

EFEITO DA TEMPERATURA FINAL E DA TAXA DE AQUECIMENTO NAS PROPRIEDADES DO CARVÃO DE *Eucalyptus urophylla*

¹Renan Bispo de JESUS, ¹Rayane Ferreira NUNES, ²Márcia Silva de JESUS, ³Thiago Campos MONTEIRO, ³Edy Eime Pereira BARAÚNA, ⁴Alfredo NAPOLI

- 1 - Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Agrárias, Montes Claros, MG, Estudante de graduação em Engenharia Florestal
- 2 - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, Estudante de pós-graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira
- 3 - Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Agrárias, Montes Claros, MG, Professor Adjunto
- 4 - CIRAD – Département “PERSYST” Performance des Systèmes de production et de transformation tropicaux, Montpellier, France, Pesquisador

Resumo: A qualidade do carvão vegetal sofre influência das propriedades da madeira e das variáveis do processo de carbonização. Assim, o objetivo do trabalho foi analisar o efeito da temperatura final e taxa de aquecimento nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla*. As carbonizações foram realizadas em mufla de laboratório nas temperaturas 350°C e 550°C. A rampa de aquecimento foi automática, em duas taxas de aquecimento de 1°C e 5°C por minuto. Foram utilizados corpos de prova 2 x 2 x 2,5 cm (R x T x L), retirados em diferentes posições ao longo da direção medula-casca de cada disco. Os corpos de provas foram carbonizados e determinados com base na massa de madeira seca, os rendimentos gravimétricos em carvão. Houve diferença significativa entre as temperaturas, a temperatura de 550°C apresentou maior teor de carbono fixo (85,18%), devido a maior tempo de exposição da madeira a carbonização e maior eliminação de material volátil que afeta o teor de carbono fixo. Houve diferença significativa entre as taxas de aquecimento, sendo que a de 1°C/min apresentou maior teor de carbono fixo (78,07%) sendo explicado pela exposição da madeira a baixas taxas de aquecimento que aumentam o rendimento do sólido formado da celulose. Desta forma, o teor de carbono fixo e de materiais voláteis são os parâmetros mais sensíveis a variação da temperatura final e da taxa de aquecimento.

Palavras-chave: biomassa; carbonização; pirólise; rendimento; energia.

Abstract: The heterogeneity of eucalyptus wood allows its use as a raw material in many industrial segments, such as charcoal, pulp and paper. The objective will be to analyze the effect of the final temperature and heating rate on the properties of charcoal *Eucalyptus urophylla*. The conduction of the carbonization occurred in laboratory muffle furnace with electric heating at temperatures between 350°C and 550°C. The heating ramp was performed on two heating rate, from 1°C to 5°C per minute. The samples used were at 2 x 2 x 2.5 cm (R x T x L), taken in the pith-bark of each disc. The test samples were charred and determined based on dry wood mass, the gravimetric coal yields. There was significant difference between the temperatures. The temperature of 550 °C showed higher fixed carbon content (85,18%) due to higher wood exposure time carbonization and greater elimination of volatile material which affects fixed carbon content. In addition, there was a significant difference for



the heating rates of 1 °C / min, that showed higher fixed carbon content (78,07%). The explanation for that behavior can be the exposure of the wood at low heating rates, which increased the solid revenue formed from cellulose. Thus, the fixed carbon and volatile material are the parameters most sensitive to variation of the final temperature and heating rate.

Keywords: Biomass; carbonization; pyrolysis; yield; energy.

1. Introdução

A utilização de biomassa florestal para produção do carvão vegetal é importante, devido ser uma alternativa de substituição dos combustíveis fósseis e contribuir para preservação das matas nativas, com a redução das emissões de gases na siderurgia brasileira, diminuindo a porcentagem de gases que causa o efeito estufa com a conversão de CO₂ em biomassa (ASSIS et al., 2012; BRITO, 2007; MOREIRA, 2011).

O gênero *Eucalyptus* apresenta variações nas características da madeira, principalmente no sentido radial, longitudinal e tangencial. Entretanto, essa heterogeneidade da madeira proporciona que se encontrem diferentes materiais para diversos usos. A alta disponibilidade de madeira de eucalipto ocorre por causa da adaptação a diferentes condições edafoclimáticas (BRITO et al. 1983; NEVES, 2012).

De acordo com Neves (2012), diversos fatores ambientais e silviculturais podem influenciar o potencial energético da madeira e a qualidade do carvão vegetal produzido. A qualidade da madeira e o rendimento gravimétrico do carvão vegetal estão diretamente ligados às características da madeira como baixo teor de cinzas, alto teor de lignina, elevada densidade e fibras com parede mais espessa e de menor largura (TRUGILHO et al. 1997).

A variação na temperatura final de carbonização afeta a qualidade do carvão produzido, consequentemente, o desempenho na indústria. Barcellos (2007), avaliando o efeito das temperaturas finais (350, 450 e 550°C) obteve que o poder calorífico e teor de lignina total foram importantes para o rendimento gravimétrico da carbonização na temperatura final de 350°C. Considerando as três temperaturas finais de carbonização, a lignina insolúvel foi a mais importante para a qualidade do carvão vegetal.

No processo de carbonização ocorrem diversas reações químicas que ainda não estão definidas, assim as melhorias dos meios de produção do carvão ficam limitadas por falta de conhecimento sobre a influência das características da madeira em relação ao aumento da temperatura no processo de produção de carvão vegetal. A análise química e térmica é importante para facilitar o entendimento e identificação dos processos que ocorrem durante o processo de pirólise da madeira. Dessa forma, é necessário que se utilize meios eficientes para determinar as reações que ocorrem e a influência das características da madeira na produção do carvão vegetal (SOARES, 2011). Assim, o objetivo deste estudo foi analisar o efeito da temperatura final e da taxa de aquecimento nas propriedades do carvão de *Eucalyptus urophylla*.

2. Metodologia

2.1 Material vegetal

Foi utilizada uma árvore coletada em plantações de uma empresa siderúrgica, localizada no município de Santo Antônio do Amparo – MG. O material foi utilizado para caracterização do clone de *Eucalyptus urophylla*, de 6 anos de idade, com espaçamento 3 x 2,8 metros.

Após o abate, foi retirado um torete com aproximadamente 30 cm de comprimento e 15 cm de diâmetro. Em seguida, discos com 2,5 cm de espessura foram retirados deste torete. Amostras com dimensões de 2 x 2 x 2,5 cm (R x T x L) foram confeccionadas a partir dos discos em diferentes posições entre a medula e a casca. Foram utilizadas nove unidades amostrais para carbonização da madeira e análise imediata.

2.2 Carbonização e propriedades do carvão vegetal

As carbonizações foram realizadas em mufla de laboratório com aquecimento elétrico em duas temperaturas, de 350°C e 550°C. A temperatura inicial foi em todos os tratamentos igual a 50°C. As temperaturas máximas utilizadas foram 350 e 550°C. As taxas de aquecimento utilizadas para as duas temperaturas máximas foram de 1°C e 5°C/min.

As amostras foram carbonizadas conforme metodologia descrita por Trugilho (2006), onde os corpos de provas foram previamente secos em estufa a $105 \pm 3^\circ\text{C}$ e, posteriormente, inseridos em um container metálico com dimensões nominais de 30 cm de comprimento e 12 cm de diâmetro, o qual foi levado ao interior da mufla, para serem carbonizados carbonização.

Após cada carbonização, foram determinados, com base na massa de madeira seca, os rendimentos gravimétricos em carvão e o rendimento em carbono fixo. Além disso, foi realizada a análise de química imediata do carvão em amostras moídas e peneiradas a uma granulometria de, aproximadamente, 0,2 mm, seguindo os procedimentos preconizados pelas NBR 6923 (ABNT, 1981) e NBR 8112 (ABNT, 1986) para a determinação dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, em base seca.

O rendimento gravimétrico em carbono fixo foi obtido multiplicando-se o rendimento gravimétrico em carvão vegetal pelo teor de carbono fixo. O poder calorífico superior do carvão foi determinado de acordo com a metodologia descrita pela NBR 8633 (ABNT, 1984). As amostras de carvão foram trituradas em um cadinho metálico e classificadas em peneiras de 40/60 mesh (ASTM, 1982). As frações das amostras, retidas na peneira de 60 mesh, foram usadas para a determinação da análise das propriedades químicas do carvão vegetal.

2.3 Análise dos dados

O experimento foi instalado segundo um delineamento inteiramente casualizado fatorial duplo, sendo duas temperaturas (550°C e 350°C), duas taxas de aquecimento (5°C/min e 1°C/min) e três repetições, totalizando quatro tratamentos. Foi utilizada uma amostra composta para as análises das propriedades químicas do carvão e madeira. Todos os dados foram submetidos aos testes *Cochran e Bartlett* (homogeneidade de variâncias) e *Lilliefors* (normalidade).

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e quando estabelecidas diferenças significativas, os tratamentos foram comparados entre si por meio do teste de *Tukey* a 5% de probabilidade.

3. Resultados e Discussão

A (Figura 1) apresenta o teor de carbono fixo, material volátil e teor de cinzas do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* submetidos a duas temperaturas de carbonização.

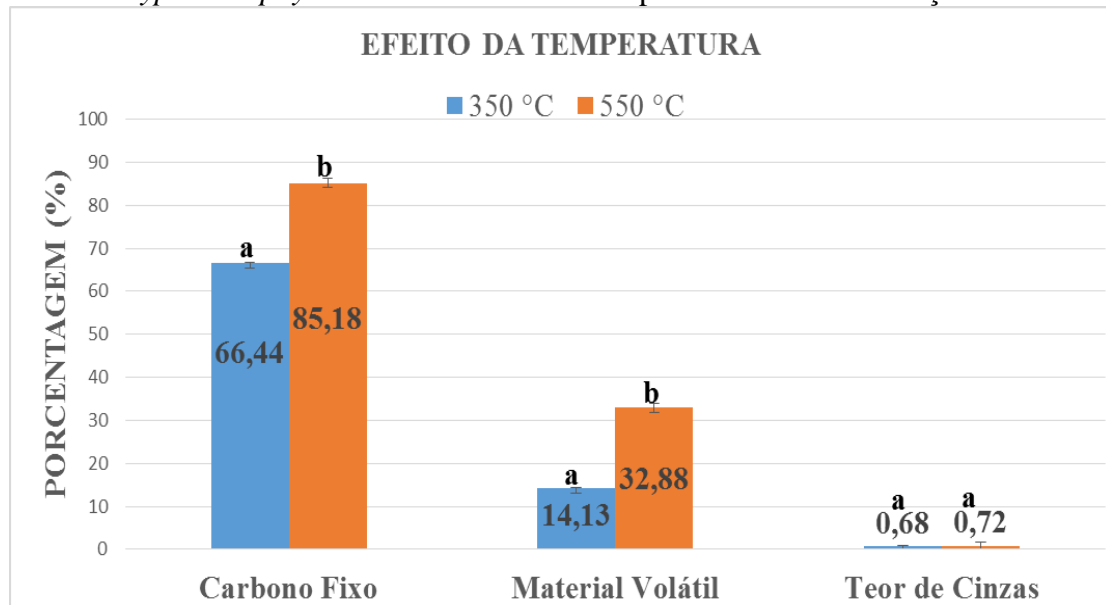


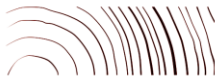
Figura 1. Teor de carbono fixo, material volátil e teor de cinzas (%) do carvão de *Eucalyptus urophylla*

Os resultados apresentados na Figura 1 ilustram que houve diferença significativa entre as temperaturas. A madeira submetida à temperatura de 550°C apresentou maior teor de carbono fixo no carvão vegetal produzido. Estes resultados são coerentes com os valores obtidos por Neves (2012), Barbosa (1986) e Syred et al. (2006) confirmando que quanto maior a temperatura final de carbonização maior será o teor de carbono fixo. Dessa forma, parte desse comportamento pode ser explicada devido ao maior tempo e maior temperatura de exposição da madeira a carbonização que promove maior eliminação de materiais voláteis e aumento no percentual de carbono fixo do carvão vegetal (BARCELLOS, 2007). Segundo Oliveira et al. (2010), o maior teor de carbono fixo do carvão de *Eucalyptus pellita* F. Muell. foi obtido quando submetido a um maior tempo de carbonização, o que corrobora com os resultados apresentados neste trabalho.

Já o teor de carbono fixo de *Eucalyptus urophylla* foi superior para temperatura de 550°C. Tal valor foi também obtido por Sturion et al. (1988) que trabalharam com *E. vimilalis* e avaliaram a influência da idade de corte nas características da madeira, em temperatura máxima de 500°C e ciclo total de carbonização de 5 horas. As idades observadas foram de quatro e sete anos e os teores de carbono fixo foram de 78,8 e 78,7%, respectivamente.

Valente et. al (1984), estudando o efeito da temperatura de carbonização sobre os rendimento e propriedades do carvão vegetal produzido de *E. grandis* obtiveram resultados semelhantes para o teor de carbono fixo (82%). Segundo Valente et. al (1984), o aumento da temperatura provoca o aumento do teor de carbono fixo do carvão vegetal produzido.

Barcellos (2007) avaliou o efeito da temperatura final na variabilidade das propriedades do carvão vegetal de *E. urophylla* em temperaturas de 350 e 550°C, com taxa de aquecimento de 1,66 °C/min para as duas marchas de carbonização. O Autor obteve resultados inferiores ao encontrado neste trabalho para o teor de carbono fixo, com resultados de 60,12% (350 °C)



e 77,88% (550 °C). Além disso, Barcellos (2007) obteve resultados de 36,75% e 18,81% para o teor de material volátil nas temperaturas de 350 e 550 °C, respectivamente.

De acordo Oliveira et al. (2010), a marcha de carbonização que possuiu o menor tempo de carbonização e a menor temperatura final apresentou os menores teores de carbono fixo (83,17%) para o carvão de *Eucalyptus pellita* F. Muell. Esse resultado pode ser explicado por ter ocorrido uma menor degradação dos constituintes da madeira fazendo com que o teor de matérias voláteis fosse alto. Este mesmo comportamento foi encontrado neste trabalho (Figura 1).

A Figura 2 apresenta o teor de carbono fixo, material volátil e teor de cinzas do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake submetidos a duas taxas de aquecimento de carbonização.

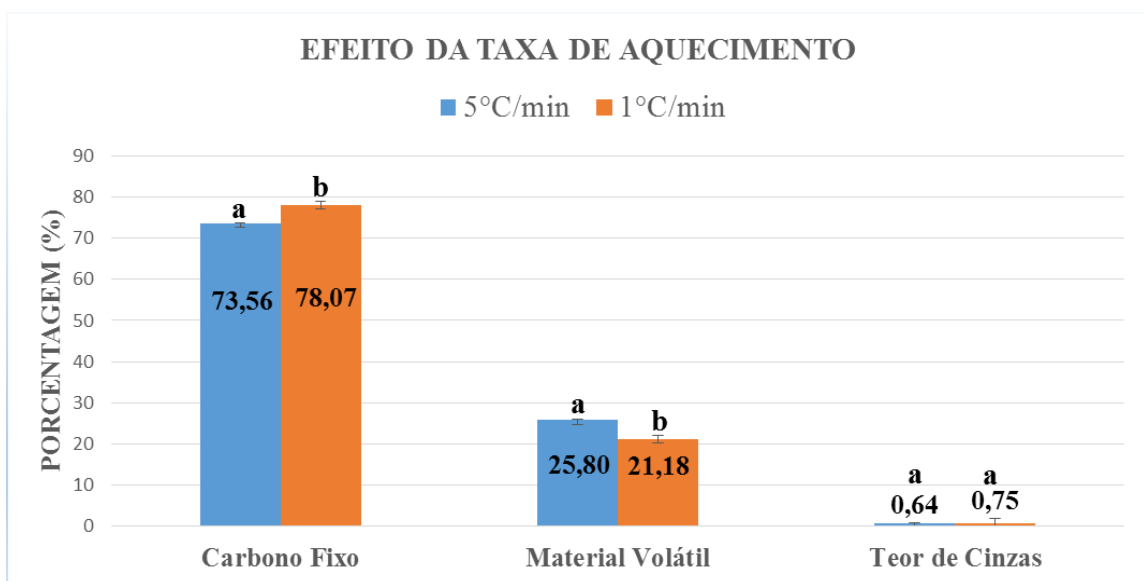


Figura 2. Teor de carbono fixo, material volátil e teor de cinzas (%) do carvão de *Eucalyptus urophylla*

Na Figura 2 observa-se que houve diferença significativa entre as duas taxas de aquecimentos utilizadas no processo de carbonização. O carvão produzido na taxa de aquecimento de 1°C/min apresentou maior teor de carbono fixo. Parte deste comportamento pode ser explicada pelas menores taxas de aquecimentos proporcionarem maior rendimento do sólido formado a partir da celulose pura (ANTAL et al. 2000).

Vella et al. (1989), analisaram o efeito da temperatura final de 450°C na madeira de *Eucalyptus tereticornis*, em taxas de aquecimento de 0,42; 0,63; 0,64; 1,05 e 1,25°C/min. O resultado obtido por esses autores foi de 75% para o teor de carbono fixo, próximo ao encontrado neste presente trabalho (78,07%). Os valores obtidos podem ser explicados pela influência do teor de matérias voláteis e cinzas, que é obtido pela diferença do somatório destes por 100. Dessa forma, o teor de materiais voláteis obtidos com o aumento da taxa de aquecimento são maiores, proporcionando um menor teor de carbono fixo no carvão vegetal. Para esses autores o teor de cinzas aumentou gradativamente com o aumento da taxa de aquecimento, os resultados obtidos nesse trabalho apresentam uma diminuição no valor do teor de cinzas em função do aumento da taxa de aquecimento. De acordo com Vella et al. (1989) o teor de materiais voláteis sofre variação com a taxa de aquecimento. Segundo os autores o aumento desta variável acelera a expulsão das frações gasosas e diminuem as possibilidades de algumas dessas permanecerem no resíduo, em forma de matérias voláteis.

Oliveira et al. (2010), avaliaram os carvões produzidos com madeira de *E. pellita*, aos cinco anos e encontraram que 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. Os resultados obtidos neste trabalho para o teor de carbono fixo foram inversamente proporcionais ao teor de materiais voláteis (Figura 2).

A Figura 3 apresenta o rendimento gravimétrico e o rendimento em carbono fixo de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake em função da temperatura de carbonização.

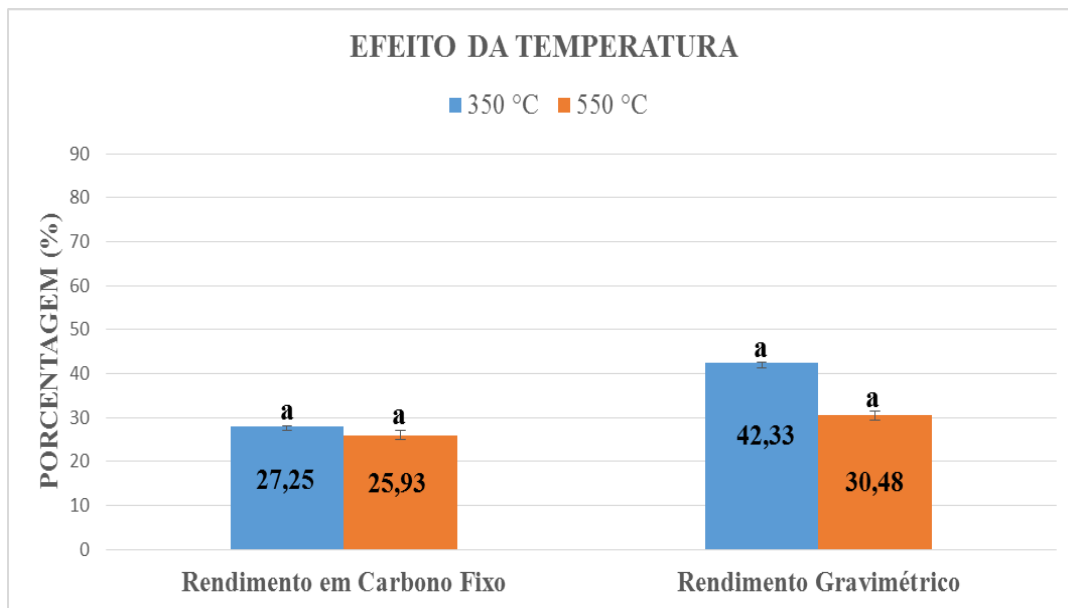


Figura 3. Rendimento em carbono fixo e rendimento gravimétrico do carvão vegetal

Resultado semelhante para o rendimento gravimétrico foi obtido por Vieira et al. (2013), para a temperatura de 600°C, que avaliaram a influência da temperatura final de carbonização no rendimento dos produtos da carbonização, utilizando *Eucalyptus microcorys*, com 35 anos de idade. Pinheiro et al. (2005) avaliaram a influência da temperatura final entre 200 e 650°C e das taxas de aquecimento de 1; 2,5; 5; 10; 20; e 50°C/min na carbonização das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. Ambos os autores observaram que houve diminuição dos rendimentos com o aumento da temperatura final. Pinheiro *et al.* 2005 ainda observou que ocorreu maior variação nos rendimentos na faixa entre 200 e 400 °C, com estabilização a partir dos 400°C, em torno de 30%. Valente et. al (1984) afirmam que o aumento da temperatura faz com que ocorra a diminuição no rendimento em carbono fixo do carvão vegetal de *E. grandis*, resultado semelhante ao encontrado neste trabalho (Figura 3).

A (Figura 4) apresenta o rendimento gravimétrico e o rendimento em carbono fixo de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake em função da taxa de aquecimento.

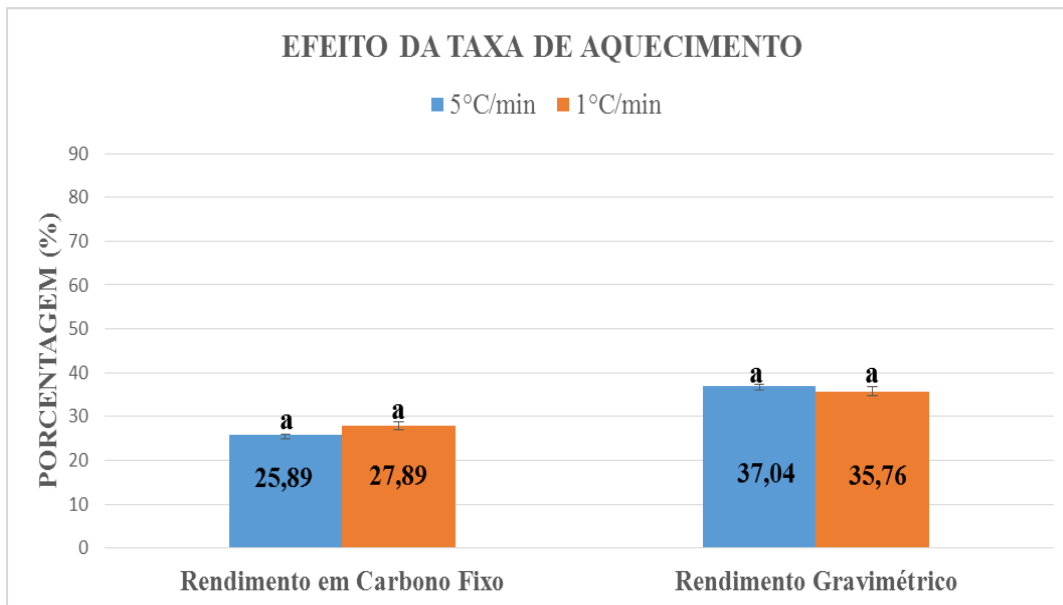


Figura 4. Rendimento em carbono fixo e rendimento gravimétrico do carvão vegetal

Os resultados obtidos neste trabalho mostram que não houve diferença significativa para o rendimento em carbono fixo e rendimento gravimétrico nas diferentes taxas de aquecimento (Figura 4). Vella et al. (1989) avaliaram na madeira de *Eucalyptus tereticornis*, com temperatura final de 450°C o efeito das taxas de aquecimento de 0,42; 0,63; 0,64; 1,05 e 1,25°C/min e obtiveram 32% de rendimento gravimétrico para taxa de aquecimento de 1°C/min. Neste trabalho foi obtido um valor superior de 35,76% de rendimento gravimétrico para 1°C/min. Parte deste comportamento pode ser explicado devido a temperatura final ser 550°C. Pinheiro et al. (2005) afirmam que quanto maior a taxa de aquecimento utilizada no processo de carbonização menor será o rendimento em carvão vegetal. Parte desse comportamento pode ser explicada devido às amostras continuarem a se degradar mesmo quando o forno atinge a temperatura final programada (550°C).

4. Conclusão

Os resultados deste estudo permitem concluir que:

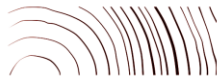
A temperatura final influenciou no processo de carbonização da madeira de *Eucalyptus urophylla* nos teores de carbono fixo e matérias voláteis do carvão vegetal. Não houve efeito significativo para o teor de cinzas, rendimento em carbono fixo e rendimento gravimétrico.

A taxa de aquecimento influenciou no processo de carbonização da madeira de *Eucalyptus urophylla* nos teores de carbono fixo e matérias voláteis do carvão vegetal. Não houve influência para o teor de cinzas, rendimento em carbono fixo e rendimento gravimétrico.

Desta forma, o teor de carbono fixo e de materiais voláteis são os parâmetros que mais sofreram influência da temperatura final e da taxa de aquecimento.

5. Referências bibliográficas

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard method for chemical analysis of charcoal. Philadelphia, 1982. 1042 p.



ANTAL, M. J. et al. Attainment of the theoretical yield of carbon from biomass. IND. ENG. CHEM. Res., Washington, v.39, n.11, p.4024-4031, 2000.

ARRUDA, T. P. M. et al. Remade: Densidades da madeira de Teca de primeiro desbaste. REVISTA DA MADEIRA, edição N° 136, julho de 2013.

ASSIS, M. R.; PROTÁSIO, T. P.; ASSIS, C. O.; TRUGILHO, P. F.; SANTANA, W. M. S. Qualidade e rendimentos do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v. 32, n. 71, p. 291-302, 2012. DOI: 10.4336/2012.pfb.32.71.291

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6923**. Brasília, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: análise imediata: material volátil, cinzas, carbono fixo. Rio de Janeiro, 1983. 6 p.

_____. **NBR 8633**: carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.

BARBOSA, J. A. Avaliação qualitativa e quantitativa do carvão e dos condensados produzidos na carbonização da madeira de algaroba. Viçosa, 1986. 52p. (Tese Mestrado - UFV).

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.

BRITO, J. O. et al. Análise da produção energética e de carvão vegetal de espécies de eucalipto. BOLETIM DO INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS, Piracicaba, n. 23, p. 53-56, abr. 1983.

BRITO, J.O. O uso energético da madeira. Estudos Avançados, São Paulo, v.21, n.59, p.185-193, 2007.

COUTINHO, A. R. Qualidade do carvão vegetal correlacionada com as características da madeira do *Eucalyptus saligna* e temperatura de carbonização. Piracicaba, 1984. 79p. (Tese-Mestrado-ESALQ)

MOREIRA, J.M.M.A.P. Potencial e participação das florestas na matriz energética. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v.31, n.68, p.363-372, 2011.

NEVES, T. L. QUALIDADE DA MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL DE CLONES DE *Eucalyptus* CULTIVADOS NO SUL DE MINAS GERAIS. 2012. 95 p. Dissertação (Engenharia Florestal) Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2012.

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.



PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. *Fuel*, London, v. 84, n. 5, p. 487-494, May 2005.

PINHEIRO, P. C. 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*, Rio de Janeiro, v. 2, n. 2, p. 159-168, 2005.

SOARES. V. C. Comportamento térmico, químico e físico da madeira e do carvão de *Eucalyptus urophylla* vs *Eucalyptus grandis* em diferentes idades. 2011. 109 p. Tese (Programa de Pós – Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira). Universidade Federal de Lavras, 2011.

SANTOS, R. C. et al. Análise termogravimétrica em clones de *Eucalyptus* como subsídio para a produção de carvão vegetal. *REVISTA CERNE*, Lavras, v. 18, n. 1, p. 143-151, jan./mar. 2012

SYRED, C.; et al. A clean, efficient system for producing charcoal, heat and power (CHaP). *FUEL*, London, v.85, p.1566-1578, 2006.

TROMPOWSKY. P. M. Síntese e caracterização de substâncias semelhantes aos ácidos húmicos de carvão vegetal de eucalipto, e sua interação com diclorofenol, cálcio, manganês e alumínio. 2006. 107 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.

THIPKHUNTHOD, P. et al. Predicting the heating value of sewage sludges in Thailand from proximate and ultimate analyses. *FUEL*, London, v. 84, n. 7/8, p. 849-857, Aug. 2005.

TRUGILHO, P. F. et al. Aplicação da análise de correlação canônica na identificação de índices de qualidade da madeira de eucalipto para a produção de carvão vegetal. *REVISTA ÁRVORE*, Viçosa, MG, v. 21, n. 2, p. 259-267, mar./abr. 1997.

TRUGILHO, P. F. et al. 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.

TRUGILHO, P. F. Carbonização da madeira e controle de qualidade do carvão vegetal. Lavras, MG. Departamento de Ciências Florestais, 2006. 41 p. Apostila.

VALENTE, O. F. et al. Efeito da temperatura de carbonização nos rendimentos e propriedades do carvão vegetal produzido. *REVISTA ÁRVORE*, Viçosa, v.9, n.1, p. 28-39, 1985.

VELLA, M.M. do C.F. Influência da velocidade de carbonização nos rendimentos e nas propriedades do carvão produzido. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1989. 53p. Tese Mestrado.

VIEIRA, R. S. et al. Influência da temperatura no rendimento dos produtos da carbonização de *Eucalyptus microcorys*. *CERNE*, Lavras, v.19, p. 59-64, jan./mar. 2013.