 cm. Nota-se que, no sentido longitudinal, os valores médios de densidade relativa aparente para a classe 11,4 cm aumentaram até 10% da altura comercial, ocorrendo um decréscimo da densidade relativa aparente até 30% e, a partir deste ponto, os valores tendem a aumentar até 70% da altura comercial.

Como observado para os valores de densidade relativa aparente do carvão vegetal originado das amostras retiradas a 1,30 m do solo (DAP), a mesma variação da densidade relativa aparente ocorre para as amostras no sentido radial retiradas a 2%, 10%, 30% e 70% da altura comercial, para as três árvores em estudo, ou seja, maior na posição radial externa e menor na posição

radial central. Esse comportamento já era esperado, uma vez que a densidade da madeira apresenta tendência de aumento do centro para a periferia do tronco, como descrito por Tomazello Filho (1987), Silva et al. (2004) e Trugilho et al. (2005) e observado para densidade aparente, no item 6.2 deste trabalho.

Oliveira et al. (2005) estudaram a madeira de *C. citriodora*, *E. cloeziana*, *E. paniculata*, *E. tereticornis*, *E. pilularis* e *E. urophylla* e constataram que ocorreu queda da densidade no topo das árvores, o que não foi verificado neste trabalho, pois a amostragem ocorreu até 70% da altura comercial.

Alzate et al. (2005) também encontraram este mesmo padrão de variação para madeira de *E. grandis* x *E. urophylla*, ou seja, ocorreu um aumento da densidade básica no sentido base-topo.

TABELA 6 Valores médios de densidade relativa aparente (g/cm^3) do carvão no sentido radial e longitudinal.

Árvore	Classe (cm)	Altura (%)	Lado A	Distância da medula (cm)										Lado B		
				6	5,7	5	3,5	1,5	1,5	3,4	4,8	5,7	6			
1	14,2	2	0,411	0,477	0,458	0,428	0,357	0,335	0,309	0,312	0,366	0,434	0,461	0,377		
		10	0,423	0,534	0,481	0,376	0,369	0,357	0,371	0,325	0,343	0,422	0,540	0,400		
		30	0,426		0,507	0,471	0,377	0,351	0,373	0,383	0,476	0,523		0,439		
		70	0,466			0,541	0,440	0,419	0,399	0,426	0,492			0,439		
		Média		0,505	0,482	0,454	0,386	0,366	0,363	0,361	0,420	0,460	0,501			
24	11,4					Distância da medula (cm)										
		Altura (%)	Lado A		4,41	4,63	3,88	2,9	1,69	1,84	4,95	5,14		Lado B		
		2	0,364		0,458	0,412	0,347	0,237	0,365	0,369	0,403	0,472		0,402		
		10	0,414		0,495	0,421	0,365	0,374	0,317	0,346	0,447	0,496		0,402		
		30	0,407			0,480	0,415	0,325	0,287	0,436	0,471			0,398		
70	0,404				0,458	0,350	0,376	0,454				0,415				
Média			0,476	0,438	0,397	0,322	0,336	0,401	0,440	0,484						
48	8,1					Distância da medula (cm)										
		Altura (%)	Lado A		6,28	4,33	2,9	2,61	2,7	6,34			Lado B			
		2	0,371		0,440	0,367	0,305	0,313	0,368	0,420			0,367			
		10	0,393		0,488	0,351	0,341	0,295	0,361	0,459			0,372			
		30	0,406		0,485	0,374	0,361	0,342	0,370	0,483			0,398			
70	0,439			0,510	0,367	0,545	0,506				0,526					
Média			0,471	0,400	0,344	0,374	0,401	0,454								

O comportamento médio geral da densidade relativa aparente por posição longitudinal e classe diamétrica para as árvores em estudo pode ser mais bem visualizado no gráfico da Figura 7. Os maiores valores médios de densidade relativa aparente do carvão ocorreram na árvore 1, pertencente à classe diamétrica de 14,2 cm, com 0,423 g/cm³, seguida pela árvore 48, da classe 8,1 cm, com 0,409 g/cm³ e, por fim, a árvore 24, pertencente à classe diamétrica de 11,4 cm, com 0,401 g/cm³.

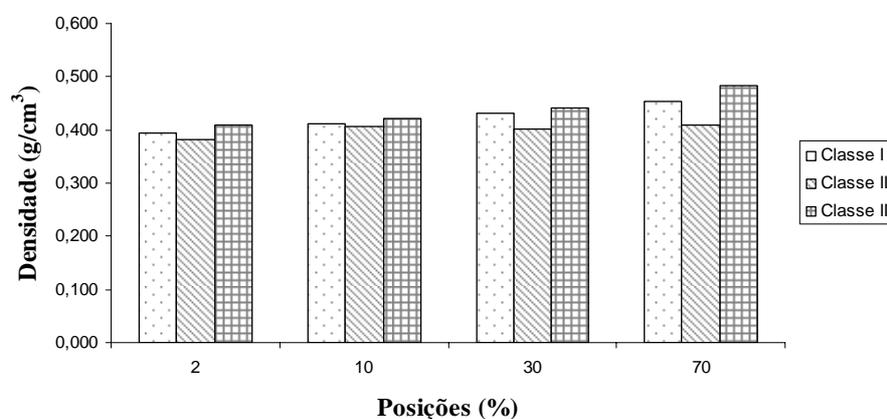


FIGURA 7 Variação dos valores de densidade relativa aparente do carvão do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, por posição longitudinal e classe diamétrica.

Este resultado está em conformidade com o encontrado por Pádua (2009). Este autor, estudando a variação da densidade básica na madeira de um clone de híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, encontrou a mesma tendência, ou seja, aumento da densidade básica no sentido medula-casca.

6.3 Densitometria por raios X

Na Tabela 7 estão apresentados os valores de densidade relativa aparente média, máxima, mínima, espessura e comprimento das amostras de madeira carbonizadas do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, para cada classe diamétrica, na altura de 1,30 m do solo (DAP).

TABELA 7 Valores médios de densidade relativa aparente, espessura e comprimento das amostras de carvão do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake no DAP.

Classe (cm)	Árvore	Densidade (g/cm ³)			Espessura (mm)	Comprimento (cm)
		Média	Máxima	Mínima		
14,2	1	0,252 (21,94)	0,451 (12,27)	0,178 (31,09)	1,74	9,97
	9	0,262 (19,53)	0,509 (10,05)	0,191 (26,83)	1,75	9,53
	14	0,25 (19,56)	0,391 (12,52)	0,184 (26,59)	1,81	9,44
	15	0,274 (16,41)	0,523 (8,6)	0,206 (21,81)	1,81	9,33
Média		0,26 (19,3)	0,469 (10,7)	0,19 (26,41)	1,78	9,57
11,4	28	0,239 (18,81)	0,384 (11,7)	0,174 (25,8)	1,74	6,79
	29	0,216 (18,13)	0,374 (10,47)	0,15 (26,11)	1,8	6,89
	30	0,161 (26,33)	0,314 (13,5)	0,089 (47,62)	1,77	7,05
	42	0,19 (27,2)	0,405 (12,76)	0,122 (42,36)	1,77	7,76
Média		0,201 (22,11)	0,369 (12,06)	0,134 (33,29)	1,77	7,12
8,1	44	0,162 (30,24)	0,327 (14,98)	0,095 (51,57)	1,78	5,36
	47	0,193 (25,31)	0,358 (13,65)	0,12 (40,71)	1,72	5,08
	49	0,109 (31,49)	0,213 (16,12)	0,042 (81,74)	1,76	6,25
	50	0,204 (20,05)	0,325 (12,58)	0,109 (37,52)	1,81	5,58
Média		0,167 (25,91)	0,306 (14,150)	0,092 (47,29)	1,77	5,57

Valores entre parênteses representam os coeficientes de variação (%).

Como se observa na Tabela 7, os valores de densidade relativa aparente média apresentaram tendência a diminuir com a redução da classe diamétrica, tendo o valor mais baixo sido encontrado na classe de 8,1 cm, com $0,167 \text{ g/cm}^3$. Os valores mais altos foram encontrados na classe de 14,2 cm, com $0,260 \text{ g/cm}^3$, seguida pela classe de 11,4 cm, com $0,201 \text{ g/cm}^3$. O mesmo comportamento foi observado para as densidades relativas aparentes máximas e mínimas, cujos valores médios de máxima densidade nas classes de 8,1 cm, 11,4 cm e 14,2 cm foram, respectivamente, de $0,306 \text{ g/cm}^3$, $0,369 \text{ g/cm}^3$ e $0,469 \text{ g/cm}^3$.

A espessura de todas as amostras independente da classe diamétrica não sofreu muita variação, com valor médio de 1,78 mm, para todas as classes diamétricas.

Em relação ao comprimento das amostras, este foi variável em função do diâmetro das árvores. As amostras de maiores tamanhos estão dentro da classe diamétrica de 14,2 cm, com valor médio de 9,57 cm; na segunda classe de 11,4 cm, média de 7,12 cm e, na classe 8,1 cm, amostras com 5,57 cm de comprimento.

O perfil de densidade relativa aparente da amostra diametral do carvão vegetal pertencente à classe diamétrica 14,2 cm está representado na Figura 8. Observa-se que o perfil de densidade relativa aparente do carvão foi semelhante ao perfil da densidade aparente da madeira da mesma amostra. Também foi observada, para a amostra de carvão vegetal, a presença de picos de densidade relativa aparente delimitando duas regiões distintas, uma região interna (C), da medula e duas regiões externas (A e B).

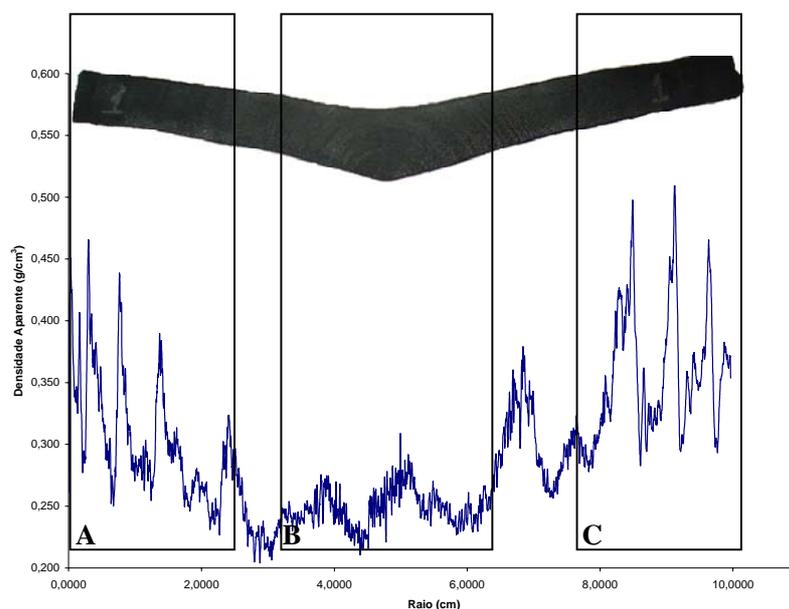


FIGURA 8 Perfil da densidade relativa aparente do carvão do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake da amostra diametral da árvore 1 classe diamétrica 14,2 cm.

Observa-se, pela Figura 8, que ocorreu um aumento da densidade relativa aparente do centro para as extremidades da amostra, seguindo o mesmo comportamento observado na amostra de madeira (item 6.2 deste trabalho). Esse resultado era esperado, pois a densidade relativa aparente do carvão vegetal é dependente da densidade da madeira que lhe deu origem.

Os resultados da comparação entre as amostras de madeira antes do processo de carbonização e as amostras de carvão vegetal para quatro árvores e classes diamétricas podem ser observados na Tabela 8.

TABELA 8 Valores médios de densidade relativa aparente, espessura e comprimento das amostras de madeira e carvão do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.

Classe (cm)	Árvore	Densidade (g/cm ³)						Espessura (mm)		Comprimento (cm)	
		Média		Máxima		Mínima		Madeira	Carvão	Madeira	Carvão
		Madeira	Carvão	Madeira	Carvão	Madeira	Carvão				
14,2	1	0,536 (16,85)	0,252 (21,94)	0,925 (9,76)	0,451 (12,27)	0,392 (23,04)	0,178 (31,09)	1,97	1,74	12,47	9,97
	9	0,601 (20,74)	0,262 (19,53)	1,122 (11,11)	0,509 (10,05)	0,400 (31,17)	0,191 (26,83)	1,93	1,75	11,95	9,53
	14	0,579 (22,02)	0,250 (19,56)	0,989 (12,88)	0,391 (12,52)	0,370 (34,40)	0,184 (26,59)	1,97	1,81	11,52	9,44
	15	0,523 (19,87)	0,274 (16,41)	0,844 (12,31)	0,523 (8,60)	0,364 (28,52)	0,206 (21,81)	1,97	1,81	11,57	9,33
Média		0,560 (19,28)	0,260 (19,30)	0,970 (11,21)	0,469 (10,70)	0,382 (28,30)	0,190 (26,41)	1,96	1,78	11,88	9,57
11,4	28	0,635 (22,84)	0,239 (18,81)	1,305 (11,11)	0,384 (11,70)	0,429 (33,84)	0,174 (25,80)	1,94	1,74	8,61	6,79
	29	0,731 (24,69)	0,216 (18,13)	1,315 (13,72)	0,374 (10,47)	0,463 (38,94)	0,150 (26,11)	1,96	1,80	8,70	6,89
	30	0,655 (26,17)	0,161 (26,33)	1,205 (14,22)	0,314 (13,50)	0,374 (45,78)	0,089 (47,62)	1,95	1,77	8,63	7,05
	42	0,583 (24,06)	0,190 (27,20)	1,157 (12,12)	0,405 (12,76)	0,386 (36,38)	0,122 (42,36)	1,93	1,77	9,48	7,76
Média		0,651 (24,16)	0,201 (22,11)	1,246 (12,66)	0,369 (12,06)	0,413 (37,40)	0,134 (33,29)	1,95	1,77	8,85	7,12

“...Continua...”

“TABELA 8, Cont.”

8,1	44	0,552 (22,28)	0,162 (30,24)	1,076 (11,42)	0,327 (14,98)	0,374 (32,83)	0,095 (51,57)	1,96	1,78	6,73	5,36
	47	0,498 (25,39)	0,193 (25,31)	1,068 (11,82)	0,358 (13,65)	0,351 (35,97)	0,120 (40,71)	1,96	1,72	6,50	5,08
	49	0,458 (22,91)	0,109 (31,49)	0,901 (11,64)	0,213 (16,12)	0,325 (32,27)	0,042 (81,74)	1,98	1,76	7,77	6,25
	50	0,436 (15,68)	0,204 (20,05)	0,657 (10,41)	0,325 (12,58)	0,332 (20,59)	0,109 (37,52)	1,96	1,81	6,93	5,58
Média		0,486 (22,19)	0,167 (25,91)	0,926 (12,11)	0,306 (14,15)	0,346 (32,37)	0,092 (47,29)	1,97	1,77	6,98	5,57

Valores entre parênteses representam os coeficientes de variação (%).

Observa-se que ocorreu uma diminuição nos valores de densidade aparente da madeira para a densidade relativa aparente do carvão vegetal, o que se deve ao processo de carbonização, no qual ocorre a degradação térmica dos constituintes da madeira.

A porcentagem de redução da densidade aparente média da madeira para o carvão vegetal foi variável em função da classe diamétrica, tendo a classe diamétrica de 11,4 cm sido a que apresentou a maior redução, com 69%, seguida pela classe de 8,1 cm, com 65%, e a classe 14,1 cm foi a que apresentou o menor percentual de redução, com 53%. Este mesmo comportamento foi observado para a densidade aparente máxima da madeira em relação ao carvão vegetal, em que a maior redução também ocorreu na classe diamétrica de 11,4 cm (70%), na classe de 8,1 cm (66%) e na classe de 14,2 cm (51%).

Para a densidade aparente mínima da madeira em relação à do carvão vegetal, a maior redução ocorreu na classe diamétrica 8,1 cm, com 74%, seguida da classe 11,4 cm, com 68% e a classe de 14,1 cm, com 50%.

A espessura média das amostras, que inicialmente era de 1,96 mm, sofreu uma diminuição com o processo de carbonização, ficando com valores próximos para todas as classes diamétricas, que foi de 1,78 mm, o que representou redução de apenas 9%. Essa diminuição na espessura da amostra não interferiu na coleta de dados para a determinação da densidade aparente, o que não era esperado, pois o aparelho tem uma calibração inicial para madeira e esta foi mantida para as amostras de carvão vegetal.

As amostras sofreram maior redução em seu comprimento, para todas as classes diamétricas em estudo. Antes do processo de carbonização, as amostras possuíam, em média, 9,24 cm de comprimento e, após, essas mesmas amostras apresentaram redução média de 20%, passando a ter 7,42 cm no comprimento.

O percentual de redução das amostras foi maior no sentido do comprimento do que na espessura, o que se deve à disposição dos tecidos vegetais e à organização das células.

O perfil de variação da densidade aparente da amostra diametral de madeira e carvão vegetal da árvore 1, referente à classe diamétrica 14,2 cm, é apresentado na Figura 9.

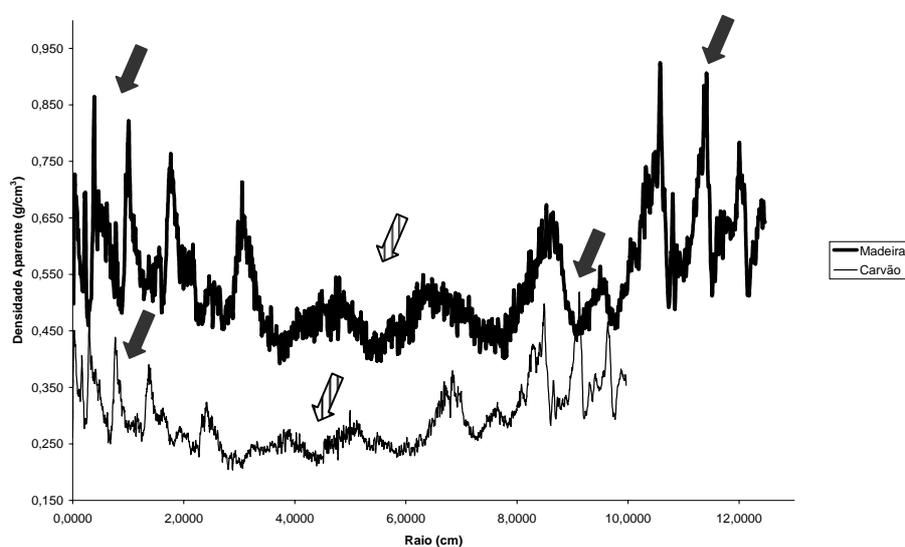


FIGURA 9 Variação da densidade aparente da madeira e do carvão do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.

O primeiro perfil representa a variação da densidade aparente da madeira de uma extremidade à outra da amostra, passando pela medula e o segundo perfil representa a variação da densidade relativa aparente do carvão para a mesma amostra. Verifica-se que a variação foi semelhante entre os dois perfis, porém, a magnitude da variação foi reduzida no carvão vegetal. Isto ocorreu devido à degradação térmica da madeira e à eliminação dos materiais voláteis que, normalmente, ocorre durante a carbonização.

Analisando o perfil densitométrico da madeira e do carvão vegetal, verificam-se similaridades entre os dois, ocorrendo valores menores de densidade relativa aparente do lenho na região central (setas rachuradas), com aumento gradativo em direção à casca. Oscilações dos valores radiais ocorreram e isso é devido aos elementos de vaso de maior diâmetro; picos de densidade (setas cheias) são verificados e estes podem ser uma resposta de camadas de crescimento de fibras espessadas e menor diâmetro dos vasos.

Esse mesmo comportamento de variação de densidade aparente para a madeira foi relatado por Alzate (2004) e Tomazello Filho et al. (2008).

Comparando-se os métodos para a determinação da densidade relativa aparente do carvão, observou-se que ocorreram diferenças nos valores encontrados. Essas diferenças são decorrentes dos métodos utilizados na sua determinação, tendo, no método de imersão em água, os valores encontrados sido, de forma geral, maiores que os da densidade determinada pelo método de raios X. Este fato está relacionado ao cômputo dos espaços vazios das amostras no método de imersão, enquanto que nos raios X isso não ocorre.

6.4 Anatomia do carvão vegetal

Na Tabela 9 estão apresentados os valores médios de diâmetro e frequência dos poros nas amostras de carvão do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.

TABELA 9 Valores médios de diâmetro e número de poros no carvão do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.

Classe diamétrica (cm)	Amostra	Diâmetro (μm)	Número (mm^2)
14,2	A	110	27
	B	86	46
	C	88	50
	Média	95	41
11,4	A	110	25
	B	88	40
	C	101	55
	Média	100	40
8,1	A	116	29
	B	124	30
	C	114	34
	Média	118	31

A, B e C = região externa, mediana e interna à medula, respectivamente.

Observa-se, pelos dados da Tabela 9, em relação ao diâmetro dos poros das amostras de carvão vegetal, que ocorreu, para a classe 14,2 cm, uma redução no diâmetro dos poros da região externa da amostra para a região mediana, seguida por um ligeiro aumento até a região central da amostra. Esse mesmo comportamento foi verificado para a classe 11,4 cm. Para a classe 8,1 cm ocorreu um aumento no diâmetro do poro da região externa para a mediana, seguido de um decréscimo neste valor até a região central da amostra.

A frequência dos poros por milímetro apresentou comportamento crescente da região mais externa para a interna da amostra, ou seja, da casca para a medula para as três classes diamétricas. Porém, para a classe de 8,1 cm, a redução não foi muito acentuada.

As amostras apresentam porosidade difusa, poros dispersos, solitários e múltiplos e frequência de 41 (27-50) poros por mm^2 para classe 14,2 cm, 40 (25-55) poros por mm^2 para classe 11,4 cm e 31 (29-34) poros por mm^2 para classe

8,1 cm. O diâmetro dos poros foi de 95 (86-110) μm , para classe 14,1 cm, 100 (88-110) μm , para classe 11,4 cm, e 118 (114-124) μm , para classe 8,1 cm.

Analisando-se o número de poros e a densidade relativa aparente do carvão, observa-se que a mesma aumentou no sentido medula-casca, enquanto o número de poros apresentou comportamento inverso, ou seja, diminuiu da medula para casca. Este fato justifica o comportamento apresentado pela densidade relativa aparente do carvão no sentido medula-casca.

Na Figura 10 observam-se as amostras do carvão vegetal, para três classes diamétricas, 14,2 cm (A, B, C), 11,4 cm (D, E, F) e 8,1 cm (G, H, I), em três posições diferentes ao longo do raio: posição externa (A, D, G), mediana (B, E, H) e interna (C, F, I).

Observa-se, para a classe 14,2 cm, que ocorreram mudanças na frequência dos poros no sentido medula-casca, com redução da frequência dos mesmos com o distanciamento da medula. O mesmo comportamento foi observado para as demais classes diamétricas.

Na Figura 11 observam-se as eletromicrografias da região central das amostras do carvão vegetal, para três classes diamétricas, 14,2 cm (A, B, C), 11,4 cm (D, E, F) e 8,1 cm (G, H, I), em três aumentos diferentes (A, D, G), com 30 x, (B, E, H) com 250 x e (C, F, I) com 1.000 x de aumento.

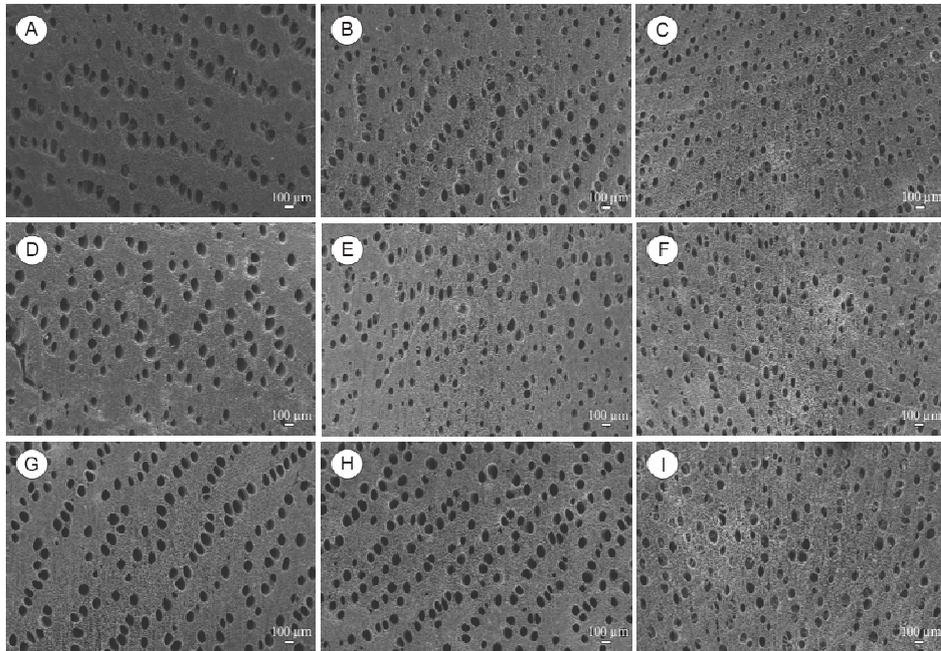


FIGURA 10 Eletromicrografia de varredura mostrando detalhes de três regiões radiais: (A, B, C) classe 14,2 cm, (D, E, F) classe 11,4 cm e (G, H, I) classe 8,1 cm, sendo (A, D, G) região externa, (B, E, H) região mediana e (C, F, I) região interna.

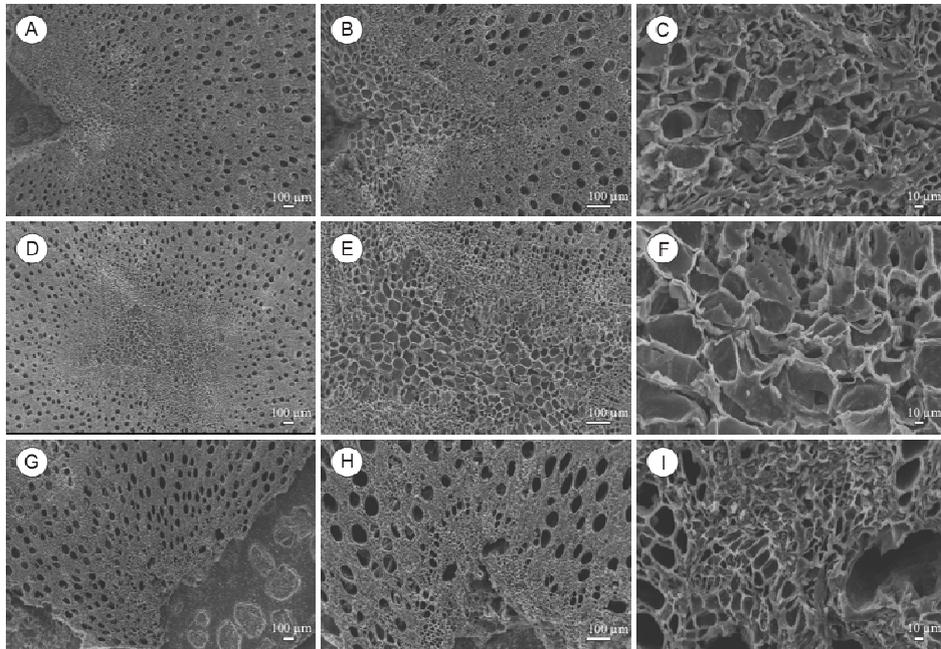


FIGURA 11 Eletromicrografia de varredura mostrando detalhe da região da medula nas amostras de carvão. A, B, C, amostras da classe de 14,2 cm; D, E, F, amostras da classe de 11,4 cm e G, H, I, amostras da classe de 8,1, cm. Aumentos variáveis.

7 CONCLUSÕES

- ✓ Primeira carbonização:
 - a classe diamétrica influenciou significativamente o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, em líquido pirolenhoso e o teor de cinzas do carvão vegetal produzido;
 - o rendimento em gás não condensável, o teor de materiais voláteis e o de carbono fixo não foram influenciados pela classe diamétrica;
 - os teores de cinzas e de carbono fixo apresentaram tendência de redução, enquanto o teor de materiais voláteis apresentou tendência de aumento em relação à classe diamétrica.

- ✓ Segunda carbonização:
 - o rendimento gravimétrico aumentou da casca para a medula, para todas as classes diamétricas e ocorreu redução desta característica com a diminuição das classes diamétricas;
 - os valores de densidade relativa aparente tendem a aumentar no sentido medula-casca, em todas as classes diamétricas.

- ✓ A técnica de densitometria por raios X mostrou-se confiável para a determinação da densidade relativa aparente do carvão vegetal.

- ✓ Os valores de densidade relativa aparente média tenderam a diminuir com a redução da classe diamétrica, ocorrendo aumento da densidade relativa aparente no sentido medula-casca para todas as amostras.

- ✓ Para as três classes diamétricas, a frequência de poros por milímetro apresentou comportamento crescente da região mais externa para a interna das amostras.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALZATE, S. B. A. **Caracterização da madeira de árvores de clones de *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* e *E. grandis* x *urophylla***. 2004. 133 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

ALZATE, S. B. A.; TOMAZELLO FILHO, M.; PIEDADE, S. M. de S. Variação longitudinal da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, *E. saligna* Sm. e *E. grandis* x *urophylla*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 68, p. 87-95, ago. 2005.

ASSIS, C. O. de; TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M.; SILVA, J. R. M. da; LIMA, J. T. Sistema alternativo para carbonização de madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 78, p. 133-140, jun. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**. Rio de Janeiro, 1983. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA. **Estatísticas**. Disponível em: <www.silviminas.com.br>. Acesso em: 12 ago. 2009.

BACHA, C. J. C.; BARROS, A. L. M. Reflorestamento no Brasil: evolução recente e perspectivas para o futuro. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 66, p. 191-203, set. 2004.

BOTREL, M. C. G.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. da S.; SILVA, J. R. M. da. Melhoramento genético das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 3, p. 391-398, maio/jun. 2007.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: 1., densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Piracicaba, v. 14, p. 9-20, 1977a.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. **Comportamento isolados da lignina e da celulose da madeira frente à carbonização**. Piracicaba: IPEF, 1977b. 4 p. (Circular Técnica, 28).

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: 2., densidade da madeira x densidade do carvão. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Piracicaba, n. 20, p. 121-126, 1980.

BRITO, J. O.; MOURA, L. F. de; TACCIN, M. M. Florestas, carvão vegetal e siderurgia no Brasil. **Revista Metalurgia & Materiais**, São Paulo, v. 65, n. 4, p. 264-266, jul./ago. 2009.

CARMO, J. S. **Propriedades físicas e químicas do carvão vegetal destinado a siderurgia e Metalurgia**. 1988. 40 f. Monografia (Pós-graduação *Lato Sensu* em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

COUTINHO, A. R. **Qualidade do carvão vegetal correlacionada com as características da madeira de *Eucalyptus saligna* e temperatura de carbonização**. 1984. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

DUBOC, E.; COSTA, C. F. V.; VELOSO, R. F.; OLIVEIRA, L. S.; PALUDO, A. **Panorama atual da produção de carvão vegetal no Brasil e no Cerrado**. Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 2007. 35 p.

GOLDSTEIN, I. S. **Wood technology: chemical aspects**. Washington: America Chemical Society, 1977. 372 p.

GONÇALVES, T. A. P.; RANGEL, A.; SCHEEL-YBERT, R. Caracterização anatômica do lenho carbonizado de espécies comuns do cerrado: subsídio a estudos antracológicos e conservacionistas. In: SIMPÓSIO NACIONAL CERRADO, 1.; SIMPÓSIO INTERNACIONAL SAVANAS TROPICAIS, 2., 2008, Brasília. **Anais...** Brasília: Parlamundi, 2008. 1 CD-ROM.

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA. **Números de mercado**. Disponível em: <www.acobrasil.org.br>. Acesso em: 7 out. 2009.

MANNHEIMER, W. A. **Microscopia dos materiais**. Rio de Janeiro: E-papers, 2002. 221 p.

MENDES, M. G.; GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. Propriedades e controle de qualidade do carvão vegetal. In: PENEDO, W. R. (Ed.). **Produção e utilização do carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. p. 76-89.

NAGATANI, T.; SAITO, S.; SATO, M.; YAMADA, M. Development of an ultra high resolution scanning electron microscope by means of a field emission source and in-lens system. **Scanning Microscopy**, New York, v. 11, n. 2, p. 901-909, 1987.

O EUCALIPTO na indústria de carvão vegetal. **Revista da Madeira**, Itajaí, n. 75, ago. 2003. Disponível em:
<http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=395&subject=Carvão%20Vegetal&title=O%20eucalipto%20na%20indústria%20de%20carvão%20vegetal>. Acesso em: 5 mar. 2008.

OLIVEIRA, E. de. **Correlações entre parâmetros de qualidade da madeira e do carvão de *Eucalyptus grandis* (W. Hill ex-Maiden)**. 1988. 47 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

OLIVEIRA, J. B.; GOMES, P. A.; ALMEIDA, M. R. Caracterização e otimização do processo de fabricação de carvão vegetal em fornos de alvenaria. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Carvão vegetal: destilação, carvoejamento, propriedades, controle de qualidade**. Belo Horizonte, 1982. p. 62-102.

OLIVEIRA, J. T. da S.; SOUZA, L. C.; DELLA LÚCIA, R. M. Influência dos extrativos na resistência ao apodrecimento de seis espécies de madeira. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 5, p. 819-826, set./out. 2005.

PÁDUA, F. A. de. **Amostragem para avaliação da densidade básica da madeira de um híbrido de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake**. 2009. 87 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

PIMENTA, A. S.; BARCELLOS, D. C. **Curso de atualização em carvão vegetal**. Viçosa, MG: UFV, 2000. 76 p.

PINHEIRO, P. C. da C.; FIGUEIREDO, F. J. Desenvolvimento de uma macrotermobalança para estudos da carbonização da biomassa. In: INTERNATIONAL CONGRESS N BIOMASS FOR METAL PRODUCTION AND ELECTRICITY GENERATION, 1., 2001, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: UFMG, 2001. 1 CD-ROM.

PINHEIRO, P. C. da C.; FIGUEIREDO, F. J.; SEYE, O. Influência da temperatura e da taxa de aquecimento da carbonização nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Biomassa & Energia**, Botucatu, v. 2, n. 2, p. 159-168, jul./dez. 2005.

PINHEIRO, P. C. da C.; VIANA, E.; REZENDE, M. E. A. de; SAMPAIO, R. S. **A produção de carvão vegetal**. 2. ed. rev. e atual. Belo Horizonte: [s.n.], 2008. 103 p.

RIBEIRO, A. S.; MACHADO, A. de A. Carbonização de resíduos do processamento mecânico da madeira de eucalipto. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 1, p. 1-7, jan./fev. 2005.

SILVA, J. de C.; OLIVEIRA, T. da S.; TOMAZELLO FILHO, M.; KEINERT JÚNIOR, S.; MATOS, J. L. M. de. Influência da idade e da posição radial na massa específica da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. maiden. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 34, n. 1, p. 13-22, jan./abr. 2004.

SILVA, M. L. da; SOARES, N. S.; REZENDE, A. M.; MOURA, A. D. de. **Setor florestal brasileiro em busca de medidas para contornar a crise financeira**. Disponível em: <<http://www.ciflorestas.com.br/>>. Acesso em: 3 jul. 2009.

TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica em estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus globulus*, *E. pellita*, *E. acmenoides*. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Piracicaba, n. 36, p. 35-42, ago. 1987.

TOMAZELLO FILHO, M.; BRAZOLIN, S.; CHAGAS, M. P.; OLIVEIRA, J. T. S.; BALLARIM, A. W.; BENJAMIN, C. A. Application of X-ray technique in nondestructive evaluation of *Eucalypt* Wood. **Maderas, Ciência y Tecnología**, Concepción, v. 10, n. 2, p. 139-149, 2008.

TRUGILHO, P. F. **Aplicação de algumas técnicas multivariadas na avaliação da qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus***. 1995. 160 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, J. R. M.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M.; MENDES, L. F. B. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial da amostragem em clones de *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 178-186, jul./dez. 2005.

VITAL, B. R.; ALMEIDA, J. de; VALENTE, O. F.; PIRES, I. E. Características de crescimento das árvores e de qualidade da madeira de *Eucalyptus camaldulensis* para a produção de carvão. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Piracicaba, n. 47, p. 22-28, maio 1994.