

Parâmetros de qualidade da madeira e do
carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell.Quality parameters of *Eucalyptus pellita*
F. Muell. Wood and charcoalAylson Costa Oliveira¹, Angélica de Cássia Oliveira Carneiro², Benedito Rocha Vital³,
Wellington Almeida⁴, Bárbara Luísa Corradi Pereira⁵ e Marco Túlio Cardoso⁶

Resumo

O presente estudo teve como objetivo avaliar os parâmetros de qualidade da madeira de clone de *Eucalyptus pellita* aos 5 anos de idade e as propriedades físicas e químicas do carvão vegetal produzido com esta madeira, bem como avaliar a influência do tempo e temperatura finais de carbonização. As árvores foram colhidas em povoamentos com espaçamento de 3,0 x 2,0 m em plantios pertencentes à extinta Companhia Agrícola e Florestal Santa Bárbara (CAF). Foram determinadas a densidade básica, composição química, composição elementar e poder calorífico da madeira. Para o carvão vegetal foi determinado o rendimento gravimétrico através de carbonizações experimentais, composição química imediata e elementar, densidade aparente e poder calorífico. Os resultados demonstraram que a marcha de carbonização com taxa de aquecimento igual a 1,25 °C/min produziu carvões com melhores propriedades em um tempo de carbonização total de 6 horas e temperatura final de 450°C. Conclui-se que a madeira de *Eucalyptus pellita* apresenta características tecnológicas satisfatórias para produção de carvão vegetal. A baixa idade não prejudicou a qualidade da madeira para fins energéticos. No entanto, estudos posteriores devem ser feitos para determinação da influência da diminuição do ciclo de corte no volume e qualidade da madeira.

Palavras-Chave: *Eucalyptus pellita*, carvão vegetal, propriedades físicas e químicas, carbonização.

Abstract

The objective of this study was to evaluate the parameters of a 5 years old *Eucalyptus pellita* clone wood quality as well as its charcoal's physical and chemical properties, and to evaluate the influence of time and final carbonization temperature. Trees were collected in a 3.0 x 2.0 m spacing plantation belonging to the former Companhia Agrícola e Florestal Santa Bárbara (CAF). Wood basic density, chemical and elementary compositions and caloric values were determined. Charcoal gravimetric yield, chemical and elementary compositions, apparent density and calorific values were determined. The results showed that carbonization run at a heating rate of 1.25 °C / min produced charcoal with the best properties. It was conclude that the *Eucalyptus pellita* presents satisfactory properties for charcoal production. The low age didn't impair the quality of wood for energy purposes. However, further studies should be conducted to determine the influence of reduction cutting cycles on volume and wood quality.

Keywords: *Eucalyptus pellita*, charcoal, physical and chemical properties, carbonization.

¹Estudante de Graduação de Engenharia Florestal pela Universidade Federal de Viçosa - Avenida Peter Henry Rolfs, s/n, Campus Universitário - Viçosa, MG - 36570-000 - E-mail: aylsoncosta@gmail.com

²Engenheira Florestal, Professora Doutora do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa - Avenida Peter Henry Rolfs, s/n, Campus Universitário - Viçosa, MG - 36570-000 - E-mail: cassiacarneiro@ufv.br

³Engenheiro Florestal, Professor Doutor do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa - Avenida Peter Henry Rolfs, s/n, Campus Universitário - Viçosa, MG - 36570-000 - E-mail: bvital@ufv.br

⁴Engenheiro Florestal, Plantar Energética Ltda - Montes Claros, MG - 39400-000 - E-mail: wellington.almeida@plantar.com.br

⁵Estudante de Graduação de Engenharia Florestal pela Universidade Federal de Viçosa - Avenida Peter Henry Rolfs, s/n, Campus Universitário - Viçosa, MG - 36570-000 - E-mail: babicorradi@gmail.com

⁶Engenheiro Florestal, Estudante de Pós - Graduação em Ciência Florestal, MS, pela Universidade Federal de Viçosa - Avenida Peter Henry Rolfs, s/n, Campus Universitário - Viçosa, MG - 36570-000 - E-mail: mtulio_cardoso@yahoo.com.br

INTRODUÇÃO

O Brasil destaca-se no setor mundial como maior produtor e consumidor de carvão vegetal sendo o único país no mundo no qual este insumo tem uma aplicação industrial em grande escala, como destino principal, a produção de ferro gusa e aço e ainda ferro ligas e silício metálico (AMS, 2009). Segundo dados da Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas – ABRAF, no ano de 2009 foram consumidos 22 milhões de metros cúbicos de carvão vegetal (mdc), sendo 55% deste proveniente de florestas plantadas (ABRAF, 2010).

O estabelecimento de florestas para a produção de carvão vegetal envolve a seleção de material genético superior e adoção de técnicas silviculturais, aliando a produtividade das florestas à qualidade desejada da madeira para fins energéticos. A espécie analisada no presente estudo é o *Eucalyptus pellita*. A espécie apresenta árvores de tamanho médio de 40 m de altura, com excelente forma do fuste, casca dura e persistente. Desenvolve-se melhor em vales, na parte seca e quente próximo a ribeirões e solos que variam de rasos e arenosos a argilosos e profundos (IPEF, 2010).

O rendimento na produção de carvão é maximizado com o uso de madeira mais densa, de maior poder calorífico e constituição química adequada resultando também em um carvão de melhor qualidade (PALUDZYSYN FILHO, 2008). Uma tendência em plantios para produção de carvão vegetal é a redução do ciclo de corte. O ciclo que era de 7 ou 6 anos, vem sendo diminuído por algumas empresas para 5 anos, e já se fala em 4 e 3,5 anos. Mas é preciso saber quanto se pode reduzir no ciclo sem prejudicar a qualidade da madeira para este fim.

Os diferentes sistemas de carbonização e as características físicas e químicas da madeira utilizada como matéria-prima determinarão o rendimento do processo de transformação da madeira e influenciará as características do carvão vegetal. Segundo Trugilho *et al.* (2001), com a obrigatoriedade da auto-suficiência, as empresas estão dando uma maior importância ao desenvolvimento de novas tecnologias de produção de madeira, avaliação da sua qualidade, bem como da sua transformação em carvão vegetal.

A qualidade da madeira é um fator de extrema importância quando o objetivo é a produção de carvão vegetal com alto rendimento, baixo custo e elevada qualidade. Características como

a densidade básica, poder calorífico, constituição química e umidade estão entre os principais critérios de seleção da madeira para esta atividade.

A madeira, quando submetida à ação do calor, em temperaturas elevadas sofre um processo de transformação, no qual, todos os seus componentes são exaustivamente modificados (GOMES e OLIVEIRA, 1982). Melhores propriedades químicas do carvão, maiores teores de carbono fixo, e menores teores em substâncias voláteis e cinzas estão associadas à madeira com altos teores de lignina, para determinadas condições de carbonização. Cada faixa de temperatura gera um produto diferente, sendo que a temperatura final tem grande influência na qualidade do carvão vegetal.

A qualidade do carvão vegetal é determinada por suas propriedades físicas e químicas: densidade, poder calorífico superior, resistência mecânica ou friabilidade, umidade e composição química (carbono fixo, cinzas e materiais voláteis).

O rendimento em carbono fixo apresenta uma relação diretamente proporcional aos teores de lignina, extrativos e densidade da madeira e inversamente proporcional ao teor de holoceleulose. O teor de materiais voláteis é influenciado pela temperatura de carbonização, taxa de aquecimento e composição química da madeira (CARMO, 1988), sendo a temperatura o principal parâmetro que regula os teores de materiais voláteis e carbono fixo do carvão.

A análise de diferentes marchas de carbonização visa demonstrar o comportamento da madeira frente à velocidade e temperatura de carbonização e como estas podem afetar o rendimento gravimétrico e as propriedades do carvão vegetal. Dependendo das características da madeira, o processo de carbonização pode ser acelerado, promovendo maior produtividade dos fornos em função da redução do tempo total de carbonização. Vale ressaltar que este estudo vem de encontro a uma demanda do setor siderúrgico por espécies alternativas às tradicionais utilizadas para a produção de carvão vegetal.

A taxa de aquecimento ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$), que é o quanto se aumenta a temperatura em um intervalo de tempo, expressa este binômio tempo-temperatura. Maiores taxas de aquecimento acarretam em diminuição no rendimento em carvão, nos teores de materiais voláteis e nos valores de densidade aparente. Enquanto que para teores de carbono fixo e cinzas, maiores taxas de aquecimento, impli-

cam em aumento desses valores. A razão de tal comportamento parece estar relacionada com a eliminação rápida dos gases formados no leito de carbonização quando a velocidade é maior (VELLA *et al.*, 1989).

Reconhecendo a importância e potencialidade do carvão vegetal, este estudo teve como objetivos analisar os parâmetros de qualidade da madeira de clone de *Eucalyptus pellita* F. Muell aos 5 anos de idade e as propriedades físicas e químicas do carvão vegetal produzido a partir desta, bem como avaliar a influência do tempo e temperatura finais de carbonização.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste estudo, foram utilizadas madeiras de clone de *Eucalyptus pellita* F. Muell com idade de 5 anos provenientes de espaçamento 3,0 x 2,0 m, de plantios pertencentes à antiga Companhia Agrícola e Florestal Santa Bárbara (CAF), localizados no município de Martinho Campo, MG, cuja latitude é de 19° 34' 20''S, longitude de 45° 20' 30''W, e altitude de 745 m.

As árvores foram seccionadas em toretes de aproximadamente 70 cm de comprimento. Do centro dos toretes foram retirados discos de 2,5 cm de espessura, e em seguida subdivididos em quatro partes, em forma de cunha, passando pela medula. Foram selecionadas aleatoriamente duas partes de cada disco e destinados à determinação da densidade básica.

O restante, dos toretes, foi transformado em cavacos e homogeneizado para a realização das análises físicas e químicas da madeira, bem como para a produção de carvão vegetal.

Análises físico-químicas da madeira

A densidade básica foi determinada de acordo com o método de imersão em água, conforme descrito por Vital (1984).

Para a análise da composição química da madeira as amostras foram primeiramente

transformadas em serragem em moinho tipo Wiley, conforme a norma TAPPI T257 om-92 (1996). As análises foram efetuadas na fração de serragem, classificadas em peneiras de 40/60 mesh (ASTM, 1977) e condicionadas a uma umidade relativa de 50 ± 2% e temperatura de 23 ± 1 °C.

Para determinar o teor de extrativos da madeira de *E. pellita* utilizou-se a norma TAPPI T204 om-88 (1996), com substituição do benzeno por tolueno.

A composição química da madeira foi determinada em amostras livres de extrativos, após a extração em etanol/tolueno, etanol e água quente, de acordo com a Norma TAPPI T264 om-88 (1996).

O teor de lignina foi determinado pelo método Klason, modificado de acordo com o procedimento proposto por Gomide e Demuner (1986). A lignina solúvel em ácido foi determinada a partir do filtrado resultante da análise da lignina Klason através de leitura em espectrofotômetro de acordo com Goldschmid (1971). O teor de lignina total foi obtido pela soma lignina residual mais a lignina solúvel em ácido. O percentual de holocelulose foi obtido por diferença.

O poder calorífico superior foi determinado por meio de uma bomba calorimétrica adiabática, conforme a Norma ABNT NBR 8633 (1983).

Carbonização da madeira em forno mufla

Após as amostras serem transformadas em cavacos em picador industrial, homogeneizadas e secas ao ar livre determinou-se o teor de umidade em equilíbrio.

Para a carbonização os cavacos foram colocados em cadinho metálico com capacidade de aproximadamente 220g, aquecido em forno elétrico (mufla), com controle de temperatura. O controle de aquecimento foi feito em seis diferentes marchas de carbonização (tratamentos) conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Temperatura e tempo de carbonização em função da marcha de carbonização.

Table 1. Temperature and carbonization time as a function of carbonization run.

Marcha	Temperatura (°C)							Taxa de aquecimento (°C/min)	Tempo total
	150	200	250	350	450	500	550		
1	1 hora	1 hora	1h30	1h30	30 min	-	-	1,36	5h30min
2	1 hora	1 hora	1h30	1h30	1 hora	-	-	1,25	6 horas
3	1 hora	1 hora	1h30	1h30	30 min	30 min	-	1,38	6 horas
4	1 hora	1 hora	1h30	1h30	1 hora	1 hora	-	1,19	7 horas
5	1 hora	1 hora	1h30	1h30	30 min	30 min	30 min	1,41	6h30min
6	1 hora	1 hora	1h30	1h30	1 hora	1 hora	1 hora	1,14	8 horas

Propriedades do carvão vegetal

Foram determinados os rendimentos em carvão, em gases não condensáveis e líquido pirolenhoso, em relação à madeira seca, pelas fórmulas:

$$Rc = (Pc / Pm) * 100$$

$$Rl = (Pl / Pm) * 100$$

$$Rg = 100 - (Rc + Rl)$$

Onde:

Rc = rendimento em carvão (%)

Rl = rendimento em líquido pirolenhoso(%)

Rg = rendimento em gases não-condensáveis(%)

Pc = peso do carvão

Pm = peso seco dos cavacos de madeira

Pl = peso do líquido pirolenhoso

A composição química imediata foi determinada de acordo com a Norma ABNT NBR 8112 (ABNT, 1983), com determinação de materiais voláteis, teor de cinzas e teor de carbono fixo, em base seca.

A densidade aparente do carvão foi determinada de acordo com Vital (1984) com substituição da água por mercúrio. A densidade verdadeira foi determinada de acordo com a Norma ABNT NBR 9165 (1985). A porosidade do carvão é obtida a partir dos dados das densidades aparente e verdadeira, através da fórmula:

$$P(\%) = 100 - (DA * 100) / 100$$

Onde:

P(%) = Porosidade em %

DA = Densidade Relativa Aparente

DV = Densidade Relativa Verdadeira

O poder calorífico superior foi determinado por meio de um calorímetro adiabático, de acordo com a Norma ABNT NBR 8633 (1983).

A madeira e o carvão vegetal foram moídos em moinho tipo Wiley e em seguida em um pulverizador para obter amostras classificadas em peneiras de 200/270 mesh. As amostras foram secas em estufa a 103 ± 2 °C por 24 horas. Em seguida foram pesadas entorno de 1 mg das amostras e levadas a um analisador elementar CHN Perkin Elmer II 2400 série CHNS/O, onde foram determinados valores para C, N, H e por diferença o valor de O.

Análise estatística dos dados

Utilizou-se o Delineamento Inteiramente Casualizado, com cinco repetições por tratamento (marcha de carbonização). Para verificar o efeito do tempo e da temperatura final de carboniza-

ção nas propriedades e rendimento do carvão vegetal, os resultados foram submetidos à análise variância e quando verificada diferenças significativas, aplicou-se o teste Tukey, ao nível de 95% de probabilidade.

Para as análises da madeira, aplicou-se a estatística descritiva para obter o desvio padrão e média geral dos dados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os valores de densidade básica, teores de lignina, extrativos (solúveis em álcool/tolueno), holocelulose e poder calorífico superior da madeira.

Tabela 2. Valores médios de densidade básica, composição química e poder calorífico superior da madeira de *Eucalyptus pellita*.

Table 2. Average values of basic density, chemical composition and superior caloric power from *Eucalyptus pellita* wood.

Densidade básica	0,558 g/cm ³
Teor de lignina total*	29,50%
Teor de extrativos totais	4,53%
Teor de holocelulose*	65,97%
Poder calorífico superior	4630 kcal/kg

*Valores obtidos base madeira com extrativos

A densidade básica média da madeira foi igual a 0,558 g/cm³, próxima de valores encontrados para outras espécies de eucalipto, tradicionalmente plantadas para produção de carvão vegetal. O alto teor de lignina total encontrado (29,50 %) pode ser explicado por se tratar de madeira na fase juvenil.

A densidade da madeira é de grande importância na produção de carvão vegetal, uma vez que para um mesmo volume de madeira pode-se obter maior rendimento gravimétrico em carvão vegetal se a densidade da madeira utilizada for mais alta. (CARVÃO VEGETAL, 2003).

Segundo Vital (1984) a tendência da densidade básica é aumentar com a maturidade da árvore como consequência do aumento da espessura da parede celular e diminuição da largura das células. O teor de lignina tende a diminuir, pois as espécies mais jovens tendem a possuir uma maior proporção de madeira juvenil que é mais rica em lignina do que a madeira madura.

Os valores encontrados neste estudo estão próximos aos encontrados em outros trabalhos, a exemplo do estudo feito por Pereira *et al.* (2000), para a espécie de *E. pellita* com idade de 6 anos, no qual observou valores de densidade básica igual a 0,587 g/cm³ e de teor de lignina igual a 31,9%.

Oliveira (1988) relata que o aumento da densidade básica associado ao aumento do teor de lignina implica em maior rendimento em carvão. Isso porque segundo Petroff e Doat (1978), os extrativos e a lignina são ricos em carbono.

Na Tabela 3 são apresentados os valores médios do rendimento gravimétrico em carvão (RGC), em líquido pirolenhoso (RGL) e em gases-não condensáveis (RGNC) em função das marchas de carbonização. Como pode ser observado na Tabela 3 apenas os rendimentos gravimétricos em carvão e em gases não-condensáveis foram significativamente afetados pela marcha de carbonização, ocorrendo um decréscimo no rendimento em carvão na medida em que se aumentou o tempo e a temperatura final de carbonização. Os valores dos rendimentos gravimétricos em líquido pirolenhoso não foram afetados significativamente pela marcha de carbonização.

Tabela 3. Valores médios dos rendimentos gravimétricos do carvão vegetal em função da marcha de carbonização.

Table 3. Average values of gravimetric yield in charcoal as a function of carbonization run.

Marcha	RGC (%)	RGL (%)	RGNC (%)
1	32,04 A	56,42	11,53 AB
2	32,11 A	58,95	8,93 B
3	31,17 B	57,54	11,28 AB
4	31,09 B	58,98	9,93 AB
5	30,13 C	58,01	11,86 A
6	30,88 B	58,09	11,03 AB

RGC = rendimento gravimétrico em carvão, RGL = rendimento gravimétrico em líquido pirolenhoso, RGNC = rendimento gravimétrico em gases não-condensáveis. Valores seguidos de mesma letra na vertical não diferem entre si significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A influência da temperatura final de carbonização foi maior que a do tempo final, uma vez que as marchas de carbonização com temperaturas finais iguais: marchas 1 e 2; marchas 3 e 4 e marchas 5 e 6, apresentaram menor variação no RGC entre si. No entanto nota-se que a diferença entre as marchas 5 e 6 foi significativa, tendo a marcha 6, maior rendimento em carvão.

Trugilho e Silva (2001), trabalhando com jatobá e temperaturas finais variando de 300 a

900°C, observaram um decréscimo acentuado no rendimento em carvão com o aumento da temperatura final de carbonização, e uma estabilização dos valores na medida em que as temperaturas finais eram muito elevadas (700, 800 e 900°C). Para temperaturas finais de 300, 400 e 500°C foram encontrados altos valores de rendimento em carvão para o cerne (92,94, 51,85 e 44%, respectivamente). Ainda segundo estes autores, estes valores de rendimentos elevados podem ser explicados pela degradação térmica incompleta do material, sendo esta hipótese reforçada pelos baixos valores de carbono fixo, poder calorífico superior e altos teores de materiais voláteis observados.

Os valores médios dos teores de materiais voláteis, cinzas, carbono fixo e poder calorífico superior estão apresentados na Tabela 4. O teor de cinzas não foi significativamente afetado pela marcha de carbonização. Houve um decréscimo de materiais voláteis e um aumento de carbono fixo da marcha 1 a marcha 6. A marcha 1 apresentou o menor teor de carbono fixo, o que era esperado, uma vez que a mesma apresenta o menor tempo e temperatura final de carbonização. Tendo assim uma menor degradação dos constituintes da madeira fazendo com que o teor de materiais voláteis fosse alto.

Normalmente, o teor de carbono fixo é inversamente proporcional ao teor de materiais voláteis. Para os carvões produzidos com madeira de *E. pellita*, aos 5 anos, os maiores teores de carbono fixo e conseqüentemente os menores teores de materiais voláteis foram obtidos para as marchas de carbonização que apresentaram menor rendimento em carvão vegetal, marchas 5 e 6. Enquanto que Vale *et al.* (2001) observou um aumento no teor de carbono fixo e materiais voláteis com o aumento em rendimento do carvão.

Foi observado para materiais voláteis que, a exceção das marchas 1 e 2, houve maior influência da temperatura que do tempo de carbonização, dado que não houve diferenças significati-

Tabela 4. Valores médios de materiais voláteis, cinzas, carbono fixo e poder calorífico superior em função da marcha de carbonização.

Table 4. Average values of volatile matter, ashes, fixed carbon and caloric power as a function of carbonization run.

Marcha	Materiais Voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono Fixo (%)	Poder Calorífico Superior (kcal/kg)
1	14,65 A	2,19	83,17 C	8258 AB
2	12,04 B	1,86	86,10 B	8309 A
3	11,02 C	2,14	86,84 AB	8339 A
4	11,15 C	2,19	86,66 B	8237 AB
5	9,99 D	2,6	87,41 AB	8172 B
6	9,71 D	2,12	88,17 A	8023 C

Valores seguidos de mesma letra na vertical não diferem entre si significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

vas entre marchas de temperatura final igual (3 e 4; 5 e 6). O mesmo não ocorreu com o carbono fixo que aumentou da marcha 1 para 2 substancialmente e depois aumentou significativamente na marcha 6 a qual apresenta o maior tempo de carbonização (8 horas).

Pereira *et al.* (2000) apresentou um banco de dados com algumas características de diversas espécies de *Eucalyptus* plantadas em diversos locais do país, na forma de bancos de conservação, testes de progênie e procedência e áreas de produção de sementes, onde são apresentados também algumas características tecnológicas da madeira. Para a espécie *E. pellita*, as idades estudadas foram 6, 6,5 e 10,5 anos, as quais apresentaram teores de lignina, rendimento em carvão e teores de carbono fixo muito próximos dos encontrados no presente trabalho. No entanto, não foi descrito em que condições de tempo e temperatura foram conduzidas as carbonizações.

Sturion *et al.* (1988) trabalhando com *E. vimilalis* avaliou a influencia da idade de corte em alguns parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal. As idades estudadas foram de 4 e 7 anos, observando valores de densidade básica da madeira de 0,489 e 0,529 g/cm³, teores de lignina iguais a 26,2 e 25,4%, rendimentos em carvão de 33,0 e 33,2% e teores de carbono fixo de 78,8 e 78,7%, respectivamente.

O poder calorífico superior (PCS) dos carvões de *E. pellita* foi pouco influenciado pelas marchas de carbonização. Observou-se um aumento do PCS da marcha 1 à marcha 3, seguida de um decréscimo até a marcha 6. Este comportamento se deve ao aumento do tempo e temperatura finais de carbonização.

Observa-se que a influência do tempo foi maior quando a temperatura final, também, foi maior. A diminuição do poder calorífico do carvão produzido através da marcha 3 à marcha 6 ocorreu porque, apesar de apresentarem maio-

res teores de carbono fixo, estes apresentaram menores teores de materiais voláteis, provavelmente devido às temperaturas finais de carbonização serem superiores a 450°C. Syred *et al.* (2006), concluíram que o aumento da temperatura de carbonização causa diminuição do rendimento gravimétrico em carvão, aumento da produção de produtos gasosos e aumento da concentração do carbono fixo na fração sólida, confirmando os resultados encontrados no presente estudo (Tabelas 3 e 4).

Nota-se que a marcha 6 apresentou o menor PCS, sendo este estatisticamente diferente dos demais. Não houve diferenças significativas entre as marchas de carbonização 1, 2, 3 e 4.

Barcellos (2007) encontrou valores de 6.963, 7.462 e 7.830 kcal/kg para clones de *Eucalyptus grandis* trabalhando com temperaturas finais de 350°C, 450°C e 550°C, respectivamente e tempo de exposição a cada temperatura igual para todas as marchas de carbonização, observando um aumento do PCS. Oliveira *et al.* (1982) citado por Barcellos (2007) trabalhando com temperaturas finais de 300°C, 500°C e 700°C obteve valores iguais a 7.070, 8.147 e 7.659 kcal/kg, respectivamente para *E. grandis*.

Os valores médios da densidade relativa aparente, verdadeira e porosidade do carvão em função da marcha de carbonização podem ser observados na Tabela 5.

Existe uma carência de bibliografia para esta espécie, como produtora de carvão vegetal para efeito de comparação. No entanto os valores encontrados são comparáveis a algumas outras espécies tradicionalmente plantadas para esta finalidade. TRUGILHO *et al.* (2001) observaram valores para densidade aparente em clones de *Eucalyptus grandis* variando entre 0,399 e 0,486g/cm³. FREDERICO (2009) trabalhando com *Eucalyptus grandis* e híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* encontrou valores de densidade aparente de carvão vegetal entre 0,285 e 0,323g/cm³.

Tabela 5. Valores médios de densidade verdadeira, densidade aparente e porosidade do carvão vegetal em função da marcha de carbonização.

Table 5. Average values of true density, relative apparent density and porosity from the charcoal as a function of carbonization run.

Marcha	Densidade Verdadeira (g/cm ³)	Densidade Aparente (g/cm ³)	Porosidade (%)
1	1,459 A	0,353	75,82
2	1,461 A	0,358	75,50
3	1,471 A	0,382	74,04
4	1,516 B	0,355	76,61
5	1,633 C	0,385	76,43
6	1,667 C	0,368	77,91

Valores seguidos de mesma letra na vertical não diferem entre si significativamente pelo teste de Tukey (p < 0,05).

Os resultados de densidade aparente do carvão vegetal do presente estudo variaram de 0,353 a 0,385 g/cm³, não havendo influência significativa da marcha de carbonização na densidade relativa aparente do carvão. Uma explicação para isso poderia ser o fato das marchas de carbonização apresentarem taxas de aquecimento muito próximas. Vella *et al.* (1989), observaram uma diminuição no valor de densidade aparente com o aumento da taxa de aquecimento. Apesar do aumento da temperatura as taxas de aquecimento das seis marchas foram muito próximas, não afetando de maneira significativa os valores de densidade aparente.

A densidade verdadeira do carvão aumentou com o aumento da temperatura. Isso se deve provavelmente à queda no teor de voláteis e aumento no teor de carbono. Relacionando a densidade verdadeira com a aparente, tem-se a medida da porosidade do carvão, sendo que esta não variou significativamente com as diferentes marchas de carbonização analisadas.

A Tabela 6 traz o resultado da análise da composição elementar da madeira e dos carvões com valores para carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio.

Tabela 6. Valores médios da composição elementar da madeira *E. pellita* e dos carvões em função das marchas de carbonização.

Table 6. Average values of elementary composition from *E. pellita* wood and charcoal as a function of carbonization runs.

Marcha	Composição Elementar (%)			
	C	H	N	O
1	76,92	2,63	0,41	20,04
2	90,22	2,64	0,45	6,69
3	77,25	2,05	0,47	20,23
4	86,25	2,29	0,65	10,81
5	72,66	1,48	0,36	25,5
6	67,78	1,32	0,31	30,59
Madeira <i>E. pellita</i>	48,53	6,43	0,17	44,87

A madeira de *E. pellita* apresentou valores de composição elementar dentro do esperado para a espécie. Arantes (2009) ao determinar a variabilidade existente nas características da madeira um híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* aos seis anos de idade encontrou valores para teores de C (carbono) variando entre 49,51 e 49,84%; N (nitrogênio) entre 0,13 e 0,23%; O (oxigênio) entre 43,65 e 43,89% e H (hidrogênio) entre 6,32 e 6,37%. Ao comparar os valores observados pela autora com os encontrados no presente trabalho para madeira, observa-se que os resultados são semelhantes. De modo geral,

observa-se em diferentes trabalhos de composição elementar que a mesma não tem muita variabilidade entre espécies e também entre gêneros.

Esperava-se um aumento do teor de carbono elementar com o aumento do tempo e temperatura final de carbonização, de forma a acompanhar os valores obtidos na análise química imediata, porém apenas as marchas 2 e 4 apresentaram este comportamento.

CONCLUSÃO

A madeira de *Eucalyptus pellita*, procedente de árvore com 5 anos de idade, apresentou características tecnológicas satisfatórias para produção de carvão vegetal.

A marcha de carbonização 2, com taxa de aquecimento de 1,25° C/min, tempo de carbonização total de 6 horas e temperatura final de 450° C apresentou maior rendimento gravimétrico em carvão vegetal e porcentagem de carbono na constituição do carvão, além de elevado poder calorífico superior e teor de carbono fixo. Portanto foi considerada a melhor marcha de carbonização para a produção de carvão vegetal a partir da madeira de *Eucalyptus pellita* com 5 anos de idade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à antiga Companhia Agrícola e Florestal Santa Bárbara (CAF), à Universidade Federal de Viçosa, ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira – LAPEM/UFV.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. Standard method for chemical analyses of wood charcoal. Philadelphia: 1977. 1042p.
- ARANTES, M.D.C. *Variação nas características da madeira e do carvão vegetal de um clone de Eucalyptus grandis W. Hill ex Maiden X Eucalyptus urophylla S.T. Blake.* 2009. 149p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8112 Carvão vegetal - Análise imediata. Rio de Janeiro: ABNT, 1983. 5p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8633 Carvão vegetal - Determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 13p.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9165 Carvão vegetal - Determinação da densidade relativa aparente, relativa verdadeira e porosidade.** Rio de Janeiro: ABNT, 1985. 8p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF. **Anuário estatístico da ABRAF 2010: ano base 2009.** Brasília: ABRAF, 2010. 140p.
- ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA - AMS. **Números do setor.** Belo Horizonte: AMS, 2009. Disponível em: <<http://www.silviminas.com.br>>. Acesso em: 15 ago. 2009.
- BARCELLOS, D.C. **Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo.** 2007. 139p.. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.
- CARMO, J.S. **Propriedades físicas e químicas do carvão vegetal destinado à siderurgia e metalurgia.** 1988. 36p. Monografia (Graduação em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1988.
- CARVÃO VEGETAL: o eucalipto na indústria de carvão vegetal. **Revista da Madeira**, v.13, n.75, 2003. Disponível em: <<http://www.remad.com.br>>. Acesso em: 28 mar. 2009.
- FREDERICO, P.G.U. **Influência da densidade e composição química da madeira sobre a qualidade do carvão de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake.** 2009. 75p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.
- GOLDSCHIMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K.V.; LUDWING, C.H. (Eds) **Lignins.** New York: Wiley Interscience, 1971. p.241-266.
- GOMES, P.A.; OLIVEIRA, J.B. Teoria da Carbonização da Madeira. In: _____. **Uso da Madeira para Fins Energéticos.** Belo Horizonte: Fundo Centro Tecnológico de Minas Gerais/CETEC, 1982. p.27-42. (Série publicações técnicas, 1.)
- GOMIDE, J.L.; DEMUNER, B.J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. **O Papel**, São Paulo, v.47, n.8, p.36-38, 1986.
- INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS - IPEF. **Chave de Identificação de Espécies Florestais (CIEF).** Piracicaba: IPEF, 2010. Disponível em: <<http://www.ipef.br/identificacao/cief/especies/pellita.asp>> Acesso em: 27 maio 2010.
- OLIVEIRA, J.B.; *et al.* Estudos preliminares de normatização de testes de controle de qualidade do carvão vegetal. In: Penedo, W.R. **Carvão Vegetal.** Belo Horizonte: CETEC, 1982. p.7-38. (Série de Publicações Técnica, 006).
- OLIVEIRA, E. **Correlação Entre Parâmetros de Qualidade da Madeira e do Carvão de *Eucalyptus grandis* (W. Hill ex-Maiden).** 1988. 47p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1988..
- PALUDZYSYN FILHO, E. Melhoramento do eucalipto para a produção de energia. **Revista Opiniões**, Ribeirão Preto, jun-ago 2008. Disponível em: <http://www.revistaopinioes.com.br/cp/edicao_materias.php?id=15> Acesso em: 31 maio 2009.
- PEREIRA, J.C.D.; *et al.* **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil.** Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 113p. (Embrapa Florestas. Documentos, 38).
- PETROFF, G.; DOAT, J. Pyrolyse des bois tropicaux: influence de la composition chimique des bois sur les produits de distillation. **Revue Bois et Forêt Tropiques**, Montpellier, n.177, p.51-64, 1978.
- STURION, J.A.; *et al.* **Qualidade da madeira de *Eucalyptus viminalis* para fins energéticos em função do espaçamento e idade de corte.** Boletim de Pesquisa Florestal, Colombo, n.6, p.55-59, 1988.
- SYRED, C.; *et. al.* A clean efficient system for producing charcoal, heat and power (CHaP). **Fuel**, Londres, v.85, p.1566-1578, 2006.
- Technical Association of the Pulp and Paper Industry - TAPPI. **TAPPI test methods T 204 om-88: solvent extractives of wood and pulp.** Atlanta: Tappi Technology Park, 1996. v.1.
- TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T 264 om-88: preparation of wood for chemical analysis.** Atlanta: Tappi Technology Park, 1996. v.1.

- Technical Association of the Pulp and Paper Industry - TAPPI -. **TAPPI test methods T 257 cm-85: sampling and preparing wood for analysis**. Atlanta: Tappi Technology Park, 1996. v.1.
- TRUGILHO, *et al.* Avaliação de clones de *Eucalyptus* para produção de carvão vegetal. *Cerne*, Lavras, v.7, n.2, p.104-114, 2001.
- TRUGILHO, P.F; SILVA, D.A. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Himenea courbaril* l.). *Scientia Agrária*, Curitiba, v.2, n.1-2, p.45-53, 2001.
- VALE, A. T.; *et al.* Relação entre a densidade básica da madeira, o rendimento e a qualidade do carvão vegetal de espécies do cerrado. *Revista Árvore*, Viçosa, v.25, n.1, p.89-95, 2001.
- VELLA, M.M.C.F; *et al.* Influência da velocidade de carbonização da madeira nos rendimentos e nas propriedades do carvão produzido. *Revista IPEF*, Piracicaba, n.41/42, p.64-76, 1989
- VITAL, B.R. **Métodos de determinação de densidade da madeira**. Viçosa: SIF, 1984. 21p. (Boletim técnico, 1).

Recebido em 13/11/2009
Aceito para publicação em 28/06/2010

