

Caracterização mecânica do carvão vegetal de clones *Corymbia*Mechanic characterization of charcoal of *Corymbia* clonesLuciano Junqueira Costa<sup>1</sup>, Paulo Fernando Trugilho<sup>2</sup>, José Tarcísio Lima<sup>2</sup>,  
Rodrigo Simetti<sup>3</sup> e Thomaz Aurélio Bastos<sup>4</sup>**Resumo**

O carvão vegetal é um produto muito friável. A friabilidade do carvão vegetal está associada às suas propriedades mecânicas. As características de resistência e elasticidade são importantes em todo o seu processo produtivo, indo desde as etapas de manuseio, transporte e utilização do carvão vegetal. Apesar da importância das características mecânicas do carvão vegetal, ainda são poucos os relatos na literatura sobre tais propriedades, especialmente em relação aos novos materiais clonais desenvolvidos pelas empresas florestais e plantados para esta finalidade. O presente trabalho teve como objetivo avaliar mecanicamente o carvão vegetal de clones de *Corymbia* produzidos em diferentes temperaturas de carbonização. Foram utilizados sete clones híbridos do gênero *Corymbia* procedentes da região norte do Estado de Minas Gerais. A amostragem consistiu na retirada de toretes de madeira à altura de 1,3 m do tronco (DAP) em três árvores por clone. Os toretes foram processados, carbonizados e posteriormente confeccionados os corpos de prova de carvão utilizados nos ensaios de compressão paralela e perpendicular às fibras do carvão vegetal. Pelos resultados obtidos observou-se que a temperatura final de carbonização influenciou significativamente as propriedades mecânicas do carvão vegetal. Para os ensaios mecânicos observou-se tendência de aumento das características de elasticidade e resistência do carvão vegetal no ensaio de compressão paralela e perpendicular às fibras em função da temperatura de carbonização e que os maiores valores foram observados no ensaio de compressão paralela às fibras.

**Palavras-chave:** Compressão paralela e perpendicular, temperatura, produção de carvão.

**Abstract**

Charcoal is a very friable product. Charcoal friability is associated with its mechanical properties. The strength and elasticity characteristics are important throughout the production process, from handling, transport and to the use of charcoal. Despite the importance of the charcoal mechanical characteristics there are few reports in the literature on such properties, especially about new clonal materials developed by forestry Companies and planted for this purpose. This study aimed at mechanically evaluating the charcoal quality from *Corymbia* clones produced at carbonization temperatures of 350, 450, 550, 700°C. Seven clones of the *Corymbia* genus were collected at the northern region of Minas Gerais State. Small logs were cut out at DBH (1.3 meters from ground) of the trees, processed, carbonized and further made into charcoal specimens used in compression tests, both parallel and perpendicular to fiber direction. Carbonization final temperature affected significantly the mechanical properties of the charcoal. As for mechanical tests, an increase in young modulus and the charcoal resistance submitted to both parallel and perpendicular compression to the fibers was found, related to the carbonization temperature and the highest values in the parallel to fibers compression test.

**Keywords:** parallel and perpendicular compression, temperature, charcoal production.

**INTRODUÇÃO**

O carvão vegetal é um produto importante para a economia e para o setor industrial brasileiro, principalmente, para siderurgia que é uma das poucas no mundo que utiliza de forma expressiva o carvão como termorreduzidor do minério de ferro para a obtenção do ferro gusa, ferro liga e aço. Em 2014, o consumo de carvão vegetal no Brasil foi de cerca de 5,9 milhões de toneladas (IBÁ, 2015).

<sup>1</sup>Doutorando do Departamento de Engenharia Florestal. UFV - Universidade Federal de Viçosa / Setor de Ciência e Tecnologia da Madeira - 36570-000 - Viçosa, MG, Brasil. E-mail: [l.junqueira@hotmail.com](mailto:l.junqueira@hotmail.com).

<sup>2</sup>Professor Titular do Departamento de Ciências Florestais. UFPA - Universidade Federal de Lavras / Laboratório Multiusuário de Biomateriais - 37200-000, Lavras, Minas Gerais, Brasil. E-mail: [trugilho@dcf.ufla.br](mailto:trugilho@dcf.ufla.br); [jtlima@dcf.ufla](mailto:jtlima@dcf.ufla).

<sup>3</sup>Doutorando do Departamento de Ciências Florestais. UFPA - Universidade Federal de Lavras / Laboratório Multiusuário de Biomateriais - 37200-000, Lavras, Minas Gerais, Brasil. E-mail: [rodrigo.simetti@gmail.com](mailto:rodrigo.simetti@gmail.com).

<sup>4</sup>Graduando do Departamento de Ciências Florestais. UFPA - Universidade Federal de Lavras / Laboratório Multiusuário de Biomateriais - 37200-000, Lavras, Minas Gerais, Brasil. E-mail: [thomazz2@hotmail.com](mailto:thomazz2@hotmail.com).

Aproximadamente 86% do carvão vegetal produzido no país são destinados ao setor siderúrgico. No decênio de 2005 a 2015 o setor siderúrgico nacional produziu, em média anual, aproximadamente 32 milhões de toneladas de ferro gusa, sendo que cerca de 30% da produção foram obtidas a partir da utilização desse insumo como agente termorreduzidor do minério (IAB, 2015).

O carvão vegetal é produzido por meio da carbonização da madeira, é um produto rico em carbono, de natureza friável e que apresenta características físicas, químicas e mecânicas fortemente influenciadas pela temperatura final de carbonização, além da matéria-prima utilizada (PROTÁSIO et al., 2014; VIEIRA, 2009; TRUGILHO; SILVA, 2001).

O módulo de elasticidade e a resistência à compressão do carvão vegetal variam significativamente em função da temperatura final de pirólise da madeira, afetando a qualidade final do produto, principalmente, para o uso siderúrgico (ASSIS et al., 2016; COUTO; 2015; KUMAR; GUPTA, 1995; MOORE et al., 1974).

Para uso siderúrgico é desejável que carvão vegetal apresente alta resistência ao choque, à quebra e ao esmagamento (VIEIRA, 2009; BRITO, 1993). As propriedades mecânicas do carvão podem afetar as reações de redução do minério de ferro, prejudicando a permeabilidade do leito e gerando gradientes de temperatura no interior do alto forno. Atualmente, as propriedades mecânicas do carvão vegetal representam um dos principais problemas enfrentados pela indústria siderúrgica (ASSIS et al., 2016; CGEE, 2014).

Alto-forno que utiliza o carvão vegetal apresenta rendimento inferior em relação aos que utilizam o coque mineral, o que se deve principalmente à baixa resistência mecânica do carvão vegetal. A resistência à compressão do carvão vegetal é um fator que limita a altura dos altos-fornos; além disso a produção de finos está diretamente relacionada com essa propriedade (VIEIRA, 2009; ASSIS; BRAGA, 1977). A natureza friável do carvão é intensificada pelas operações de carga, descarga e transporte. O carvão vegetal produz cerca de 20 a 30% de finos ao longo do processo de produção, considerando desde a sua produção até descarga dentro do alto-forno (ASSIS et al., 2016; CETEC, 1982).

No entanto, apesar da importância da avaliação das características mecânicas do carvão em peças individualizadas, ainda não se tem disponível uma norma técnica específica que oriente a condução dos ensaios. Esse fato se deve, principalmente, à heterogeneidade do carvão vegetal associada à dificuldade de confecção de corpos de prova, para realização dos ensaios.

Diante do exposto o objetivo deste trabalho foi caracterizar mecanicamente, por meio de ensaios de compressão paralela e perpendicular às fibras, o carvão vegetal de clones de *Corymbia* sp. produzidos em temperaturas de 350°C, 450°C, 550°C e 700°C.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Material biológico

Neste estudo foram selecionadas 28 árvores procedentes do cruzamento do *Corymbia citriodora* com o *Corymbia torelliana* (TABELA 1). As árvores foram plantadas com espaçamento de 3 m x 3 m em teste clonal localizado no município de Itamarandiba, região Norte do Estado de Minas Gerais. A coleta do material foi realizada em março de 2015, nessa época o plantio possuía 3,75 anos, sendo o mesmo pertencente à empresa Aperam Bioenergia.

**Tabela 1.** Informações gerais sobre os materiais genéticos utilizados no estudo.

**Table 1.** General information about the genetic materials used in the study.

Clones	Cruzamentos	Idade (anos)
1	<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i>	3,75
2	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	3,75
3	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	3,75
4	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	3,75
5	<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i>	3,75
6	<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i>	3,75
7	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	3,75

### Amostragem e preparação do material

Foram selecionadas quatro árvores de cada clone com o objetivo de representar da melhor forma os clones do estudo. De cada árvore selecionada foi obtido um torete de aproximadamente 15 cm de comprimento, retirado a 1,3 m de altura do tronco (DAP).

Em condições de laboratório, os toretes foram serrados à espessura nominal de 2,5 cm de espessura. Foi obtido o pranchão central com 15 cm de comprimento e 2,5 cm espessura.

Após o desdobro, o pranchão central foi processado em amostras de madeira com dimensões de 2 x 2 x 4 cm, ficando com dimensões adequadas para serem carbonizadas em condição de laboratório em forno elétrico (mufla).

Para evitar a influência da posição radial de amostragem nas propriedades mecânicas do carvão vegetal, optou-se por escolher apenas os corpos de prova de madeira o mais distante possível da medula e que fossem livres de nós, furos ou qualquer outro defeito que pudessem afetar na resistência mecânica do carvão vegetal durante os ensaios de compressão paralela e perpendicular às fibras

### Carbonização

As carbonizações foram realizadas em forno elétrico adaptado dotado de sistema de recuperação de gases resultantes do processo de pirólise.

Neste trabalho foram usados quatro tratamentos térmicos nas carbonizações, ou seja, temperaturas finais de 350°C, 450°C, 550°C e 700°C, tendo sido carbonizada uma árvore de cada clone por temperatura. A taxa de aquecimento foi fixada em 0,5°C por minuto e o tempo à temperatura máxima foi de 30 minutos para todos os tratamentos térmicos adotados.

### Confecção dos corpos de prova de carvão vegetal

Os corpos de prova foram confeccionados com o auxílio de um cortador de azulejo elétrico com disco diamantado, cuja lâmina possui características adequadas para o corte de cerâmicas e pavimentos de argila.

Para facilitar o corte e garantir a segurança do operador, foi desenvolvido um aparato de madeira, que pode ser observado na Figura 1.



Fonte: Do autor (2016)

**Figura 1.** Imagens do aparato de madeira desenvolvido para facilitar o corte e do equipamento utilizado para confecção dos corpos de prova.

**Figure 1.** Images of the wooden apparatus designed to facilitate cutting and the equipment used for preparation of specimens.

Após a confecção dos corpos de prova de carvão vegetal, foram utilizadas lixas de madeira para ajustar as dimensões e remover defeitos superficiais.

Para realização deste trabalho foram confeccionados corpos de prova com dimensões de 1 cm x 1 cm x 2,5 cm (radial, tangencial e longitudinal), para os ensaios de compressão paralela e perpendicular às fibras do carvão vegetal.

Após confeccionados, os corpos de prova foram levados para sala de climatização, estabilizada a 20°C de temperatura e 60% de umidade, por um período de 20 dias, após esse período os corpos

dos de prova foram pesados diariamente até não apresentarem variação na massa, indicando que os corpos de prova estavam estabilizados a umidade do ambiente.

### Ensaio mecânicos do carvão vegetal

Os ensaios mecânicos foram realizados na Universidade Federal de Lavras – UFLA. Para realização dos testes utilizou-se uma máquina universal de ensaio, modelo EMIC DL 30000.

Devido à ausência de uma metodologia específica para direcionar a realização do trabalho, foram realizados ensaios preliminares para obter informações a respeito das particularidades do carvão vegetal.

Durante os ensaios utilizou-se célula de carga de 500 kg que se mostrou adequada para realização dos testes mecânicos. A velocidade de aplicação da carga foi fixada em 0,05mm/min e o ponto de interrupção do ensaio foi estipulado em 20% de perda de resistência do material.

Para o ensaio de compressão perpendicular às fibras do carvão vegetal a força foi aplicada no plano radial dos corpos de prova.

### Análise estatística

Para as propriedades mecânicas do carvão foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado disposto em um esquema fatorial com dois fatores (clone e temperatura) com três repetições. Para o efeito qualitativo (clone) foi usado o teste de Scott-Knott, em nível de 5% de probabilidade.

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio dos programas SISVAR 5.6 e SAEG 9.1.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Compressão paralela

Na Tabela 2 está apresentado o resumo da análise de variância para o módulo de elasticidade (MOE) e resistência (RC) para o ensaio de compressão paralela às fibras. Observa-se que o efeito da interação e temperatura foram significativos, enquanto que o efeito de clone foi não significativo para todas as características consideradas. Interação significativa indica existência de dependência entre os fatores. Diante disso, foi realizado o desdobramento da interação e avaliação do efeito de clone dentro de temperatura.

**Tabela 2.** Análise de variância para as propriedades mecânicas no ensaio de compressão paralela às fibras do carvão vegetal.

**Table 2.** Analysis of variance for the mechanical properties in parallel compression test the charcoal fibers.

FV	GL	Quadrado Médio	
		MOE	RC
Clone (C)	6	82325,3869 ns	41,3618 ns
Temperatura (T)	3	5335529,2353*	288,3505 *
C x T	18	234840,6674*	43,1173 *
Resíduo	56	75400,430534	21,1170
Total	83		
Média		1482,97	20,82
CV (%)		18,52	22,07

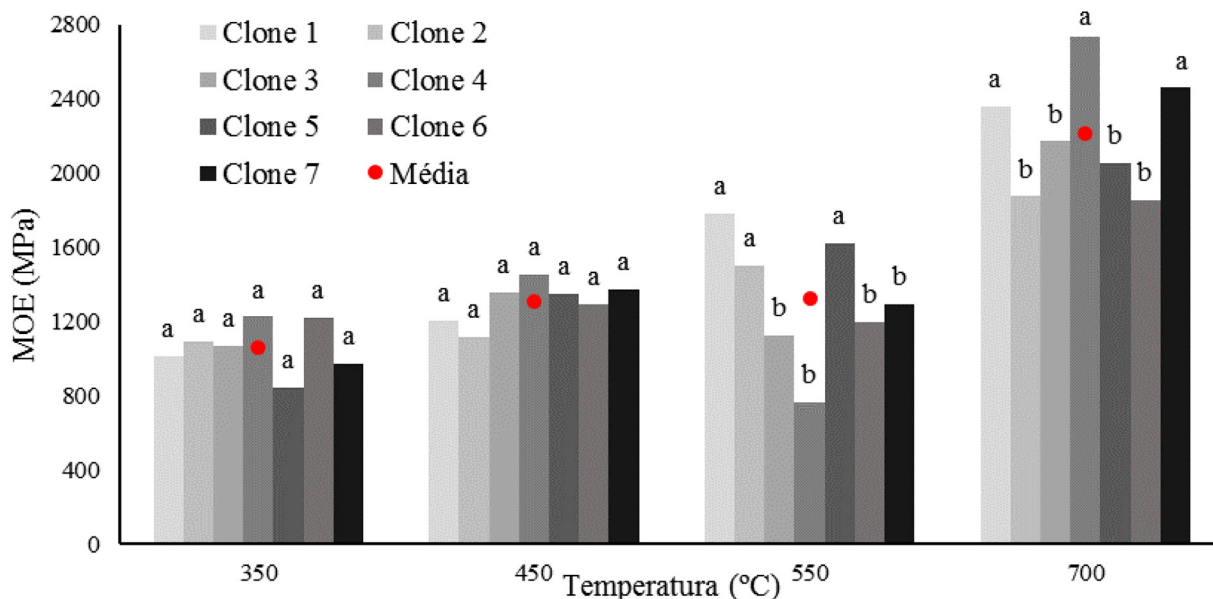
MOE: Módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras (MPa), RC: Resistência à compressão paralela às fibras do carvão vegetal (MPa). \* e ns: significativo e não significativo em nível de 5% de probabilidade.

A Figura 2 apresenta os valores médios e o teste de comparação múltipla para o desdobramento e avaliação do efeito de clone dentro das temperaturas finais de carbonização para o módulo de elasticidade do carvão vegetal.

Pela Figura 2, observa-se que para as temperaturas de 350°C e 450°C não houve diferença significativa entre os clones para o módulo de elasticidade. Para a temperatura de 550°C os clones 1, 2 e 5 foram os que apresentaram os maiores valores de módulo de elasticidade. Na temperatura de 700°C os clones 1, 4 e 7 foram os que apresentaram os maiores valores de módulo de elasticidade.

Foi possível observar tendência de aumento do módulo de elasticidade do carvão com elevação da temperatura de carbonização. De acordo com os resultados é possível perceber que o módulo de elasticidade foi afetado de forma significativa pela temperatura final de carbonização, tendo aumen-

to médio de 108,2% dentro da faixa de 350°C a 700°C. O maior aumento nos valores de módulo de elasticidade foi observado no clone 7, com 152,9% entre 350 e 700°C, enquanto que o clone 6 apresentou o de menor aumento, aproximadamente 51,4% na faixa de temperatura considerada.

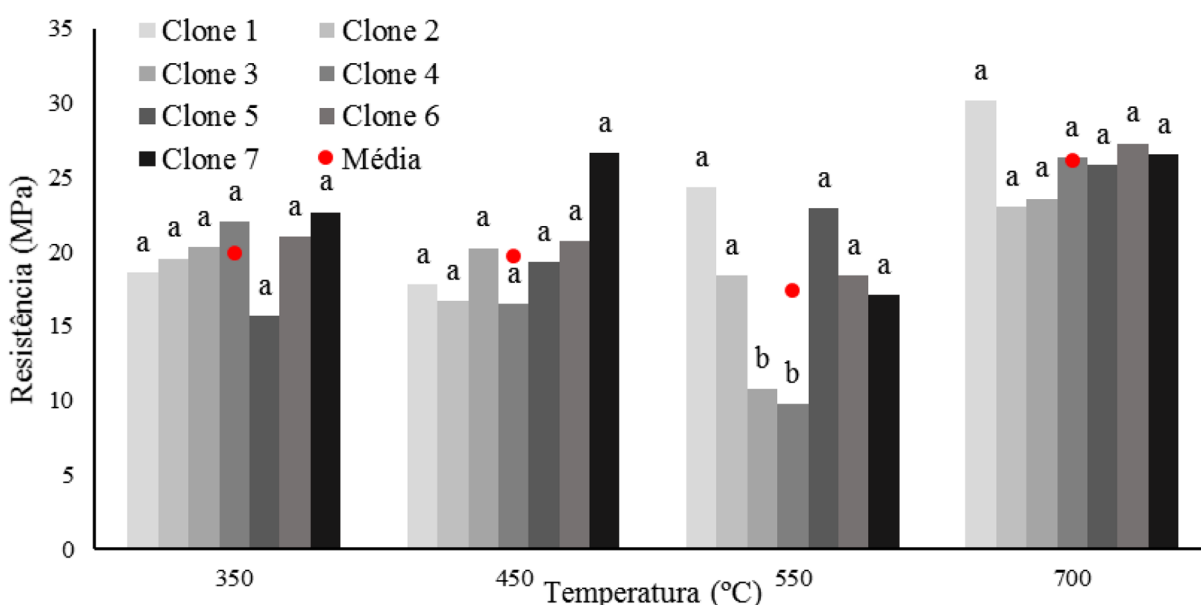


Valores médios seguidos de mesma letra, dentro das temperaturas, não diferem entre si pelo teste de comparação múltipla Scott-Knott a 5% de probabilidade.

**Figura 2.** Valores médios e teste de comparação múltipla para o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras do carvão vegetal dos clones de *Corymbia*.

**Figure 2.** Mean values and multiple comparison test for the modulus of compression parallel to the fibers of the charcoal *Corymbia* clones.

A Figura 3 apresenta os valores médios e o teste de comparação múltipla para o desdobramento e avaliação do efeito de clone dentro das temperaturas finais de carbonização para a resistência à compressão paralela às fibras do carvão vegetal.



Valores médios seguidos de mesma letra, dentro das temperaturas, não diferem entre si pelo teste de comparação múltipla Scott-Knott a 5% de probabilidade.

**Figura 3.** Valores médios e teste de comparação múltipla para a resistência à compressão paralela às fibras do carvão vegetal dos clones de *Corymbia*.

**Figure 3.** Mean values and multiple comparison test for resistance to compression parallel to the fibers of the charcoal *Corymbia* clones.

Pela Figura 3 observa-se que para as temperaturas de 350°C, 450°C e 700°C não houve diferença significativa entre os clones para a resistência à compressão paralela às fibras, enquanto que na temperatura de 550°C os clones 1, 2, 5, 6 e 7 foram os que mais se destacaram.

Para resistência à compressão em média ocorreu aumento de 30,8% entre 350°C e 700°C. O clone 5 foi o que apresentou o maior aumento 64,7%, enquanto que o clone 3 foi o que teve o menor aumento, aproximadamente 16,2%, dentro da faixa de temperatura citada acima.

Vieira (2009), avaliando as propriedades mecânicas do carvão vegetal de dois clones de *Eucalyptus* sp. produzidos em temperaturas de 350, 450, 550 e 900°C, observou valores máximo de módulo de elasticidade de 538, 571, 699 e 1026 MPa, respectivamente. Para a resistência à compressão foi de 8 MPa para temperatura de 350°C, 142 MPa a 450°C, 148 MPa a 550°C e 270 MPa a temperatura de 900°C.

De forma similar Assis (2016) também observou o aumento das propriedades mecânicas do carvão com o acréscimo da temperatura final de carbonização. A autora trabalhou com um clone híbrido de *Eucalyptus urophylla* carbonizado a 550°C e 900°C e encontrou valores médios de 1247 MPa e 3794 MPa, respectivamente, para o módulo de elasticidade. O comportamento de aumento das propriedades mecânicas do carvão em temperatura elevada de carbonização também foi citado por Cetec (1982), Moore et al. (1974) e Kumar et al (1999).

A redução na resistência mecânica do carvão vegetal em temperaturas de 450 e 550°C pode estar relacionada à saída dos gases voláteis do interior da peça durante a carbonização. Segundo Mendes et al. (1982), o decréscimo das propriedades mecânicas do carvão vegetal também está relacionado à perda de massa que o carvão sofre nessa faixa de temperatura. Ainda de acordo com os autores, as contrações que ocorrem no carvão não são significativas, permanecendo o número de fibras por unidade de área constante. Este fato, associado ao aumento da porosidade do carvão, que ocorre devido ao processo de volatilização dos componentes do lenho, pode ser a causa da perda da resistência mecânica do carvão até temperaturas próximas a 500°C.

O aumento das características mecânicas observadas na temperatura de 700°C estão de acordo com resultados obtidos por Cetec (1982), Moore et al. (1974) e Vieira (2009).

De acordo com Blankenhorn et al. (1972), Ferrari e Rezende (1998), Moore et al. (1974), Oliveira et al. (1982), Slocum et al. (1978) o aumento de resistência a partir de 500 °C pode estar relacionado a fatores como a redução na liberação de voláteis, associado à modificação da quantidade, tamanho e forma da porosidade existente no material, redução dimensional associada a menor perda de massa, que resulta em acréscimo da densidade relativa aparente e aumento do número de fibras por unidade de área. Essas alterações acompanhadas de um possível rearranjo estrutural dos constituintes do carvão vegetal, principalmente do carbono que originam novas estruturas mais resistentes, produzidas em elevadas temperaturas de carbonização da madeira.

Assis et al. (2016), Blankenhorn et al. (1972), Couto et al. (2015) e Vieira (2009), mencionam que a degradação térmica da lignina é similar ao processo de formação do carbono vítreo a partir de resinas fenólicas. Sendo que em temperaturas inferiores a 500°C, a lignina sofre desidratação, mas com o aumento da temperatura ocorre a formação de diversos compostos aromáticos ricos em carbono derivados deste componente do lenho. Segundo Somerville e Jahanshahi (2015), materiais que apresentam constituição básica de carbono, possuem características de se ligarem entre si, podendo assumir diferentes combinações, adquirindo propriedades físicas, químicas e mecânicas distintas mediante a alteração do processo de obtenção e da matéria-prima.

De acordo com Couto et al. (2015) alguns autores citam ainda que em elevadas temperaturas de carbonização ocorre uma reestruturação dos átomos de carbono, fazendo com que os mesmos se reorganizem em estrutura semelhante às grafíticas. Ainda segundo os autores, trabalhos desenvolvidos por Mendes et al. (1982) citam que, em temperaturas mais altas, o grau de organização e de ligações entre as cadeias carbônicas é maior.

É importante ressaltar que foram observados baixos valores de resistência mecânica para as temperaturas de 450°C e 550°C, que são temperaturas finais usualmente utilizadas para produção de carvão vegetal.

### **Compressão perpendicular as fibras**

Na Tabela 3 está apresentado o resumo da análise de variância para o módulo de elasticidade

(MOEp) e resistência (RCp) do carvão para o ensaio de compressão perpendicular às fibras. Observa-se que para o módulo de elasticidade os efeitos de clone e temperatura foram significativos e para resistência os efeitos de temperatura e interação foram significativos. Interação significativa indica a existência de dependência entre os fatores, dessa forma foi realizado o desdobramento da interação e avaliação do efeito de clone dentro de temperatura.

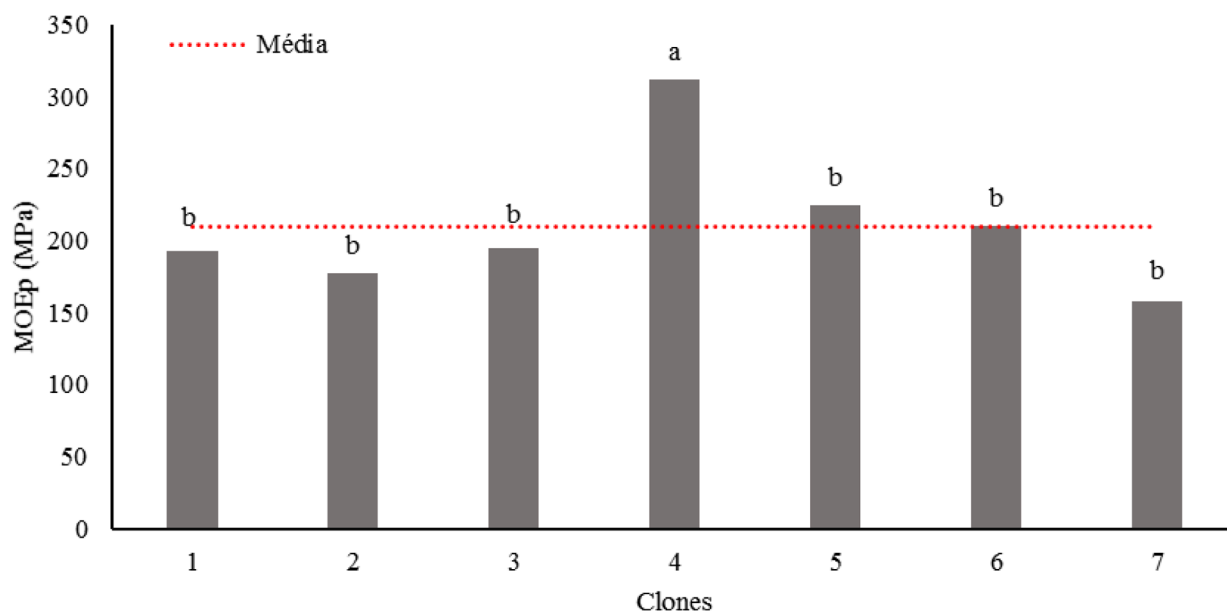
**Tabela 3.** Análise de variância para as propriedades mecânicas do carvão no ensaio de compressão perpendicular às fibras do carvão vegetal.

**Table 3.** Analysis of variance on the mechanical properties perpendicular to the compression test charcoal fibers.

FV	GL	Quadrado Médio	
		MOEp	RCp
Clone (C)	6	29702,0618*	1,9447ns
Temperatura (T)	3	189448,7077*	16,0082*
C x T	18	8565,1170ns	2,6161*
Resíduo	56	12494,2318	1,1291
Total	83		
Média		209,85	3,39
CV (%)		53,27	31,29

MOEp: Módulo de elasticidade à compressão perpendicular às fibras (MPa), RCp: Resistência a compressão perpendicular às fibras do carvão vegetal (MPa). \* e ns: significativo e não significativo em nível de 5% de probabilidade.

A Figura 4 apresenta os valores da média de módulo de elasticidade dos clones de *Corymbia*. Observou-se que o clone 4 foi o único que apresentou a maior média nos valores de módulo de elasticidade à compressão perpendicular às fibras, diferenciando estatisticamente dos demais clones.



Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

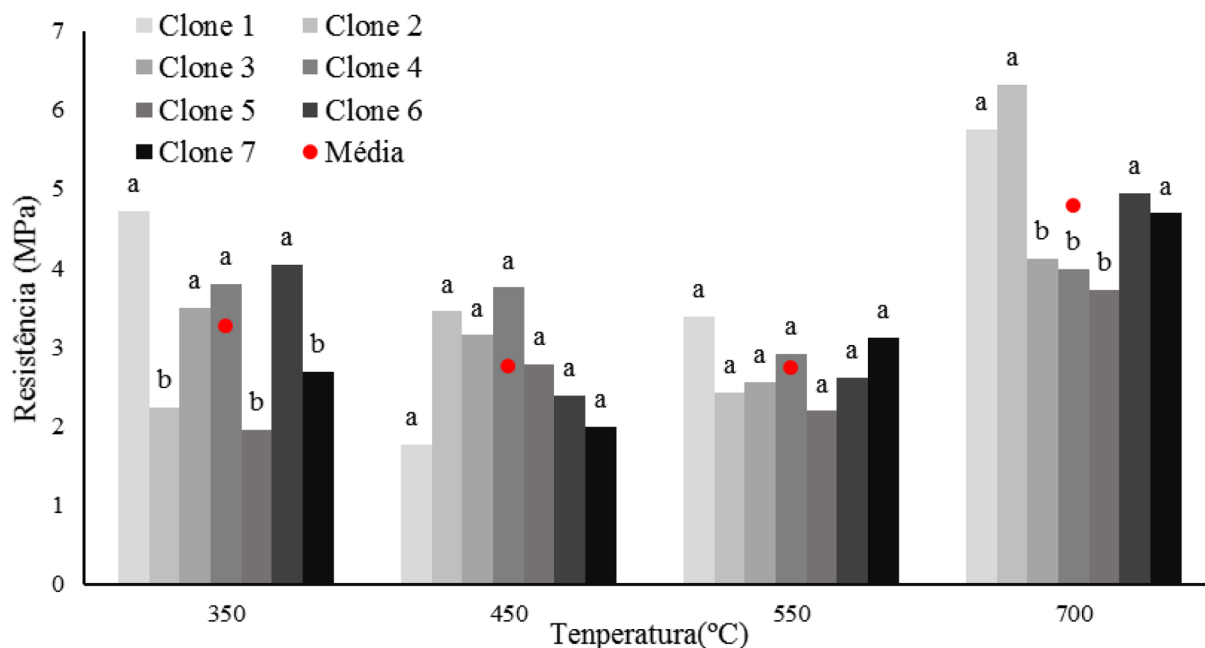
**Figura 4.** Valores médios e teste de média do módulo de elasticidade à compressão perpendicular às fibras do carvão vegetal dos clones de *Corymbia*.

**Figure 4.** Mean values and means of the test modulus of compression perpendicular to the fibers of the charcoal *Corymbia* clones.

A Figura 5 apresenta os valores médios e o teste de comparação múltipla para o desdobramento e avaliação do efeito de clone dentro das temperaturas finais de carbonização para a resistência à compressão perpendicular às fibras do carvão vegetal.

Pela Figura 5 observa-se que para temperatura de 350°C os clones 1, 3, 4 e 6 foram os que apresentaram os maiores valores médios de resistência, enquanto que para os clones 2, 5 e 7 os menores valores médios.

Nas temperaturas de 450°C e 550°C não foi observada diferença significativa entre os valores médios de resistência para os clones avaliados.



Valores médios seguidos de mesma letra, dentro das temperaturas, não diferem entre si pelo teste de comparação múltipla Scott-Knott a 5% de probabilidade.

**Figura 5.** Valores médios e teste de comparação múltipla para a resistência à compressão perpendicular às fibras do carvão vegetal dos clones de *Corymbia*.

**Figure 5.** Mean values and multiple comparison test for resistance to compression perpendicular to the fibers of the charcoal *Corymbia* clones.

Para 700°C os clones 1, 2, 6 e 7 apresentaram os maiores valores médios de resistência.

Na Figura 5 pode-se verificar que independente do clone avaliado, comportamento de aumento dos valores das propriedades mecânicas do carvão vegetal na temperatura de 700°C, os valores médios de resistência à compressão perpendicular às fibras tiveram aumento 46,5% entre a temperatura de 350°C e 700°C.

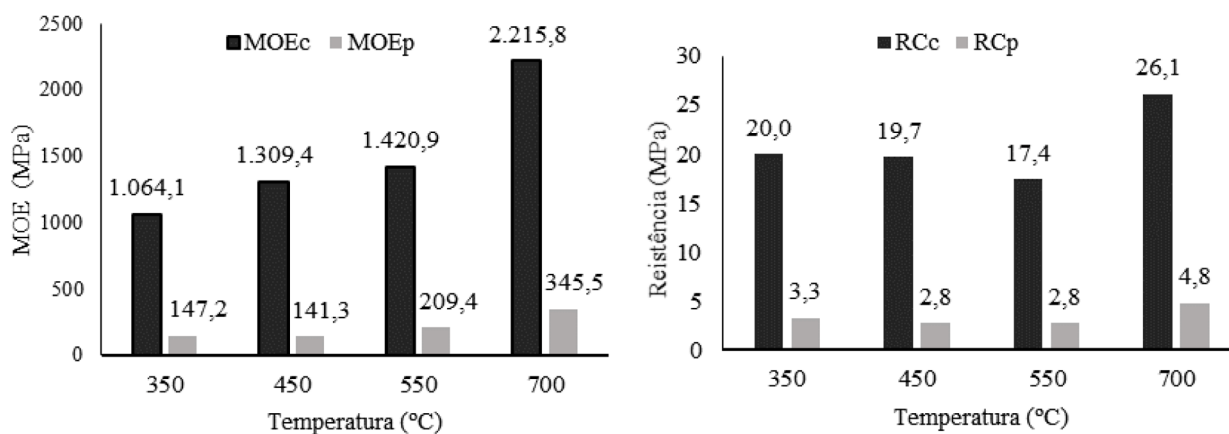
Assis (2016), estudando o comportamento mecânico do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus urophylla*, também observou o aumento do módulo de elasticidade com o incremento da temperatura de carbonização. A autora trabalhou com duas temperaturas de carbonização 500°C e 900°C e encontrou valores médios de 1,5 MPa e 3,8 MPa, respectivamente, para a resistência, valores esses inferiores às médias encontradas neste trabalho. Entretanto, as metodologias utilizadas neste trabalho e as de Assis (2016) não são as mesmas, o que pode ter contribuído para essas diferenças nos resultados do ensaio. Esse fato reforça a importância do desenvolvimento de metodologia específica e estabelece uma normativa para direcionar/orientar estudos futuros.

De forma similar ao observado para a compressão paralela, a melhoria das propriedades mecânicas do carvão na temperatura de 700°C pode estar relacionada ao aumento da densidade do carvão vegetal. O acréscimo da densidade resulta em melhora significativa nas características do carvão vegetal conforme constatado por Assis (2016), Couto et al. (2015) e Kumar et al. (1999).

Essa característica associada ao rearranjo molecular do carvão, com as alterações na estrutura carbônica, assim como outras modificações já discutidas anteriormente, são as possíveis causas do aumento da elasticidade e resistência observados para resultados obtidos nos ensaios de compressão perpendicular às fibras.

É possível observar que os maiores valores médios de módulo de elasticidade e resistência ocorreram na temperatura de 700°C, comportamento semelhante ao observado para o ensaio de compressão paralela às fibras (FIGURA 6). No entanto, as magnitudes dos valores obtidos para compressão perpendicular foram inferiores aos observados nos ensaios de compressão paralela.

Para temperatura de 350°C foi observado que o módulo de elasticidade foi em média 7,2 vezes menor no ensaio de compressão perpendicular às fibras, enquanto que para resistência verificou-se redução de 6,1 vezes nos valores.



MOEc: Módulo de elasticidade à compressão paralela; MOEp: Módulo de elasticidade à compressão perpendicular; RCc: Resistência à compressão paralela; RCp: Resistência à compressão perpendicular.

**Figura 6.** Valores de módulo de elasticidade e resistência para a compressão paralela e perpendicular as fibras.  
**Figure 6.** Values of modulus and resistance to compression parallel and perpendicular to the fibers.

Os ensaios realizados a 450°C foram os que apresentaram a maior discrepância entre as propriedades do carvão vegetal avaliadas nos testes de compressão. Nesta temperatura foi observado que o módulo de elasticidade à compressão perpendicular foi 9,3 vezes menor que os valores encontrados para a compressão paralela às fibras, enquanto que a resistência apresentou redução de 7,1 vezes.

Entretanto, com o aumento da temperatura de carbonização observou-se que a diferença entre a magnitude dos valores de elasticidade e resistência obtidos nos ensaios de compressão paralela e perpendicular tendem a reduzir.

Para temperatura de 550°C o módulo de elasticidade foi 6,9 vezes menor, enquanto que a resistência foi 6,3 vezes menor para a compressão perpendicular. A 700°C a magnitude dos valores foi 6,4 vezes menor para o módulo de elasticidade e 5,5 vezes menor para a resistência à compressão perpendicular às fibras do carvão vegetal.

Essa diferença nos valores está associada ao arranjo estrutural e distribuição dos elementos anatómicos do carvão. Uma vez que as fibras do carvão vegetal estão dispostas verticalmente, é esperado que a resistência à compressão paralela seja superior à compressão perpendicular às fibras. A variação entre os valores das propriedades mecânicas em função do plano no qual é aplicada a força de compressão é similar ao observado para madeira; entretanto, a magnitude dessa diferença é maior para o carvão vegetal. Porém, como observado, a partir de 550°C a discrepância entre os resultados da compressão paralela e perpendicular tende a reduzir.

## CONCLUSÕES

O módulo de elasticidade e a resistência à compressão paralela e perpendicular às fibras apresentaram tendência de aumento entre as temperaturas de 350°C e 700°C.

A magnitude dos valores de módulo de elasticidade e resistência no ensaio de compressão perpendicular foi menor que aqueles observados na compressão paralela às fibras, sendo que essa diferença tendeu a reduzir a partir de 550°C.

Nas temperaturas de 450°C e 550°C, que são temperaturas usualmente utilizadas para produção de carvão vegetal, foram observados valores baixos de resistência e elasticidade do carvão vegetal.

## AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos ao CNPq, CAPES e Fapemig pelo auxílio financeiro e a empresa Aperam Bioenergia pela doação das madeiras utilizadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSIS, M. R. **Study of the variability of mechanical and physical properties of charcoal obtained under different pyrolysis conditions**. 2016. 158 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.
- ASSIS, M. R.; BRANCHIAU, L. A.; NAPOLI, A.; TRUGILHO, P. F. Factors affecting the mechanics of carbonized wood: literature review. **Wood Science and Technology**, New York, v. 1, n. 3, p. 1-18, 2016.
- ASSIS, P. S.; BRAGA, R. N. B. Análise das limitações da capacidade de altos-fornos e carvão vegetal. In: SEMINÁRIO DA COMISSÃO DE TECNOLOGIA DO INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA, 1977, Rio de Janeiro. **Anais...** Timóteo: ACESITA, 1977. p. 37-46.
- BLANKENHORN, P. R.; JENKINS, G. M.; KLINE, D. E. Dynamic mechanical properties and microstructure of some carbonized hardwoods. **Wood and Fiber**, Lawrence, v. 4, n. 3, p. 212-224, 1972.
- BRITO, J. O. **Reflexões sobre a qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico**. Circular Técnica IPEE, Piracicaba, 1993. 6 p.
- CGEE - CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Mapeamento de ações institucionais para sustentabilidade da produção de ferro-gusa a partir de carvão vegetal**. Brasília: CGEE, 2014. 26 p.
- COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; LIMA, J. T.; SILVA, J. R. M.; PROTÁSSIO, T. P. Qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus* e *Corymbia* produzido em diferentes temperaturas finais de carbonização. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 108, p. 817-831, 2015.
- CETEC - FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Produção e Utilização de Carvão Vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. 393 p.
- FERRARI, P. E.; REZENDE, M. C. Carbono polimérico: processamento e aplicação. **Polímeros**, São Carlos, v. 8, n. 4, dez. 1998.
- IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Anuário estatístico da IBÁ: ano base 2014**. Brasília: IBÁ, 2015. 80 p.
- IAB - INSTITUTO DO AÇO BRASIL. **Anuário estatístico do IAB: ano base 2014**. Rio de Janeiro: IBÁ, 2015. 94 p.
- KUMAR, M.; GUPTA, R. Scanning electron microscopic study of acacia and eucalyptus wood chars. **Journal of Materials Science**, Norwell, v. 30, n. 2, p. 544-551, 1995.
- KUMAR, M.; VERMA, B. B.; GUPTA, R. C. Mechanical properties of *Acacia* and *Eucalyptus* wood chars. **Energy Sources**, New York, v. 21, n. 8, p. 675-685, 1999.
- MENDES, M. G.; GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. Propriedades e controle da qualidade do carvão vegetal. In: CETEC. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. p. 77-89.
- MOORE, G. R.; BLANKENHORN, P. R.; BEALL, F. C.; KLINE, D. E. Some physical properties of birch carbonized in a nitrogen atmosphere. **Wood and Fiber**, Madison, v. 6, n. 3, p. 193-199, 1974.
- OLIVEIRA, J. B.; GOMES, P. A.; ALMEIDA, M. R. Caracterização do processo de fabricação de carvão em fornos de alvenaria. In: PENEDO, W. R. (Ed.). **Carvão vegetal: destilação, carvoejamento, propriedades, controle de qualidade**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. p. 63-102.

PROTÁSIO, T. P.; GOULART, S. L.; NEVES, T. A.; TRUGILHO, P. F.; RAMALHO, F. M. G.; QUEIROZ, L. R. S. B. Qualidade da madeira e do carvão vegetal oriundos de floresta plantada em Minas Gerais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 34, n. 78, p. 111-123, 2014.

SLOCUM, D. H.; MCGINNES JÚNIOR, E. A.; BEALL, F. C. Charcoal yield, shrinkage, and density changes during carbonization of oak and hickory woods. **Wood Science**, Madison, v. 11, n. 1, p. 42-47, 1978.

SOMERVILLE, M.; JAHANSHAHI, S. The effect of temperature and compression during pyrolysis on the density of charcoal made from Australian eucalypt wood. **Renewable Energy**, Kidlington, v. 80, n. 8, p. 471-478, 2015.

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 Agraria**, Curitiba, v. 2, n. 1/2, p. 45-53, 2001.

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

Recebido em 29/08/2016

Aceito para publicação em 27/06/2017

