

EFEITO DA CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA NA ESTRUTURA ANATÔMICA E DENSIDADE DO CARVÃO VEGETAL DE *Eucalyptus***EFFECT OF WOOD CARBONIZATION IN THE ANATOMICAL STRUCTURE AND DENSITY OF CHARCOAL FROM *Eucalyptus***

Bárbara Luísa Corradi Pereira¹ Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho² Aylson Costa Oliveira³
Larissa Carvalho Santos⁴ Angélica de Cássia Oliveira Carneiro² Mateus Alves de Magalhães⁵

RESUMO

O presente trabalho objetivou avaliar as modificações anatômicas que ocorrem com a carbonização da madeira e determinar as propriedades anatômicas, densidade básica da madeira e densidade aparente do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus*, além de elucidar as possíveis correlações significativas existentes. A microscopia eletrônica de varredura foi efetuada nas seções transversal, longitudinal tangencial e longitudinal radial da madeira e do carvão vegetal. Neste, foi feita a análise morfológica dos poros e densidade aparente. De uma forma geral, as características anatômicas como forma de poros, raios e fibras da madeira apresentaram pouca ou nenhuma modificação devido à carbonização, e a superfície do carvão apresentou estruturas bem definidas. As modificações nos elementos celulares da madeira foram principalmente referentes aos parâmetros quantitativos, como espessura da parede das fibras e diâmetro dos poros. Os clones avaliados apresentaram densidade básica da madeira satisfatória para a produção de carvão vegetal. Os parâmetros anatômicos correlacionaram-se significativamente com a densidade básica da madeira e densidade aparente do carvão vegetal, destacando-se, neste estudo, a fração parede das fibras.

Palavras-chave: microscopia eletrônica de varredura; anatomia da madeira; carbonização; alterações microscópicas.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the anatomical changes that occur with charred wood and determine the anatomical properties, basic wood density and apparent density of charcoal *Eucalyptus* clones, besides elucidating the possible existing significant correlations. The scanning electron microscopy was performed in the transverse, longitudinal and tangential longitudinal and radial wood charcoal sections. In the morphological analysis of the pores and the apparent density was made. In general, the anatomical features such as pore radius and the wood fibers showed little or no change due to carbonization of coal surface and showed well defined structures. The changes in cellular elements of wood were mainly related to the quantitative parameters such as wall thickness and pore diameter fibers. The clones showed satisfactory

1 Engenheira Florestal, MSc., Doutoranda e Professora Assistente da Faculdade de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Mato Grosso, Av. Fernando Fernando Corrêa da Costa, 2367, CEP 78060-900, Cuiabá (MT), Brasil. babicorradi@gmail.com

2 Engenheira Florestal, Dr^a., Professora Adjunta do Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Campus Universitário, s/n, CEP 36570-000, Viçosa (MG), Brasil. ana.marcia@ufv.br/
cassiacarneiro1@gmail.com

3 Engenheiro Florestal, MSc., Doutorando e Professor Assistente da Faculdade de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Mato Grosso, Av. Fernando Fernando Corrêa da Costa, 2367, CEP 78060-900, Cuiabá (MT), Brasil. aylsoncosta@gmail.com

4 Engenheira Florestal, Mestranda em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Campus Universitário, s/n, CEP 36570-000, Viçosa (MG), Brasil. lari.carvalho@ufv.br

5 Engenheiro Florestal, Mestrando em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Campus Universitário, s/n, CEP 36570-000, Viçosa (MG), Brasil. mateusmagalhaes91@gmail.com

basic density of wood for charcoal production. The anatomical parameters were significantly correlated with basic wood density and apparent density of charcoal, especially, in this study, the fraction of the fiber wall.

Keywords: scanning electron microscopy; wood anatomy; carbonization; microscopic changes.

INTRODUÇÃO

Para caracterizar a madeira de espécies de *Eucalyptus* para as diversas finalidades é necessário analisá-la anatomicamente (SHIMOYAMA, 1990), dado que as propriedades físicas e mecânicas da madeira estão intimamente relacionadas à composição do lenho e à estrutura e organização de seus elementos (ESAU, 1974).

Ainda que as madeiras das diversas espécies de *Eucalyptus* apresentem algumas características anatômicas semelhantes, como fibras libriformes, vasos solitários de arranjo diagonal, parênquima paratraqueal vasicêntrico e raios unisseriados homocelulares (EVANGELISTA, 2007; ALVES et al., 2011), é necessário fazer uma avaliação quantitativa de seus constituintes anatômicos - principalmente no que se refere à mensuração das dimensões das fibras e dos vasos, que, na maioria das espécies, compõem a maior porcentagem do lenho - como também é preciso avaliar a relação entre esses parâmetros morfológicos e as possíveis utilizações da madeira.

É importante salientar que a densidade da madeira depende das dimensões das células que a compõem: as fibras, vasos e parênquimas radial e axial, bem como da proporção, distribuição e quantidade destes elementos (PANSHIN; DE ZEEUW, 1980). A densidade da madeira é uma propriedade importante para produção de carvão vegetal, já que, de acordo com Brito (1993), quanto maior a densidade da madeira, maior será a produção em massa em carvão vegetal, para um determinado volume de madeira enfiada. Além disso, maior densidade da madeira resultará em carvão vegetal com maior densidade e maior resistência mecânica, propriedades estas almejadas na maioria dos usos aos quais se presta esse insumo.

São escassos os trabalhos desenvolvidos com a finalidade de relacionar a composição anatômica da madeira das espécies ao seu potencial para produção de carvão vegetal. Tem-se como exemplo o estudo de Paula (2005), que caracterizou a madeira de sete espécies nativas do cerrado com base nas características anatômicas e densidade, visando a sua utilização na produção de carvão

vegetal e lenha. A linha de pesquisa que estuda o efeito da carbonização na estrutura anatômica do lenho também não está bem desenvolvida (KWON; KIM; CHA, 2009).

Diante do exposto, o presente trabalho objetivou determinar as características anatômicas e densidade da madeira e do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus*; determinar as possíveis correlações entre as propriedades anatômicas e densidades da madeira e carvão; e avaliar as modificações anatômicas que ocorrem com a carbonização da madeira.

MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho foram utilizados seis clones de *Eucalyptus*: clone 1 (*Eucalyptus camaldulensis*), clone 2 (híbrido de *Eucalyptus urophylla*), clone 3 (híbrido de *Eucalyptus grandis*), clone 4 (híbrido de *Eucalyptus urophylla*), clone 5 (*Eucalyptus urophylla*) e clone 6 (*Eucalyptus camaldulensis*).

As árvores, provenientes de um teste clonal pertencente a uma empresa florestal localizado no município de Lassance, Minas Gerais, foram cultivadas em espaçamento inicial de 3,8 x 2,4 metros, e abatidas aos 7,5 anos de idade. Foram selecionadas três árvores de diâmetro médio para cada clone, totalizando 18 árvores (amostras). De cada árvore foram retirados seis discos de 10 cm de espessura nas alturas da base, do DAP (diâmetro a altura do peito), a 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial do tronco.

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Do disco retirado à altura do DAP foram confeccionados, partindo da sua face superior, amostras de cerne periférico de 0,5 x 0,5 x 0,5 cm. Essas amostras foram utilizadas para microscopia eletrônica de varredura da madeira e do carvão, nos planos transversal, longitudinal tangencial e longitudinal radial.

As amostras secas foram fixadas em suportes de alumínio (*stubs*) com cola de carbono. Em seguida, foram metalizadas com ouro, durante 2 minutos, em um metalizador *Electron Microscopy*

Sciences Modelo 550X, a vácuo com argônio. Para a visualização, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura, marca LEO *Elektonen Mikroskopie*, modelo 1430 VP, a vácuo com nitrogênio.

Por se tratar de uma avaliação qualitativa e como não há grandes diferenças na estrutura anatômica dos clones estudados, será apresentada a MEV somente do clone 1.

Análise Morfológica de Fibras e Poros

Foram retirados pequenos fragmentos no sentido radial, nas regiões do cerne, do alburno e da região de transição entre cerne e alburno dos discos correspondentes a todas as alturas, formando uma amostra composta por árvore.

Para individualização das fibras, as amostras foram acondicionadas com solução de peróxido de hidrogênio e ácido acético glacial, segundo o método preconizado por Dadswell (1972). Posteriormente, montaram-se lâminas temporárias e mediram-se a largura e o diâmetro de 30 fibras por árvore. Foram utilizados um microscópio ótico com câmera acoplada, sistema de aquisição de imagens e o *software* Axio-Vision. A espessura da parede celular da fibra foi determinada matematicamente pela metade da diferença entre a largura da fibra e o diâmetro do lume. A fração parede (FP) foi estimada conforme Foelkel, Barrichelo e Milanez (1975):

$$\text{Fração parede} = \frac{2 * Ep}{Df} * 100$$

Sendo: Ep = Espessura de parede, em μm ; e Df = Diâmetro de fibra, em μm .

Para medição do diâmetro e da frequência de poros foram utilizadas amostras da região do cerne periférico de cada árvore, provenientes da parte superior do disco relativo ao DAP. Os cortes anatômicos foram feitos com espessura média de 16 μm , utilizando um micrótomo de deslize horizontal. De cada amostra foram realizados cortes nos planos transversal, longitudinal tangencial e longitudinal radial. Os cortes anatômicos foram desidratados em uma série alcoólica e corados com solução de safranina, e as lâminas foram fixadas com Entelan. Foram realizadas as medições do diâmetro de 30 poros para cada árvore e a frequência foi mensurada em 5 micrografias por árvore (IAWA COMMITTEE, 1989).

Densidade Básica da Madeira

A densidade básica da madeira foi determinada pelo método de imersão em água, de acordo com a norma ABNT NBR 11941 (2003), utilizando-se duas cunhas opostas de madeira, passando pela medula.

Os valores médios de densidade básica de cada clone foram calculados pela ponderação das densidades das cunhas retiradas ao longo do tronco, utilizando o volume das toras entre dois discos consecutivos como fator de ponderação, conforme descrito por Vital (1984).

Carbonização da Madeira e Propriedades do Carvão Vegetal

As carbonizações foram realizadas em um forno elétrico tipo mufla. O controle de aquecimento foi feito manualmente, com incrementos de 50°C a cada 30 minutos, o que corresponde a uma taxa de aquecimento média de 1,67°C.min⁻¹. A temperatura inicial foi de 100°C e a temperatura final de 450°C, permanecendo estabilizada nesta última por um período de 60 minutos, sendo, portanto, o tempo de carbonização de 4,5 horas.

Para medição do diâmetro e da frequência de poros no carvão vegetal, foram utilizadas amostras carbonizadas da região de transição entre o cerne e o alburno de cada árvore, provenientes da face superior do torete relativo ao DAP. As amostras foram previamente lixadas, para melhor visualização da estrutura anatômica do carvão vegetal. Com o auxílio de uma lupa acoplada a um sistema de aquisição de imagens, realizou-se a medição dos diâmetros e frequência de poros, utilizando-se o *software* Axio-Vision 4.3.

A densidade relativa aparente do carvão foi determinada pelo método hidrostático, com imersão em mercúrio, conforme descrito por Vital (1984). As amostras de carvão estavam com umidade na base seca 5%, aproximadamente. A densidade aparente média foi obtida pela média aritmética, levando-se em consideração os cinco pontos de amostragem ao longo do tronco para cada árvore.

Análise Estatística

O experimento foi instalado segundo um delineamento inteiramente casualizado, com seis tratamentos (clones) e três repetições (árvores), totalizando 18 unidades amostrais.

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do *software* STATISTICA 8.0 (STATSOFT, 2007). Os dados foram submetidos aos testes de Lilliefors e Cochran. Em seguida, os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), para verificação das diferenças existentes entre os clones avaliados. Quando estabelecidas diferenças significativas entre eles, aplicou-se o teste Tukey. Para determinar as correlações existentes entre as propriedades avaliadas foi empregado o coeficiente de correlação simples de Pearson. Para todas as análises foi adotado o nível 95% de significância.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Microscopia Eletrônica de Varredura

As Figuras 1A e 1B mostram a região

de transição entre cerne e albúrnio na madeira e no carvão vegetal, respectivamente, na seção transversal. Já nas Figuras 1C e 1D são apresentados detalhes das fibras na madeira e carvão vegetal, no mesmo plano de corte.

A Figura 2 apresenta detalhes da seção transversal em zona de albúrnio e cerne da madeira e do carvão vegetal, destacando-se os poros.

A Figura 3 apresenta micrografias da seção longitudinal tangencial da madeira e carvão vegetal de *Eucalyptus*.

A Figura 4 apresenta micrografias da seção longitudinal radial da madeira e carvão vegetal de *Eucalyptus*.

De uma forma geral, as características anatômicas como forma, arranjo e organização de poros, raios e fibras da madeira apresentaram pouca ou nenhuma modificação devido à carbonização, e

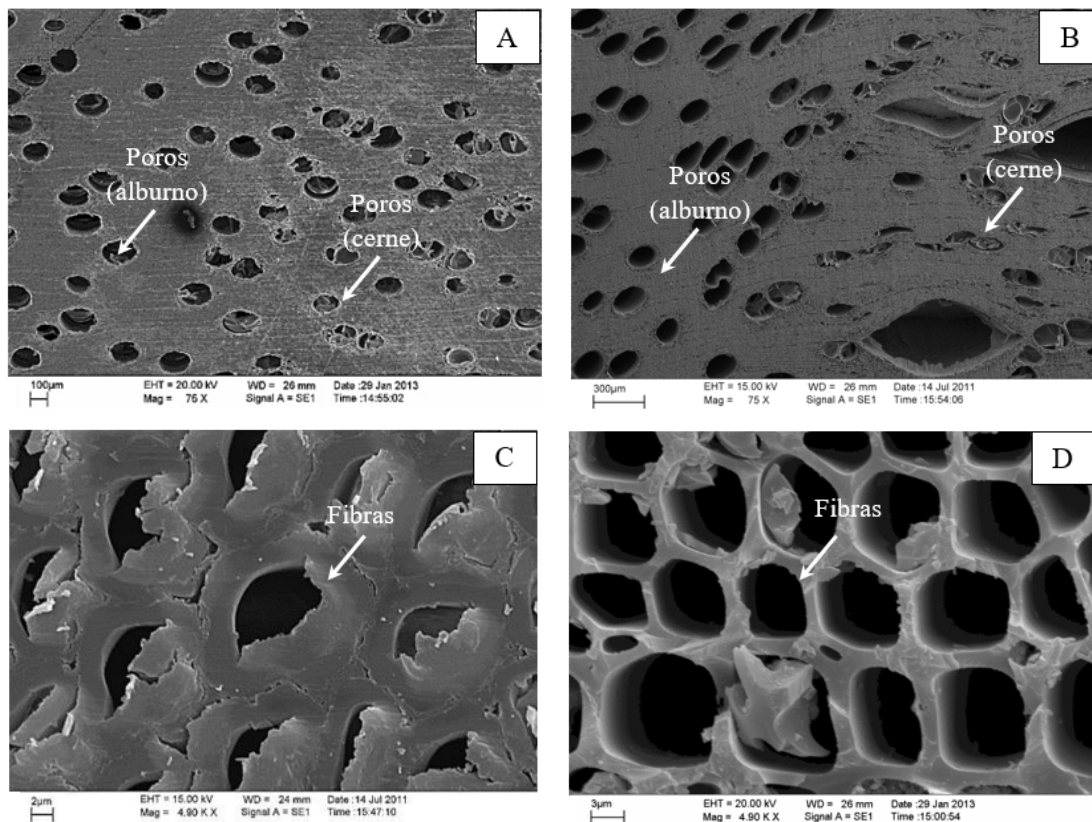


FIGURA 1: Microscopia eletrônica de varredura da seção transversal da madeira e carvão vegetal de *Eucalyptus*: (A) Região de transição do cerne e albúrnio na madeira (aumento de 75 vezes); (B) Região de transição do cerne e albúrnio no carvão (aumento de 75 vezes); (C) Fibras na madeira (aumento de 4.900 vezes); (D) Fibras no carvão (aumento de 4.900 vezes).

FIGURE 1: Scanning electron microscopy of the transversal section of wood and charcoal from *Eucalyptus*: (A) Transition region of wood heartwood and sapwood (increase of 75 times); (B) Transition region of charcoal heartwood and sapwood (increase of 75 times); (C) Fibers in wood (increased 4900 times); (D) Fibers in charcoal (increase of 4900 times).

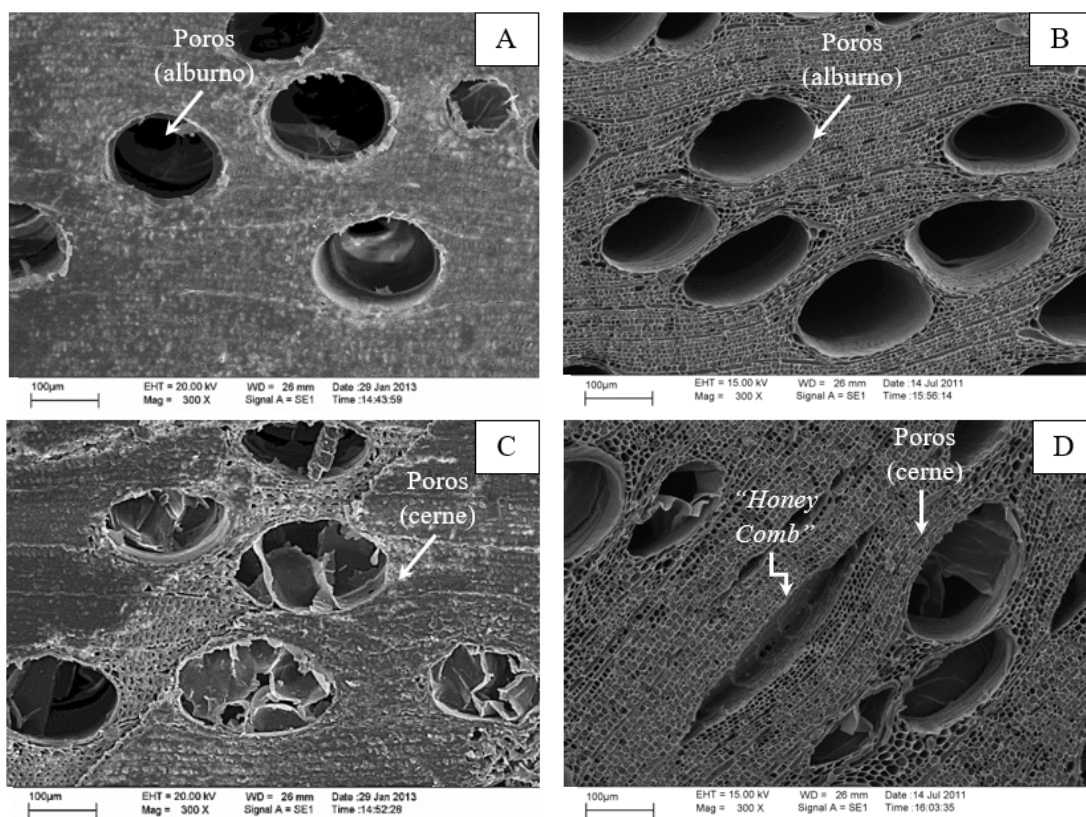


FIGURA 2: Microscopia eletrônica de varredura da seção transversal da madeira e carvão vegetal de *Eucalyptus*: (A) Alburno da madeira (aumento de 300 vezes); (B) Alburno no carvão (aumento de 300 vezes); (C) Cerne da madeira (aumento de 300 vezes); (D) Cerne no carvão (aumento de 300 vezes).

FIGURE 2: Scanning electron microscopy of transversal section of wood and charcoal from *Eucalyptus*: (A) Wood sapwood (increase of 300 times), (B) Charcoal sapwood (increase of 300 times), (C) Wood heartwood (increase of 300 times); (D) Charcoal heartwood (increase of 300 times).

a superfície do carvão apresentou estruturas bem definidas.

Os elementos anatômicos de mais fácil visualização na seção transversal, com aumento de 75 vezes (Figuras 1A e 1B), são os vasos, denominados de poros quando observados nesta seção. Há um alongamento dos poros no sentido radial, quando vistos na seção transversal, principalmente no alburno, passando de circulares na madeira para ovais no carvão. Assim como no presente estudo, alguns autores concluíram que durante a carbonização ocorre uma maior contração no sentido tangencial em relação à contração radial na estrutura do lenho (KIM; HANNA, 2006; KWON; KIM; CHA, 2009; GONÇALVES, 2010). Para Kwon, Kim e Cha (2009), este alongamento dos poros está relacionados com a presença dos raios, que podem atuar limitando a contração no sentido

radial. As paredes celulares dos vasos mantiveram-se intactas e os tilos continuaram evidentes na região do cerne.

As fibras foram as células mais afetadas durante a carbonização, sendo evidente a alteração na parede celular (Figuras 1C e 1D). Pode-se observar uma distinção entre a lamela média e o restante da parede celular na madeira e no carvão, esta distinção não é mais observada, havendo uma homogeneização das camadas da parede celular. A redução da espessura da parede celular das fibras é expressiva após a carbonização da madeira. Além disso, as fibras ficaram com aspecto vítreo e quebradiço após a carbonização (Figuras 3C e 3D).

Ao avaliar as modificações anatômicas na madeira em função da carbonização, percebeu-se que os raios mantiveram relativamente suas características morfológicas, como pode-se

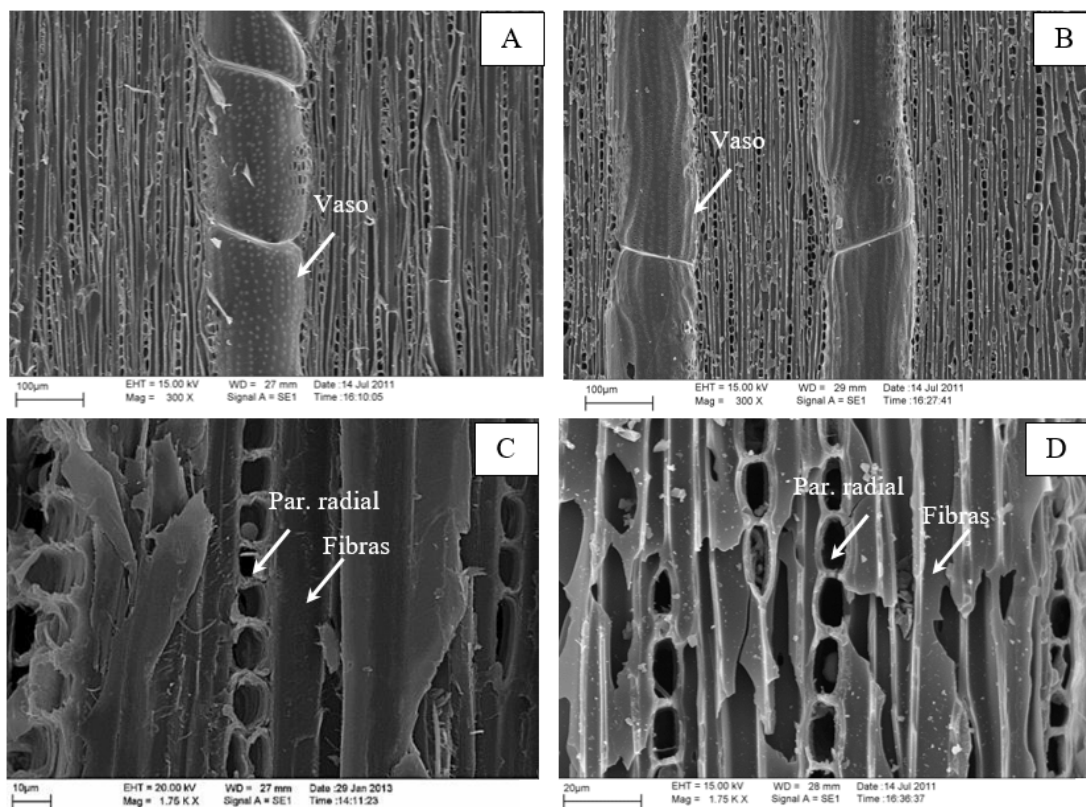


FIGURA 3: Microscopia eletrônica de varredura da seção longitudinal tangencial da madeira e carvão vegetal de *Eucalyptus*: (A) Seção tangencial da madeira (aumento de 300 vezes); (B) Seção tangencial do carvão (aumento de 300 vezes); (C) Detalhes de fibras e parênquima da madeira (aumento de 1.750 vezes); (D) Detalhes de fibras e parênquima radial do carvão (aumento de 1.750 vezes).

FIGURE 3: Scanning electron microscopy of longitudinal tangential section of wood and charcoal from *Eucalyptus*: (A) Wood tangential section (increase of 300 times), (B) Tangential section of charcoal (increase of 300 times), (C) Details of fibers and parenchyma in the wood (increase of 1750 times); (D) Details of fibers and parenchyma in the charcoal (increase of 1750 times).

comparar através das figuras 3^a (madeira) e 3^B (carvão). Grandes cavidades ou fendas foram observadas na seção transversal ao longo dos raios na região correspondente ao cerne do carvão (1B e 2D). Tais rupturas são referidas como *honey comb* (favo de mel) e *disruptions* (rupturas) por Kim e Hanna (2006) ou “fendas de retração” por Théry-Parisot (2001). Esta formação de espaços intercelulares pode ser atribuída ao rompimento de células dos raios que possuem parede celular fina, principalmente durante a fase de secagem da madeira e liberação de gases em virtude da degradação de extrativos, que são dificultadas pelos tilos presentes na madeira do cerne de *Eucalyptus* (Figuras 1A e 2C). Na seção radial do carvão, os raios apresentaram protuberâncias em seu interior (Figura 4D) que, provavelmente, são alterações da

parede celular causadas pela degradação térmica. Comparando-se com o parênquima radial da madeira (Figura 4C), a parede celular apresentou-se lisa.

Análise Morfológica de Poros e Fibras

Na Tabela 1 estão os valores médios dos parâmetros quantitativos anatômicos da madeira dos clones de *Eucalyptus*.

O diâmetro médio tangencial dos poros variou de 120,33 µm, para o clone 4, a 149,50 µm, para o clone 1. De acordo com Evangelista (2007) e Lima et al. (2011), maiores diâmetros tangenciais dos vasos normalmente estão associados a menores frequências, tendência esta observada neste trabalho. A frequência média de poros ficou compreendida

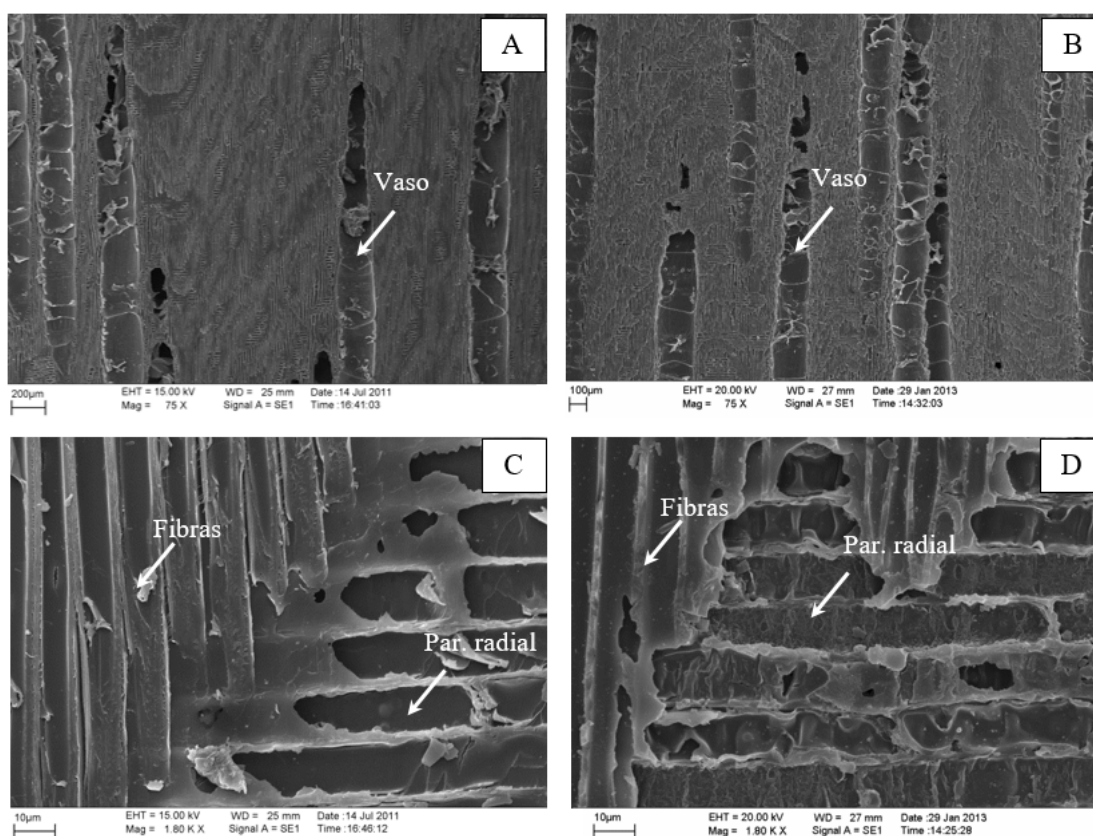


FIGURA 4: Microscopia eletrônica de varredura da seção longitudinal radial da madeira e carvão vegetal de *Eucalyptus*: (A) Seção radial da madeira (aumento de 75 vezes); (B) Seção radial do carvão (aumento de 75 vezes); (C) Detalhes de fibras e parênquima radial da madeira (aumento de 1.800 vezes); (D) Detalhes de fibras e parênquima radial do carvão (aumento de 1.800 vezes).

FIGURE 4: Scanning electron microscopy of radial longitudinal section of wood and charcoal from *Eucalyptus*: (A) Wood radial section (increase of 75 times), (B) Charcoal radial section (increase of 75 times), (C) Details of fibers and parenchyma in wood (increase of 1800 times), (D) Details of fibers and parenchyma in charcoal (increase of 1800 times).

entre 8,16 (clone 1) e 14,14 poros.mm⁻² (clone 4).

Evangelista (2007), ao estudarem dois clones de *Eucalyptus urophylla*, aos 6 e 7 anos e um clone de *Eucalyptus camaldulensis*, aos 8 anos, verificaram diâmetros e frequência de poros semelhantes aos obtidos neste estudo.

Entre os parâmetros anatômicos quantitativos das fibras, apenas a fração parede foi significativa a 95% de significância. Os valores médios de diâmetro das fibras, diâmetro do lume e espessura da parede foram 14,79, 7,30 e 3,75 µm, respectivamente. Evangelista (2007) encontraram valores de diâmetro das fibras entre 19,3 e 21,3 µm, diâmetro do lume medindo de 8,8 a 12,7 µm e espessura da parede das fibras entre 4,3 e 5,3 µm para dois clones de *Eucalyptus urophylla*, um aos 6 e outro aos 8 anos de idade. Santos et al. (2011) verificaram diâmetro

de fibras entre 16,82 e 20,02 µm, diâmetro do lume entre 8,93 e 9,38 µm e espessura da parede entre 3,94 e 5,25 µm para quatro clones de *Eucalyptus* spp., aos 7 anos de idade. As diferenças encontradas entre os trabalhos podem ser atribuídas à variabilidade genética entre clones, além outros fatores.

Observa-se que a fração parede dos clones avaliados neste estudo foi entre 47,0% (clone 1) e 55,6% (clone 6). Esses dois clones diferiram significativamente entre si, a 5% de probabilidade, contudo, ambos não apresentaram diferenças significativas dos demais clones. Madeiras caracterizadas pela presença de fibras com alto valor de fração parede são potenciais para a produção de carvão vegetal (PAULA, 2005), apresentando maior massa para sustentar a decomposição térmica da madeira, favorecendo o rendimento e a qualidade

TABELA 1: Valores médios da análise morfológica de poros e fibras da madeira dos diferentes clones de *Eucalyptus*.TABLE 1: Mean values of wood morphological analysis of pores and fibers from *Eucalyptus* clones.

Clones	Poros		Fibras
	Diâmetro (μm)	Frequência (poros. mm^{-2})	Fração Parede (%)
1 (<i>Eucalyptus camaldulensis</i>)	149,50 a	8,16 d	47,0 b
2 (<i>Eucalyptus urophylla</i>)	136,90 b	11,78 bc	48,1ab
3 (<i>Eucalyptus grandis</i>)	134,23 bc	11,18 bc	49,9 ab
4 (<i>Eucalyptus urophylla</i>)	120,33 c	14,14 a	50,4 ab
5 (<i>Eucalyptus urophylla</i>)	123,36 bc	13,33 ab	54,3 ab
6 (<i>Eucalyptus camaldulensis</i>)	144,81 ab	10,69 c	55,6 a

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

do carvão vegetal.

Densidade Básica da Madeira

Os valores médios de densidade básica da madeira, em g.cm^{-3} , estão apresentados na Figura 5.

A densidade básica da madeira variou de 0,531 a 0,585 g.cm^{-3} entre os clones avaliados. Observa-se na Figura 3, que os clones 3 e 5 apresentaram os maiores valores médios de densidade básica da madeira, 0,577 e 0,585 g.cm^{-3} , respectivamente; porém, não diferiram significativamente do clone 6 (0,563 g.cm^{-3}). Já o clone 1 apresentou a menor densidade básica da madeira, 0,531 g.cm^{-3} , não diferindo significativamente dos clones 2 (0,545 g.cm^{-3}) e 4 (0,548 g.cm^{-3}).

No presente estudo, as maiores densidades

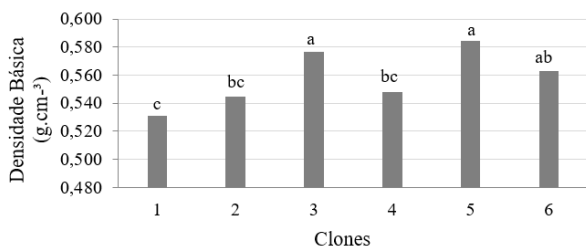


FIGURA 5: Valores médios da densidade básica da madeira dos diferentes clones de *Eucalyptus* spp. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Tukey.

FIGURE 5: Mean values of wood density of *Eucalyptus* spp. clones. Means in the column followed by the same letter do not differ at 5% of probability by the Tukey Test.

básicas estiveram associadas às madeiras dos clones com maiores frações parede das fibras e poros de menores diâmetros e maiores frequências. Para a produção de carvão vegetal é desejável o menor conteúdo de espaços vazios, caracterizados pelos lumes das fibras e vasos, uma vez que estes não contribuem com o rendimento gravimétrico em carvão, além de influenciarem negativamente a qualidade do mesmo. Estas características, possivelmente, contribuíram para o aumento de matéria lenhosa por unidade de volume ou, de forma inversa, a diminuição do volume de espaços vazios existentes na madeira.

Os valores de densidade básica da madeira foram semelhantes aos encontrados na literatura, como, por exemplo, o trabalho desenvolvido por Santos et al. (2011) que, estudando três clones de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* e um clone *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus grandis* aos 7 anos de idade, encontraram valores médios entre 0,500 e 0,550 g.cm^{-3} .

A densidade básica da madeira pode ser considerada um dos principais critérios de seleção de espécies e clones de *Eucalyptus* para produção de carvão vegetal. Devem-se preferir madeiras com maior densidade básica, pois a utilização destas resulta em maior produção de carvão vegetal para um determinado volume de madeira enforada, além de o produto final apresentar melhor qualidade para suas diversas finalidades.

Quando considerada apenas a densidade básica da madeira, os clones em estudo são potenciais para produção de carvão vegetal, pois todos apresentaram valor superior às médias sugeridas por Trugilho et al. (2001) e Santos et al. (2011). De acordo com estes autores, a densidade

básica da madeira para produção de carvão vegetal deve ser superior a $0,500 \text{ g.cm}^{-3}$.

O clone 6 merece destaque, pois, apesar da alta densidade de sua madeira, verificou-se que o diâmetro médio dos poros foi um dos mais elevados, ao contrário dos outros clones estudados; porém, observou-se que a fração parede das fibras foi superior à dos demais, o que provavelmente justifica a sua alta densidade, uma vez que as fibras compõem, em geral, 65% do volume da madeira de *Eucalyptus* (BARRICHELO; BRITO, 1976).

De modo geral, neste estudo a densidade básica da madeira correlacionou-se significativa e negativamente com o diâmetro tangencial dos poros e diâmetro do lume das fibras, com respectivos coeficientes de correlação linear de Pearson (r) iguais a -0,57 e -0,53. Por outro lado, a frequência de poros e a fração parede correlacionaram-se positiva e significativamente com a densidade da madeira, com coeficientes de correlação linear de Pearson (r) iguais a 0,46 e 0,55, respectivamente. Os outros parâmetros anatômicos avaliados não apresentaram correlações significativas.

Em relação ao diâmetro e a frequência de vasos, Ruy (1998) e Lima et al. (2011) verificaram que maiores densidades básicas estão associadas à baixa frequência de poros de maiores diâmetros. Neste trabalho, observou-se uma situação semelhante: constatou-se que os clones que possuíam madeira com alta frequência de poros e menores diâmetros apresentaram maiores densidades, e vice-versa. Como exemplos, tem-se o clone 5 que apresentou alta densidade básica, aliada à presença de poros menores e mais frequentes; e o clone 1, que apresentou baixa densidade básica da madeira, poros maiores e com baixa frequência. Possivelmente a maior área de espaços vazios foi proporcionada por poros grandes e pouco frequentes, contribuindo para que a densidade básica da madeira fosse menor e vice-versa.

Em termos de fibras, este estudo mostrou que a fração parede foi o índice que melhor se correlacionou com a densidade básica. Assim, para este estudo, pode-se dizer que quanto maior a fração parede das fibras, maior a densidade básica da madeira. Quanto maior a fração parede das fibras, menos espaços vazios serão encontrados na madeira, uma vez que esta característica é uma relação entre a espessura da parede e largura da fibra, ou seja, é desejável que as fibras possuam menores diâmetros e paredes espessas, para que a densidade seja a maior possível.

Shimoyama (1990) constatou relação positiva entre densidade básica da madeira com fibras de maiores diâmetros e paredes espessas, mas, por outro lado, verificou relação negativa com as fibras mais largas e de paredes finas, concluindo que a fração parede das fibras influencia significativamente a densidade básica da madeira.

A existência de correlações entre a elevada densidade e as dimensões das fibras com parede celular espessa e lumes reduzidos indica a possibilidade de produção de carvão vegetal mais denso e com menor volume de poros, segundo Oliveira (1988). De acordo com Paula (2005), quanto maior a fração parede, maiores quantidades de celulose, lignina e hemiceluloses as fibras terão e, conseqüentemente, mais componentes geradores de energia.

Propriedades Anatômicas do Carvão Vegetal: Análise Morfológica de Poros

As modificações que ocorrem na estrutura anatômica quando se transforma a madeira em carvão vegetal são principalmente referentes aos parâmetros quantitativos, como espessura das fibras e diâmetro dos poros, sendo a organização celular, geralmente, mantida após a carbonização.

Nas Figuras 6A e 6B estão, respectivamente, o diâmetro médio tangencial e a frequência de poros no carvão vegetal dos diferentes clones de *Eucalyptus* spp.

O diâmetro dos poros no carvão vegetal, comparado aos da madeira que lhe deu origem, contraiu, em média, 18,6%, o que aumentou a frequência dos poros por mm^2 em cerca de duas vezes. Durante a carbonização da madeira, ocorre degradação dos componentes da parede celular e, conseqüentemente, o volume ocupado pelo carvão vegetal em um forno, por exemplo, é expressivamente menor que o volume de madeira enfiada. Tal fato caracteriza a contração do material carbonizado e redução do diâmetro dos poros e, considerando uma mesma área de madeira e carvão vegetal, a frequência de poros no carvão vegetal será superior à da madeira. Ainda que no carvão vegetal os poros apresentem tamanhos menores que na madeira, a alta frequência de poros por mm^2 contribuirá para a alta porosidade do carvão vegetal, em média 75%, de acordo com Oliveira et al. (2010).

O diâmetro e a frequência de poros do carvão vegetal seguiram, de modo geral, a mesma tendência observada na madeira, ou seja, suas

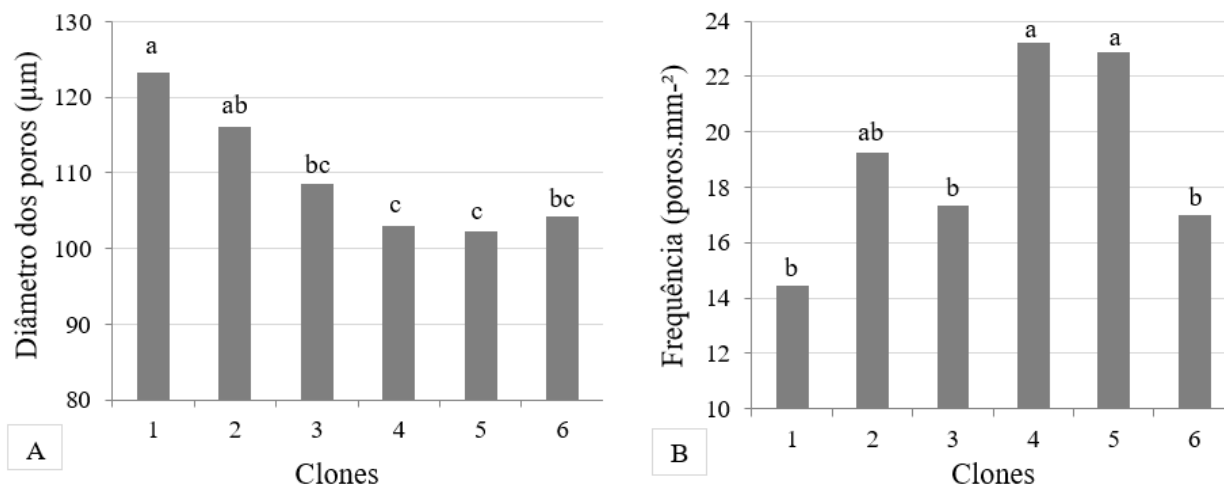


FIGURA 6: Valores médios do diâmetro tangencial dos poros (A) e da frequência de poros (B) do carvão vegetal dos diferentes clones de *Eucalyptus* spp. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Tukey.

FIGURA 6: Mean values of (A) tangential pore diameter and (B) frequency of charcoal pores of *Eucalyptus* spp. Means followed by the same letter do not differ at 5% of probability by the Tukey Test.

dimensões modificaram-se proporcionalmente. O clone 1, por exemplo, apresentou tanto na madeira quanto no carvão vegetal maiores diâmetros e menores frequências de poros; já o clone 5 obteve menores diâmetros e maiores frequências de poros em relação aos demais.

O clone 1 apresentou maior diâmetro médio dos poros do carvão vegetal (123,3 µm) e não diferiu significativamente do clone 2 (116,06 µm). Os clones 3 e 6 apresentaram valores intermediários (108,47 e 104,19 µm, respectivamente), enquanto os menores diâmetros foram verificados para os clones 4 (103,05 µm) e 5 (102,21 µm).

De modo geral, a frequência dos poros foi inversamente proporcional ao diâmetro dos poros. Os clones 4 e 5 obtiveram as maiores frequências (23,2 e 22,9 poros.mm⁻², respectivamente), no entanto, não diferiram do clone 2 (19,3 poros.mm⁻²). Os clones 1, 3 e 6, apresentaram os menores valores médios para frequência (14,4; 17,4; e 17,0 poros.mm⁻², respectivamente).

A avaliação das propriedades anatômicas do carvão vegetal é importante à medida que as dimensões dos poros podem exercer influência na qualidade do carvão vegetal, principalmente em sua densidade, como será discutido posteriormente.

Arantes (2009), ao analisar a anatomia do carvão produzido com madeira de diferentes classes de diâmetro de um clone de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, aos 6 anos de idade, encontrou

diâmetro médio dos poros entre 95,0 e 118,0 µm e sua frequência entre 31 e 41 poros.mm⁻². Os valores encontrados pela autora são condizentes com os obtidos no presente estudo, porém, em termos de frequência de poros, os valores médios encontrados por Arantes (2009) foram superiores.

Densidade Relativa Aparente

A Figura 7 apresenta os valores médios da densidade relativa aparente do carvão dos diferentes clones.

A densidade aparente do carvão vegetal apresentou variação de 0,361 a 0,405 g.cm⁻³. Os clones 5 e 6 apresentaram as maiores densidades do carvão, em média 0,405 g.cm⁻³, seguidos dos clones 2 (0,380 g.cm⁻³) e 3 (0,385g.cm⁻³), e as menores densidades foram verificadas para os clones 1 (0,361 g.cm⁻³) e 4 (0,367 g.cm⁻³). As diferenças encontradas para a densidade aparente dos diferentes clones avaliados podem ser conferidas, principalmente, na densidade básica da madeira (Figura 5). De modo geral, quanto maior a densidade básica da madeira, maior também a densidade aparente do carvão vegetal.

De acordo com Santos (2008), é desejável que a densidade aparente do carvão vegetal não seja inferior a 0,400 g.cm⁻³, para o uso siderúrgico. Logo, o carvão vegetal dos clones 2, 3, 5 e 6 apresentou, estatisticamente, valores médios

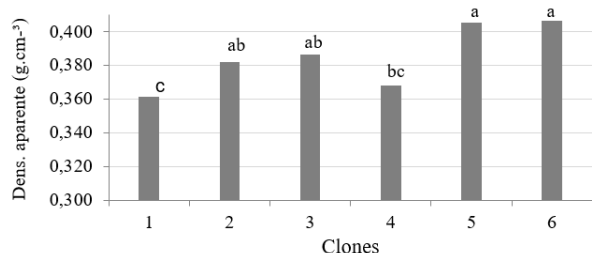


FIGURA 7: Valores médios da densidade relativa aparente do carvão dos diferentes clones de *Eucalyptus* spp. Médias seguidas da mesma letra diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Tukey.

FIGURE 7: Mean values of charcoal bulk density of *Eucalyptus* spp. Means followed by the same letter do not differ at 5% of probability by the Tukey Test.

considerados satisfatórios. Assim, entre os clones avaliados, destaca-se o carvão vegetal do clone 6, que apresentou alta densidade, além de elevados PCS e teor de carbono fixo. Ainda, de acordo com Pimenta e Barcellos (2000), quanto mais elevada a densidade do carvão vegetal, maior será a utilização do volume do alto-forno e maior o tempo de residência da carga metálica no equipamento, além de maior capacidade de carga em termos de carbono por volume.

Resultados semelhantes foram encontrados por Arantes (2009) que verificou valores médios de 0,395 g.cm⁻³, para um clone de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* aos 6 anos de idade e por Trugilho et al. (2001) que, estudando sete clones de *Eucalyptus grandis* e três clones de *Eucalyptus saligna*, ambos aos sete anos de idade, obtiveram um valor médio de 0,45 g.cm⁻³ para densidade aparente.

Observa-se uma correlação significativa positiva entre a densidade básica da madeira e a densidade aparente do carvão vegetal ($r = 0,68$), sendo esta correlação encontrada na maior parte dos trabalhos que relacionam a madeira e a qualidade do carvão vegetal, como Castro (2011) e Santos et al. (2011), que encontraram correlação positiva, a 5% de probabilidade, de 0,63 e 0,54, respectivamente.

Quanto às propriedades anatômicas da madeira, não foram verificadas correlações significativas entre o diâmetro tangencial dos poros e sua frequência com a densidade do carvão. Observa-se que as dimensões das fibras

influenciaram de maneira significativa a densidade do carvão vegetal. O diâmetro das fibras e o diâmetro do lume correlacionaram-se de maneira negativa com a densidade aparente do carvão, com coeficientes de correlação linear equivalentes a -0,47 e 10,61, respectivamente. Já a fração parede das fibras correlacionou-se positivamente ($r = 0,64$).

Em relação às propriedades anatômicas do carvão, não foi observada correlação significativa entre a densidade e a frequência de poros, enquanto maiores diâmetros dos poros estão relacionados com a diminuição da densidade aparente do carvão ($r = -0,46$). É desejável também que a frequência de poros seja a menor possível, a fim de que a maior parte da área seja ocupada por massa e não por espaços vazios, o que contribuiria para uma maior densidade do carvão, todavia, tal relação foi constatada apenas para os clones 3 e 6.

CONCLUSÕES

As características descritivas (estruturas) foram, em sua maioria, mantidas após a carbonização, o que torna a análise da anatomia do carvão vegetal um subsídio para a identificação da madeira que lhe deu origem.

As modificações observadas na madeira foram referentes aos parâmetros quantitativos, como espessura da parede das fibras e diâmetro dos poros.

Os clones avaliados apresentaram densidade básica da madeira satisfatória para a produção de carvão vegetal, destacando-se os clones 3 (híbrido de *Eucalyptus grandis*), 5 (*Eucalyptus urophylla*) e 6 (*Eucalyptus camaldulensis*).

Os parâmetros anatômicos correlacionaram-se significativamente com a densidade básica da madeira e a densidade aparente do carvão vegetal, destacando-se neste estudo, a fração parede das fibras.

Madeiras ricas em fibras de alta fração parede devem ser recomendadas para a geração de energia, seja pela queima direta ou pela produção de carvão vegetal.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (Fapemig), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) ao Grupo Temático de Carvão Vegetal "G6" e ao Núcleo de Microscopia e Microanálise

da Universidade Federal de Viçosa (NMM - UFV).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, I. C. N. et al. Caracterização tecnológica da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de celulose Kraft. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 1, p. 167-174, jan./mar. 2011.
- ARANTES, M. D. C. **Variação nas características da madeira e do carvão de um clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill exMaiden x *Eucalyptusurophylla* S. T. Blake**. 2009. 149 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: Madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.
- BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O. Madeira de *Eucalyptus* como matéria prima para indústria de celulose e papel. **PRODEPEF**, v. 13, p. 145, 1976.
- BRITO, J. O. Reflexões sobre a qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico. **IPEF**, Piracicaba, Circular Técnica, n. 181, 1993.
- CASTRO, A. F. N. M. **Efeito da idade e de materiais genéticos de *Eucalyptus* sp. na madeira e carvão vegetal**. 2011. 97 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.
- DADSWELL, H. E. The anatomy of *Eucalypt* wood. **CSIRO Forest Products Laboratory**, Melbourne, n. 66, p. 1-28, 1972.
- ESAU, K. **Anatomia das plantas com sementes**. São Paulo: Edgard Blucher, 1974. 293 p.
- EVANGELISTA, W. V. **Caracterização da madeira de clones de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. e *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake, oriunda de consórcio agrossilvipastoril**. 2007. 120 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.
- FOELKEL, C. E. B.; BARRICHELO, L. E. G.; MILANEZ, A. F. Estudo comparativo das madeiras de *E. saligna*, *E. paniculata*, *E. citriodora*, *E. maculatae* *E. tereticornis* para produção de celulose sulfato. **IPEF**, Piracicaba, n. 10, p. 17-37, 1975.
- GONÇALVES, T. A. P. **Anatomia do Lenho e do Carvão de Espécies Arbóreas do Cerrado no Estado de São Paulo, Brasil**. 2010. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Botucatu, 2010.
- IAWA COMMITTEE. List of microscopic features for hardwood identification. **IAWA Bulletin**, Leuven, v. 10, n. 2, p. 219-332, 1989.
- KIM, N.; HANNA, B. R. Morphological characteristics of *Quercus variabilis* charcoal prepared at different temperatures. **Wood Science and Technology**, n. 40, p. 392-401, 2006.
- KWON, S.; KIM, N.; CHA, D. An investigation on the transition characteristics of the wood cell walls during carbonization. **Wood Science and Technology**, n. 43, p. 487-498, 2009.
- LIMA, I. L. et al. Dimensões anatômicas da madeira de *Tectona grandis* Linn. em função do espaçamento e da posição radial do tronco. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 89, p. 61-68, mar. 2011.
- OLIVEIRA, A. C. et al. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-439, 2010.
- OLIVEIRA, E. **Correlações entre parâmetros de qualidade da madeira e do carvão de *Eucalyptus grandis* (W. Hill exMaiden)**. 1988. 47 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1988.
- PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 4th ed. New York: Mc-Graw Hill, 1980. 722 p.
- PAULA, J. E. Caracterização anatômica da madeira de espécies nativas do cerrado, visando sua utilização na produção de energia. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 1, p. 90-100, 2005.
- PIMENTA, A. S.; BARCELLOS, D. C. **Curso de atualização e carvão vegetal. Centro de Produções técnicas – CPT**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2000.
- RUY, O. F. **Variação da qualidade da madeira em clones de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake da Ilha de Flores, Indonésia**. Piracicaba, 1998. 69 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.
- SANTOS, M. A. S. Parâmetros de qualidade do carvão vegetal para uso em alto-forno. In: FÓRUM NACIONAL SOBRE CARVÃO VEGETAL, 1., 2008, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: UFMG, 2008.
- SANTOS, R. C. et al. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 221-230, jun. 2011.
- SHIMOYAMA, V. R. **Variações da densidade básica e características anatômicas e químicas da madeira em *Eucalyptus* spp.** 1990. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São

Paulo, Piracicaba, 1990.

STATSOFT. **Statistica data analysis system version 8.0.** Tulsa: Statsoft, 2007.

THÉRY-PARISOT, I. **Économie des combustibles au Paléolithique.** Paris: CNRS, 2001. 195 p.

TRUGILHO, P. F. et al. Avaliação de clones

de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 114-201, jul./dez. 2001.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**, Viçosa: Sociedade de Investigações Florestais, 1984. 21 p.