



EFEITO DA TEMPERATURA FINAL DE CARBONIZAÇÃO NA RESISTÊNCIA E RIGIDEZ DO CARVÃO VEGETAL

Luciano Junqueira COSTA¹; Paulo Fernando TRUGILHO¹; Taís R. Lima ABREU¹; Taiana Guimarães ARRIEL¹; Breno Assis LOUREIRO¹; Luiz Eduardo SILVA¹; Yllian Banchieri RIBEIRO¹

1 – Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Brasil

Resumo: A resistência e a rigidez são propriedades mecânicas que influenciam diretamente a qualidade do carvão vegetal. O presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da temperatura final de carbonização sobre a resistência e rigidez à compressão paralela às fibras do carvão vegetal de *Eucalyptus sp.*. As árvores, provenientes da região nordeste do estado de estado de Minas Gerais, tinham 13 e 17 anos de idade e plantadas em espaçamento de 3 x 2 m. Os fustes foram subdivididos em toras de 3 m de comprimento e posteriormente realizou-se o desdobro, obtendo-se um pranchão central, com 10 a 12 cm de espessura. As pranchas foram secas ao ar livre e em seguida confeccionou-se corpos-de-prova com 3,0 cm x 3,0 cm x 10 cm. As carbonizações foram realizadas em forno elétrico tipo mufla adaptado, utilizando-se as temperaturas finais de 300°C, 350°C, 400°C e 450°C, e taxa de aquecimento de 100°C/hora. Na avaliação do experimento, utilizou-se a análise de regressão linear visando obter a relação funcional entre o efeito da temperatura de carbonização sobre as características de resistência e rigidez do carvão vegetal. Pelos resultados obtidos, observou-se uma redução de 32,46% no módulo de elasticidade, 60,28% na força máxima e de 59,25% na resistência à compressão paralela às fibras do carvão vegetal entre as temperaturas de 300 e 450°C. De modo geral, observou-se que tanto a resistência quanto a rigidez à compressão paralela às fibras, foram maiores na temperatura de 300°C.

Palavras-chave: propriedades mecânicas, compressão paralela, *Eucalyptus*.

Abstract: Strength and stiffness are mechanical properties that directly influence the quality of charcoal. This study aimed to evaluate the effect of the carbonization final temperature on the stiffness and compression parallel to the fibers resistance of *Eucalyptus sp.* charcoal. The trees, from the northeastern of Minas Gerais state, had 13 and 17 years old and planted in spacing 3 x 2 m. The stems were divided into logs of 3 m length and thereafter performed as sawing, yielding a central plank from 10 to 12 cm thick. The boards were air dried and then concocted up bodies of the test piece with 3.0 cm x 3.0 cm x 10 cm. The carbonization was performed in an adapted electric muffle furnace, using final temperatures of 300°C, 350°C, 400°C and 450°C and a heating rate of 100°C/hour. In the evaluation of the experiment, the linear regression analysis is used to obtain the functional relationship between the carbonization temperature effect on the strength and stiffness characteristics of charcoal. From the obtained results, there was a 32.46% reduction in elastic modulus, 60.28% reduction of maximum strength and a 59.25% reduction in compression parallel to the fibers resistance of charcoal temperatures between 300 and 450°C. In general, it was observed that both, stiffness and compression parallel to the fibers resistance, was higher at 300°C.

Keywords: mechanical properties, parallel compression, *Eucalyptus*.



1. INTRODUÇÃO

O carvão vegetal é uma das mais antigas e importantes fontes de energia utilizadas mundialmente. Sua fabricação é conhecida desde longa data na história da humanidade (FERREIRA, 2012). O Brasil é o maior produtor e consumidor de carvão vegetal no mundo, devido a sua intensa utilização pela siderurgia. Aproximadamente 85% do carvão produzido são utilizados nas indústrias, 10% nas residências e o setor comercial como pizzarias, padarias e churrascarias com 5% (SINDCARV, 2014).

O Brasil é líder mundial na produção de aço usando o carvão vegetal como agente redutor do minério de ferro, resultado das condições favoráveis existentes no país para a produção de biomassa, sendo que 25 a 30% do aço produzido é obtido a partir da rota integrada a carvão vegetal, desencadeando importantes vantagens ambientais e competitivas (IBÁ, 2014). Em 2013, o consumo no Brasil alcançou 5,9 milhões de toneladas, com 76% de participação de madeira oriunda de árvores plantadas (IBÁ, 2014).

Em termos de área plantada destinada à produção de carvão, as empresas produtoras de aço possuem 507 mil hectares de árvores plantadas para uso econômico, além de apoiar técnica e financeiramente o plantio por terceiros, em fomento à atividade de silvicultura (ABRAF, 2013). Segundo Vieira (2009), no Brasil as principais espécies do gênero *Eucalyptus* plantadas visando à produção de carvão são o *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus camaldulensis*, híbridos de *Eucalyptus grandis* com *Eucalyptus urophylla*, entre outros.

Um dos desafios da indústria siderúrgica é a heterogeneidade do carvão utilizado no processo de redução do minério de ferro, sendo que as propriedades mecânicas do carvão são fundamentais para a qualidade do aço produzido.

As principais propriedades mecânicas do carvão vegetal são as resistências ao esmagamento, ao choque (impacto) e à rigidez. A resistência mecânica, também conhecida com friabilidade do carvão, é um dos fatores mais importantes na redução do minério de ferro, segundo Vieira (2009), a friabilidade significa a menor ou a maior resistência do carvão à ruptura e a consequente produção de finos.

Apesar da importância do carvão vegetal para o setor siderúrgico, ainda são escassos os estudos em relação ao efeito da temperatura sobre as propriedades mecânicas do mesmo. Segundo Vieira (2009), a dificuldade de avaliar as características mecânicas do material, deve-se principalmente ao fato do carvão ser um material quebradiço e heterogêneo, dificultando a confecção de corpos-de-prova isentos de defeitos.

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da temperatura final de carbonização sobre a resistência e rigidez à compressão paralela às fibras do carvão vegetal de *Eucalyptus sp.*.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Material de estudo

Neste estudo foram utilizados genótipos superiores, obtidos em povoamentos de *Eucalyptus sp.* plantados em espaçamento de 3 x 2 m, com 13 e 17 anos de idade, adaptados para as condições ambientais do nordeste de Minas Gerais.

As árvores selecionadas foram abatidas, identificadas e amostradas. O fuste foi subdividido em toras de 3 m de comprimento, as quais após devidamente identificadas, foram transportadas para uma serraria onde foi realizado o desdobro.



Após o desdobro foram obtidas tábuas de 3 cm de espessura e um pranchão central, com 10 a 12 cm de espessura. As pranchas e tábuas foram secas ao ar livre, em pilhas cobertas, construídas em cima de uma base sólida e durável.

Depois de secas, as pranchas foram transportadas ao setor de Usinagem da Madeira, localizado no Departamento de Ciências Florestais, da Universidade Federal de Lavras, onde foram confeccionados corpos-de-prova com 3,0 cm x 3,0 cm x 10 cm. A amostragem foi realizada ao acaso, para evitar o efeito de posição e de idade.

2.2. Carbonização do Material

A carbonização da madeira de eucalipto foi realizada no Laboratório de Biomateriais, da Universidade Federal de Lavras, sendo o material processado em um forno elétrico (mufla) adaptado com um sistema de recuperação de gases.

As carbonizações foram realizadas em duplicatas, com temperatura inicial de 100°C até 300, 350, 400 e 450°C a uma taxa de aquecimento de 100°C/hora, permanecendo por um período de 176, 114, 68 e 30 minutos na temperatura máxima, respectivamente. Foram utilizados tempos diferentes com o objetivo de assegurar a total transformação da madeira em carvão vegetal, principalmente nas menores temperaturas finais.

2.3. Obtenção dos corpos de prova de carvão

Para confecção dos corpos-de-prova de carvão vegetal, foi utilizada uma serra de arco, cuja lâmina tem uma espessura de 0,6 mm, que apresenta características adequadas para o corte do carvão vegetal. Depois de cortados, os corpos-de-prova foram lixados em uma lixa de madeira, para retirada de imperfeições e defeitos superficiais do material. Para a realização dos testes foram confeccionados corpos-de-prova com 2,0 cm x 2,0 cm x 3,0 cm.

Em função da temperatura final de carbonização, foram confeccionados dois corpos-de-prova para o ensaio de compressão paralela às fibras.

2.4. Ensaio Mecânico

Os ensaios mecânicos de resistência à compressão paralela às fibras e rigidez foram realizados em uma máquina universal EMIC DL 3000. A velocidade de aplicação de carga foi de 0,05 mm/min e os ensaios foram interrompidos quando a perda de carga atingia 30% da carga máxima, indicando a ruptura do corpo-de-prova, impossibilitando o seu rearranjo estrutural. O procedimento adotado para os ensaios foi uma adaptação da norma ASTM – D143 – 94 (American Society for Testing Materials – ASTM, 1995).

2.5. Análise Estatística

Na avaliação do experimento foi utilizada a análise de regressão linear, em que se procurou relacionar o efeito da temperatura de carbonização sobre as características de resistência e rigidez do carvão vegetal. As análises foram realizadas utilizando o software Microsoft Office Excel 2007.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta os valores médios de resistência e rigidez do carvão vegetal no ensaio de compressão paralela às fibras para as temperaturas finais de carbonização avaliadas. Pode-se observar que o módulo de elasticidade, a força máxima e a tensão na força máxima foram maiores na temperatura de 300 °C.



Tabela 1. Propriedades mecânicas do carvão vegetal, em ensaio de compressão paralela às fibras, em função da temperatura final de carbonização

TEMPERATURA DE CARBONIZAÇÃO (°C)	MOE (Kgf/cm ²)	FMax (kgf)	TFM (Kgf/cm ²)
300	5050	506	108
350	3898	218	49
400	4131	225	49
450	3411	201	44

MOE: Módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras; FMax: Força máxima à compressão paralela às fibras ; TFM: Tensão na força máxima à compressão paralela às fibras.

Pela Tabela 1 observa-se uma tendência de redução das características mecânicas do carvão com o incremento da temperatura de carbonização. Observou-se uma redução de 32,46% no módulo de elasticidade, 60,28% na força máxima e de 59,25% na resistência à compressão paralela às fibras do carvão vegetal entre as temperaturas de 300 e 450°C. Esse comportamento das propriedades mecânicas do carvão em função da temperatura foi observado também por Pinheiro e Sèye (1998), estudando três espécies do gênero *Eucalyptus*.

Para a estimativa da resistência à compressão paralela e o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do carvão vegetal de *Eucalyptus sp.* em função da temperatura de carbonização, foram ajustadas equações polinomiais quadráticas que estão apresentadas nas Figuras 1 e 2, respectivamente. Pode-se observar que o ajuste foi elevado nos dois modelos.

A Figura 1 mostra a tendência observada para o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do carvão vegetal em função da temperatura de carbonização. Observa-se que o módulo de elasticidade apresentou uma tendência geral de redução em função da temperatura final de carbonização.

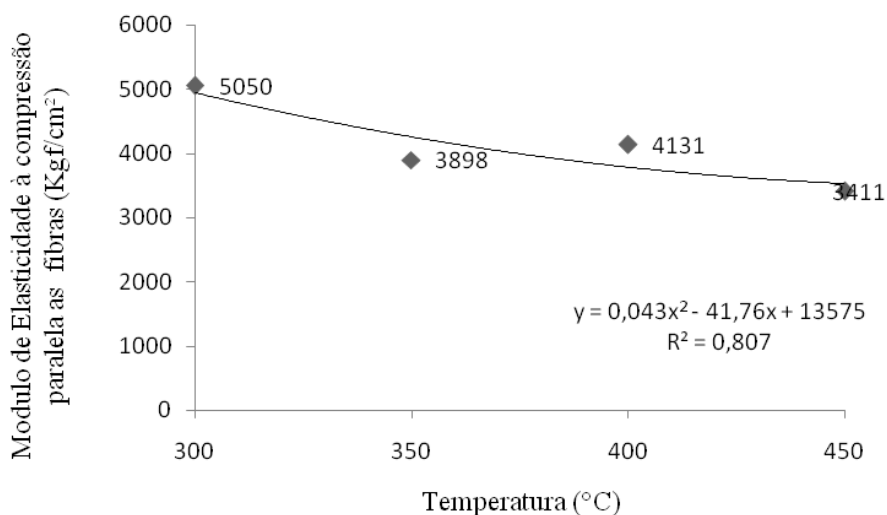


Figura 1. Relação funcional do módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do carvão vegetal de *Eucalyptus* em função da temperatura de carbonização

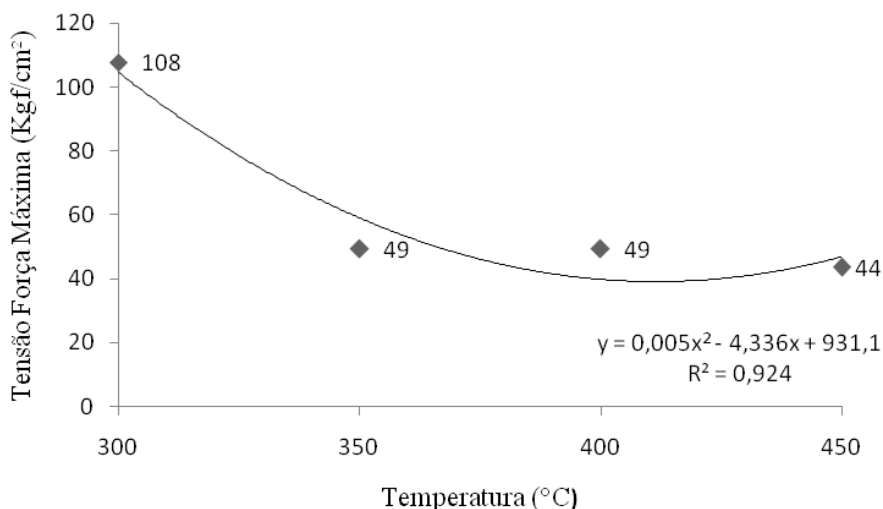


Figura 2. Relação funcional da resistência à compressão paralela às fibras do carvão vegetal de *Eucalyptus* em função da temperatura de carbonização

A resistência à compressão paralela às fibras do carvão vegetal também tendeu a decrescer com o aumento da temperatura (Figura 2) da mesma forma que o módulo de elasticidade. Nota-se uma diminuição bem acentuada entre as temperaturas de 300 e 350°C e após esta temperatura uma tendência de estabilização. Entretanto, entre 300 e 450°C ocorreu uma redução de 59,25% na resistência à compressão paralela às fibras. Segundo Oliveira et al. (1982), é neste intervalo que acontece a maior perda de massa devido a liberação de voláteis e ocorre uma variação importante na porosidade. Este comportamento é associado ao grau de decomposição dos constituintes da madeira e da porosidade do carvão vegetal. Acima de 350°C a resistência à compressão paralela reduz bastante, em decorrência da presença de trincas no carvão vegetal (PINHEIRO e SÈYE, 1998).

Segundo Pereira et al. (2013), as hemiceluloses tem o seu pico de máxima degradação por volta de 280°C e da celulose por volta de 347°C. Os autores comentam ainda que para degradação da lignina não é possível determinar uma faixa de temperatura específica. Observa-se, que os elevados valores, tanto da resistência quanto do módulo de elasticidade, na temperatura de 300°C se devem ao fato que a decomposição térmica dos constituintes básicos da parede celular, principalmente a celulose, ainda não ocorreu por completo, o que confere uma maior resistência ao carvão vegetal. A lignina, por ter maior estabilidade térmica, também deve contribuir com esse resultado.

CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos neste trabalho pode-se concluir que:

Verificou-se uma tendência de redução na resistência à compressão paralela às fibras e na rigidez do carvão vegetal com o aumento da temperatura final de carbonização.

As características de resistência e rigidez do carvão vegetal foram maiores na temperatura de 300°C.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CNPq, FAPEMIG e CAPES pela ajuda financeira.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTA PLANTADA. ABRAF. Anuário Estatístico da ABRAF : ano base 2012. Brasília, 2013. 145 p.

ASTM - American Society for Testing and Materials. D143-94: Standard methods of testing small clear specimens of timber. Philadelphia, USA, 1995.

FERREIRA, C. A. Caracterização anatômica, secagem e carbonização da madeira de clones de *Eucalyptus* e de espécies do cerrado. 2012. 89p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. IBÁ. Anuário Estatístico da IBÁ: ano base 2013. Brasília, 2014. 97 p.

OLIVEIRA, J.B. et al. Carvão vegetal; destilação, propriedades e controle de qualidade. In: OLIVEIRA, J.B.; ALMEIDA, M.R.; GOMES, P.A. Propriedades do Carvão vegetal. Belo Horizonte: Fundação Tecnológica de Minas Gerais. CETEC-SPT-006, 1982. p. 41-49.

PEREIRA, B. L. C. et al. Estudo da degradação térmica da madeira de *Eucalyptus* através de termogravimetria e calorimetria. Revista *Árvore*, v. 37, n.3, p. 567-576, 2013.

PINHEIRO, P.C.C.; SÈYE, O. Influência da temperatura de carbonização nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 53., 1998, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte, 1998. p. 232-242.

SINDICATO DAS INDÚSTRIAS E DOS PRODUTORES DE CARVÃO VEGETAL. SINDCARV. Números do setor. Mato Grosso do Sul. 2014 a. Disponível em: <http://www.sindicarv.com.br/carvao-vegetal/carvao-vegetal>. Acesso em: 16 de setembro de 2014.

VIEIRA, R.S. Propriedades mecânicas da madeira de clones de *Eucalyptus* e do carvão vegetal produzido entre 350°C e 900°C. 2009. 80p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.