

Efeito da temperatura de carbonização e dos
resíduos de macaúba na produção de carvão vegetalEffect of carbonization temperature and the
macaúba residues in the production of charcoalMariana Almeida Vilas Boas¹, Angélica de Cássia Oliveira Carneiro²,
Benedito Rocha Vital³, Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho⁴ e Marcio Arêdes Martins⁵**Resumo**

O uso da biomassa como insumo para a geração de energia é uma importante alternativa, tendo em vista que se trata de uma fonte renovável. A macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex *Martius*) é uma palmácea com grande potencial na produção de óleo, contudo a extração do óleo gera grandes quantidades de biomassa residual, que pode ter usos energéticos. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da temperatura de carbonização e dos resíduos (caroço e endocarpo) da macaúba na produção de carvão vegetal. As carbonizações foram realizadas em um forno elétrico (mufla), usando as temperaturas finais de carbonização de 450, 550 e 650°C. Determinou-se o rendimento, as propriedades físicas e químicas do carvão vegetal, seguindo as normas ABNT. Observou-se que o rendimento gravimétrico em carvão vegetal foi reduzido com o aumento da temperatura de carbonização. Observou-se os maiores teores de carbono fixo para o carvão vegetal do endocarpo de macaúba. Houve uma redução significativa dos valores médios do teor de matérias voláteis com o aumento do tempo e temperatura de carbonização. Conclui-se que o carvão vegetal produzido com o endocarpo de macaúba apresentou potencial para fins energéticos.

Palavras-Chave: carvão, macaúba, endocarpo, caroço

Abstract

The use of biomass as raw material for power generation is an important alternative, considering that it is a renewable source. Macauba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. Ex *Martius*) is a palm with great potential for oil production. However oil extraction generates large amounts of residual biomass, which could be used for energy. The objective of this study was to evaluate the effect of carbonization temperature and the Macauba residues (seed and endocarp) in charcoal production. Carbonizations were carried out in an electric oven (furnace) using final temperatures of 450, 550 and 650° C. Charcoal yield, physical and chemical properties were determined according to ABNT standards. It was observed that gravimetric charcoal yield decreased with increasing carbonization temperature. It was also observed that the highest levels of fixed carbon were obtained on the endocarp charcoal. There was a significant reduction of the average volatile matter content with increasing time and temperature of carbonization. It is concluded that the charcoal produced from macaúba endocarp has a potential for energy purposes.

Keywords: charcoal, macauba, endocarp, seed

INTRODUÇÃO

Atualmente tem se uma preocupação no que diz respeito ao uso de energia no Brasil. Os combustíveis fósseis ainda são as principais matérias primas para a produção e consumo de energia. O uso destes combustíveis além de gerar emis-

sões de gases do efeito estufa na atmosfera, estes não são renováveis. Frente à demanda por essa energia surgem várias proposições para a utilização de novas e renováveis fontes energéticas. A biomassa florestal tem despertado interesse para fins energéticos, devido a seu grande potencial de aproveitamento.

¹Engenheira Florestal – Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa - Viçosa, MG – 36571-000 – E-mail: vilasboas.mariana@yahoo.com.br

²Professora Adjunto do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa - Viçosa, MG – 36571-000 – E-mail: cassiacarneiro@ufv.br

³Professor Titular do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa - Viçosa, MG – 36571-000 – E-mail: bvital@ufv.br

⁴Professora Adjunto do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa - Viçosa, MG – 36571-000 – E-mail: ana.marcia@ufv.br

⁵Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa - Viçosa, MG – 36571-000 – E-mail: aredes@ufv.br

O investimento na produção de energia de biomassa em larga escala, entretanto, além de diminuir a evasão de divisas, contrapondo à importação de combustível fóssil, propicia o fortalecimento do mercado interno (WANDECK e JUSTO, 1988).

Dentre as diversas palmeiras, a macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Martius) é uma palmácea adaptada a regiões semi-áridas. A espécie pertence à família Arecaceae, nativa de florestas tropicais, tipicamente brasileiras, sendo uma cultura tolerante à seca e às baixas temperaturas, e com ampla distribuição geográfica. No Brasil ocorre principalmente em Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. (LORENZI, 1992).

Atualmente, ainda há poucos estudos ligados ao desenvolvimento de tecnologias para o cultivo da macaúba e sua exploração ocorre de forma extrativista em populações nativas (MOTTA *et al.*, 2002). Esta espécie apresenta ampla utilidade e mais recentemente seu fruto tem despertado grande interesse sócio-econômico por sua capacidade de produção de óleo vegetal. Em meio a suas várias utilidades são relatados usos medicinais, alimentícios, cosméticos, entre outros (SILVA *et al.*, 1986).

TENÓRIO (1982) afirma que o endocarpo das palmáceas é um tecido rico em feixes vasculares, fibra e parênquima de enchimento. É um tecido lignificado, extremamente duro, apresentando uma estrutura de grã fina e grande aptidão para ser convertido em carvão.

Além do potencial da macaúba como produtora de óleo para biodiesel, seu endocarpo pode ser utilizado para a produção de carvão vegetal. A produção de carvão a partir do endocarpo de macaúba seria um subproduto do cultivo da palmeira para geração de biodiesel. Em trabalho realizado por SILVA *et al.* (1986), verificou-se que o carvão do endocarpo das palmáceas, como a macaúba, pode ter uso em operações metalúrgicas e siderúrgicas, e para uso doméstico.

O Brasil se destaca no cenário mundial como o maior produtor e consumidor mundial de carvão vegetal. É o único país no mundo onde o carvão vegetal tem uma aplicação industrial em grande escala. Aproximadamente, 40% do ferro gusa e das ligas metálicas produzidas no país utilizam o carvão vegetal como combustível e redutor (BARCELLOS, 2007). Em 2007, o país produziu aproximadamente 10 milhões de toneladas (BRASIL, 2008), tendo crescido 4% em relação a 2006. Cerca de 90% do carvão produzido é utilizado no setor industrial, principalmente siderúrgico (PINHEIRO *et al.* 2006). Destacando-se o Estado de Minas Gerais como o maior produtor e consumidor de carvão vege-

tal do país, em razão de seu parque siderúrgico, responsável pelo consumo, em 2007, de 60% da demanda nacional, que corresponde a 22 milhões de metros de carvão (AMS, 2008).

O carvão vegetal é utilizado na siderurgia como insumo termorreduzidor no processo de produção de ferro-gusa, aço e ferro-ligas. O carvão vegetal representa uma excelente matéria prima para a siderurgia brasileira, devido ao seu comportamento como combustível e redutor, elevado grau de pureza e baixo custo de produção, quando comparado com o carvão mineral ou outros elementos termorreduzidores (MACHADO e ANDRADE. 2004).

A carbonização da madeira é um processo conhecido há pelo menos 10.000 anos, evoluindo muito pouco durante todo este tempo (PINHEIRO *et al.*, 2006). A carbonização é um processo onde a madeira é aquecida numa atmosfera redutora controlada (ALMEIDA e REZENDE, 1982). O principal produto da carbonização é o carvão vegetal cuja qualidade depende basicamente de características físico-químicas da matéria-prima e do processo de carbonização (BARCELLOS, 2007).

A macaúba apresenta grande potencial na produção de óleo, e a sua extração resulta na geração de grandes quantidades de biomassa residual.

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo principal avaliar o efeito da temperatura de carbonização na produção de carvão vegetal de caroço e endocarpo de macaúba.

MATERIAL E MÉTODOS

Material utilizado e o processo de carbonização

Utilizou-se resíduos de macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Martius) proveniente de um povoamento natural, do município de Florestal (CEDAF) – MG, de idade desconhecida. Caracterizou-se como resíduos o endocarpo e o caroço (endocarpo + amêndoa).

As carbonizações foram realizadas em mufla de laboratório com aquecimento elétrico (Figura 1), utilizando-se cerca de 500 g de amostras de endocarpos e caroços, carbonizados separadamente, os quais foram inseridos em um container metálico com dimensões nominais de 30 cm de comprimento e 12 cm de diâmetro. As temperaturas finais de carbonização foram de 450, 550 e 650 °C com as respectivas taxas de aquecimento 0,94 °C/min, 1,02 °C/min e 1,08 °C/min.

A Tabela 1 apresenta as marchas de carbonizações utilizadas para a produção do carvão vegetal, em função do tempo e temperatura.

Tabela 1. Marcha de carbonização em função do tempo e temperatura de carbonização.

Table 1. March of carbonization in relation to carbonization time and temperature.

Marcha	Temperatura								
	150°C	200°C	250°C	300°C	350°C	400°C	450°C	550°C	650°C
1	1hora	1hora	1hora	1hora	1hora	2horas	1hora	-	-
2	1hora	1hora	1hora	1hora	1hora	2horas	1hora	1hora	-
3	1hora	1hora	1hora	1hora	1hora	2horas	1hora	1hora	1hora

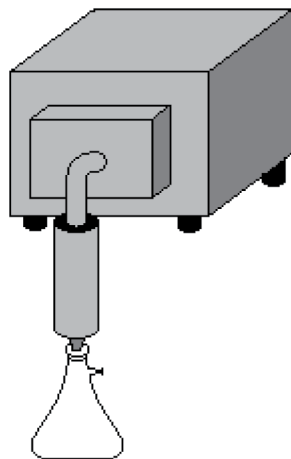


Figura 1. Esquema do forno elétrico (mufla) utilizado nas carbonizações.

Figure 1. Diagram of the muffle furnace used for carbonization.

Após as carbonizações foi determinado, com base na massa seca dos materiais, o rendimento gravimétrico em carvão vegetal.

Propriedades do carvão vegetal

Análise química imediata

A composição química imediata do carvão vegetal foi obtida em amostras moídas e peneiradas a uma granulometria de, aproximadamente, 0,2 mm, seguindo os procedimentos preconizados nas normas ABNT NBR 6923 (ABNT, 1981) e ABNT NBR 8112 (ABNT, 1986), com determinação dos teores de matérias voláteis, cinzas e carbono fixo, em base seca.

Densidade relativa aparente

A densidade relativa aparente do carvão vegetal, como também dos resíduos de macaúba, foi determinada de acordo com o método proposto por Vital (1984), utilizando-se uma balança hidrostática para a determinação do volume deslocado. Para tanto, amostras de aproximadamente 2 g de carvão foram pesadas para a obtenção da massa e, posteriormente, imersas em mercúrio para determinação do volume deslocado.

Determinação do poder calorífico superior

O poder calorífico superior do carvão, como também dos resíduos de macaúba, foram de-

terminados de acordo com a metodologia descrita pela norma da ABNT NBR 8633 (ABNT 1984), utilizando-se uma bomba calorimétrica adiabática.

Umidade de equilíbrio higroscópico

A umidade de equilíbrio higroscópico do carvão foi determinada depois que os mesmos foram climatizados em câmara climática a temperatura de 20°C e 65% de umidade relativa, até atingir a massa constante.

Delineamento estatístico do experimento

Para determinar o efeito da temperatura final de carbonização no caroço e endocarpo de macaúba no rendimento gravimétrico e nas propriedades do carvão foi instalado um experimento, seguindo um fatorial completo, com três temperaturas finais de carbonização (450, 550 e 650°C) e dois resíduos do coco (endocarpo e caroço), totalizando 6 tratamentos, com 6 repetições por tratamento. Os resultados foram interpretados com auxílio de análise de variância (ANOVA) e quando observadas diferenças significativas, os tratamentos foram comparados entre si por meio do teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios da densidade aparente e do poder calorífico superior do endocarpo e do caroço, não carbonizados, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores médios da densidade aparente e o poder calorífico do endocarpo e caroço não carbonizados.

Table 2. Average values of apparent density and heating value of non carbonized endocarp and seed.

Tipo de resíduo	Densidade aparente (g/cm ³)	Poder calorífico superior (kcal/kg)
Caroço (amêndoa + endocarpo)	1,07 B	4840,01 B
Endocarpo	1,29 A	5152,36 A

* Médias ao longo da coluna seguidas das mesmas letras maiúsculas não diferem entre si significativamente pelo teste Tukey a 95% de probabilidade.

A análise de variância indicou que a densidade aparente e o poder calorífico superior dos resíduos de macaúba apresentaram diferenças significativas entre o endocarpo e o caroço.

Observa-se que o endocarpo possui uma maior densidade e um maior poder calorífico superior, quando comparado com o caroço, isto se deve ao maior volume vazio ocupado pela parte interna do caroço. De modo geral, quanto maior a densidade do material, maior será a densidade do carvão que é uma variável importante, uma vez que quanto maior a densidade menor será o espaço ocupado pelo redutor dentro do alto forno, maximizando a produtividade. Os valores elevados de densidade para o endocarpo da macaúba estão de acordo com os observados por Silva *et al.* (1986) ao avaliarem endocarpos de babaçu e de macaúba para a produção de carvão vegetal.

Silva (2001) cita faixas de valores de densidade básica para a madeira de eucalipto e ressalta variação entre 0,4 e 1,2 g/cm³, sendo indicada como faixa ideal para produção de carvão à que-las que apresentam densidades mais elevadas.

O poder calorífico superior do endocarpo, provavelmente, foi maior devido a maior concentração de material rico em carbono, presente no mesmo, conforme citado por Tenório (1982), onde afirma que o endocarpo é um tecido lignificado. A presença de óleo no endocarpo pode, também, ter contribuído para o maior poder calorífico.

Vale *et al.* (2001) encontraram valor médio para o poder calorífico superior da madeira de *Eucalyptus grandis* igual a 4.641 kcal/kg. Já para Brito (1993) valor para folhosas tropicais está entre 3.500 a 5.000 kcal/kg.

Na Tabela 3 são apresentados os valores médios da densidade aparente do carvão vegetal em função da temperatura de carbonização.

Tabela 3. Valores médios da densidade aparente do carvão vegetal em função da temperatura de carbonização.

Table 3. Charcoal apparent density mean values related to carbonization temperature.

Temperatura de carbonização (°C)	Densidade aparente (g/cm ³)
450°C	0,87 B
550°C	0,97 A
650°C	0,88 B

* Médias ao longo da coluna seguidas das mesmas letras maiúsculas não diferem entre si significativamente pelo teste Tukey a 95% de probabilidade.

Verificou-se diferença significativa da densidade aparente do carvão vegetal produzido na temperatura de 550°C em relação às demais

temperaturas. Não houve diferença significativa entre as densidades dos carvões produzidos a 450 °C e 650°C. A menor densidade aparente foi obtida com a carbonização na temperatura de 450°C, havendo um aumento quando se passou para a temperatura de 550°C. Observou-se, ainda, um decréscimo na densidade aparente com o aumento do tempo e da temperatura de carbonização (650°C). Pode-se justificar essa redução devido a maior exposição do endocarpo e do caroço a elevadas temperaturas e maior taxa de aquecimento, ocorrendo assim alterações na estrutura do carvão pela eliminação dos voláteis.

A Tabela 4 apresenta os valores médios da densidade aparente do carvão vegetal em função do tipo de resíduo.

A análise de variância mostrou que há diferença significativa para a densidade aparente do carvão entre os resíduos de macaúba avaliados.

Tabela 4. Valores médios da densidade aparente do carvão vegetal em função do tipo de resíduo.

Table 4. Mean values of charcoal apparent density in relation to the residue type.

Tipo de resíduo	Densidade aparente (g/cm ³)
Caroço (amêndoa + endocarpo)	0,83 B
Endocarpo	0,97 A

* Médias ao longo da coluna seguidas das mesmas letras maiúsculas não diferem entre si significativamente pelo teste Tukey a 95% de probabilidade.

A densidade aparente do carvão foi significativamente maior para o carvão produzido com o endocarpo. Como era de se esperar a densidade aparente dos carvões foram influenciadas pela densidade das matérias-primas. Baer Filho (2008) encontrou valores médios da densidade do endocarpo de macaúba e a densidade aparente do carvão vegetal de 1,28g/cm³ e 0,91g/cm³, respectivamente, sendo valores muito próximos aos encontrados nas Tabelas 2 e 4.

Silva *et al.* (1986) encontraram valores médios para densidade aparente do carvão do endocarpo de macaúba variando entre 0,88 e 0,94g/cm³, sendo valores próximos aos observados no presente trabalho.

A Figura 2 mostra os valores médios da densidade aparente do carvão em função do tipo de resíduo e temperatura de carbonização.

A análise de variância indicou que a densidade aparente do carvão vegetal foi afetada isoladamente pelos tratamentos, ocorrendo, também, interações significativas entre o tipo de resíduo e a temperatura de carbonização.

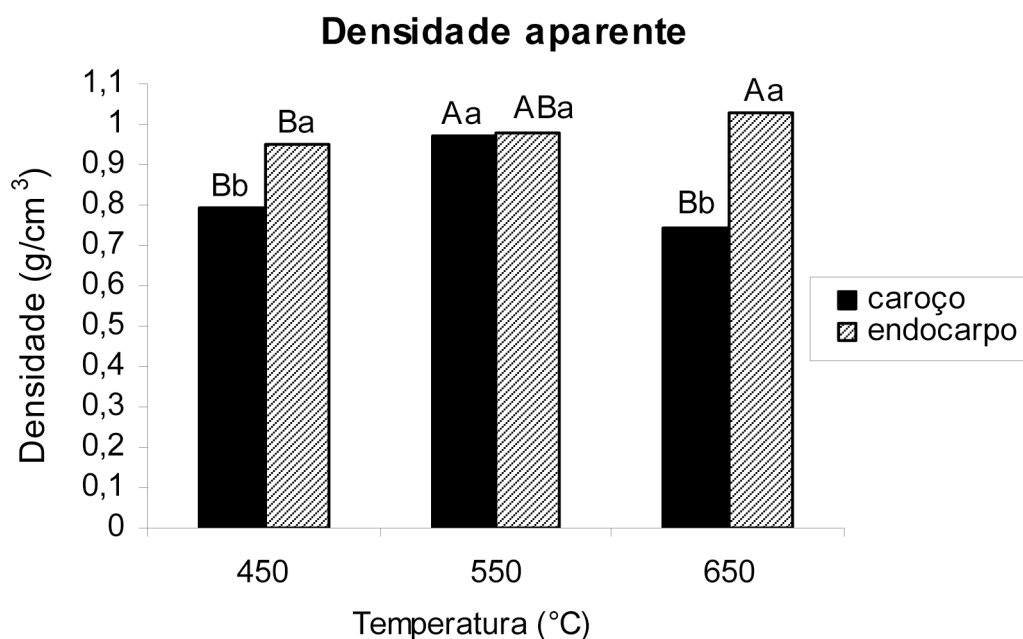


Figura 2. Valores médios de densidade aparente do carvão vegetal em função do tipo de resíduo e da temperatura de carbonização.

Figure 2. Charcoal apparent density mean values in relation to the residue type and carbonization temperature.

Os carvões produzidos com apenas o endocarpo da macaúba obtiveram um aumento da densidade com o aumento da temperatura de carbonização. Para o caroço houve um decréscimo da densidade aparente do carvão na temperatura de 650°C, isto se deve, provavelmente, a degradação da amêndoa presente dentro do caroço, reduzindo assim a massa para um mesmo volume, acarretando redução da densidade.

Na Tabela 5 estão apresentados os resultados do rendimento gravimétrico médio de carvão vegetal em função da temperatura de carbonização. A análise de variância indicou que o rendimento gravimétrico em carvão vegetal de macaúba foi afetado apenas pela temperatura de carbonização.

Tabela 5. Valores médios de rendimento gravimétrico do carvão vegetal em função da temperatura de carbonização.

Table 5. Charcoal gravimetric yield mean values in relation to carbonization temperature.

Temperatura de carbonização (°C)	Rendimento gravimétrico (%)
450°C	36,10 A
550°C	34,87 AB
650°C	34,43 B

* Médias ao longo da coluna seguidas das mesmas letras maiúsculas não diferem entre si significativamente pelo teste Tukey a 95% de probabilidade.

Com o aumento da temperatura de carbonização, houve decomposição dos constituintes químicos das matérias-primas, provocando perda de massa, e conseqüentemente redução no rendimento gravimétrico em carvão. O ren-

dimento gravimétrico dos carvões produzidos a 450°C foi significativamente superior àqueles produzidos nas outras temperaturas devido à menor decomposição do material. Ressalta-se que o rendimento em carvão sempre está alinhado com o teor de carbono fixo presente no mesmo, pois conforme pode se observar na Tabela 6, a temperatura de 450°C apresentou de forma significativa o menor teor de carbono fixo. De modo geral, quanto maior a temperatura final de carbonização, menor o rendimento e maior o teor de carbono fixo.

A Tabela 6 apresenta os valores médios obtidos para o teor de carbono fixo em função da temperatura de carbonização.

Tabela 6. Valores médios do teor de carbono fixo do carvão vegetal em função da temperatura de carbonização.

Table 6. Charcoal fixed carbon mean values in relation to carbonization temperature.

Temperatura de carbonização (°C)	Carbono fixo (%)
450°C	82,92 B
550°C	85,93 A
650°C	85,41 A

* Médias ao longo da coluna seguidas das mesmas letras maiúsculas não diferem entre si significativamente pelo teste Tukey a 95% de probabilidade.

Pode se observar, um aumento significativo do teor de carbono fixo até a temperatura de 550°C, devido principalmente à expulsão dos componentes voláteis do carvão ocorrendo uma concentração de carbono.

Ao analisar o teor de carbono fixo no carvão da madeira de eucalipto Trugilho *et al.* (2001) encontraram valores variando entre 78,2 e 81,5%. Frederico (2009) encontrou no carvão dos clones de eucalipto valores para o teor de carbono fixo entre 80,13 e 83,74%. Observou-se nesse trabalho, que as porcentagens de carbono fixo do carvão em função da temperatura de carbonização, estão compreendidas entre 82,92 e 85,93%.

Os valores médios do teor de carbono fixo do carvão em função do tipo de resíduo estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Valores médios do teor de carbono fixo do carvão vegetal em função do tipo de resíduo.

Table 7. Charcoal fixed carbon mean values in relation to the residue type.

Tipo de resíduo	Carbono fixo (%)
Caroço (amêndoa + endocarpo)	81,79 B
Endocarpo	87,71 A

* Médias ao longo da coluna seguidas das mesmas letras maiúsculas não diferem entre si significativamente pelo teste Tukey a 95% de probabilidade.

Observa-se que entre os resíduos de macaúba, o maior teor de carbono fixo foi obtido para o endocarpo. Baer Filho (2008), trabalhando com resíduos de macaúba obteve um teor de carbono fixo para o endocarpo de $86,51 \pm 0,21\%$, valores estes próximos aos obtidos para as temperaturas de 550 e 650°C. Segundo Santos (2008b) a faixa desejada de carbono fixo no carvão para uso siderúrgico está compreendida entre 75 e 80%, no entanto, maiores teores de carbono fixo contribuem para o aumento na produtividade dos alto-fornos para o mesmo consumo de reductor.

Na Figura 3 estão apresentados os valores médios de carbono fixo em função tipo de resíduo e temperatura de carbonização. A análise de variância indicou que o carbono fixo do carvão foi afetado isoladamente pelos tratamentos, ocorrendo, também, interações significativas entre as variáveis experimentais e a temperatura de carbonização.

Observa-se que o tipo de resíduo e a temperatura final de carbonização influenciaram significativamente no teor de carbono fixo dos carvões. Verifica-se que os maiores percentuais de carbono fixo foram observados no carvão do endocarpo de macaúba. Durante o processo de carbonização, quanto maior a exposição do material ao tempo e temperatura, maior foi a eliminação das matérias voláteis, refletindo diretamente no aumento do teor de carbono fixo e na redução do rendimento gravimétrico em carvão. Não houve diferença significativa no teor de carbono fixo no carvão do endocarpo nas diferentes temperaturas. Para o carvão do coco produzido na temperatura final de 550 °C o teor de carbono fixo foi significativamente diferente daquele produzido na da temperatura de 450 °C e igual à temperatura de 650 °C.

Na Tabela 8 são apresentados os valores médios do teor de matérias voláteis em relação à temperatura de carbonização. A análise de variância indicou que o percentual de matérias voláteis presentes no carvão vegetal de macaúba foi afetado apenas pela temperatura de carbonização.

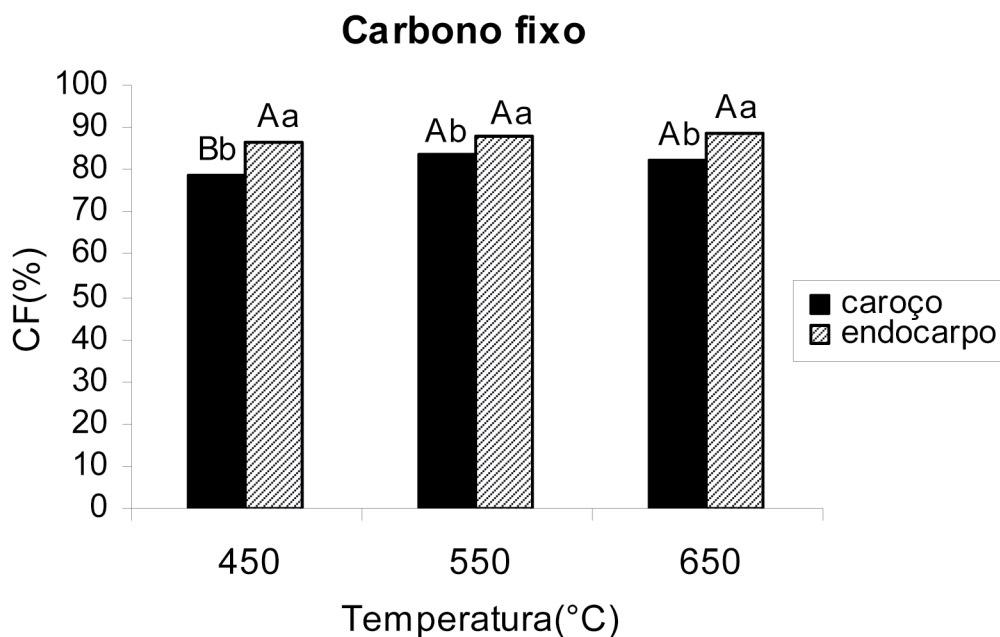


Figura 3. Valores médios do teor de carbono fixo do carvão vegetal em função do tipo de resíduo e da temperatura de carbonização.

Figure 3. Charcoal fixed carbon mean values in relation to the residue type and carbonization temperature.

Tabela 8. Valores médios do teor de matérias voláteis do carvão vegetal em função da temperatura de carbonização.

Table 8. Charcoal mean values of volatile matter in relation to carbonization temperature.

Temperatura de carbonização (°C)	Matérias voláteis (%)
450°C	10,54 A
550°C	9,04 B
650°C	7,74 C

* Médias ao longo da coluna seguidas das mesmas letras maiúsculas não diferem entre si significativamente pelo teste Tukey a 95% de probabilidade.

De acordo com a Tabela 8, houve uma redução significativa dos valores médios do teor de matérias voláteis com o aumento do tempo e temperatura de carbonização. Como era de se esperar, com a elevação da temperatura houve a expansão dos gases, em consequência da maior degradação dos materiais, reduzindo assim a quantidade de voláteis presentes nos carvões.

Trugilho *et al.* (2001) observaram a partir da madeira de *Eucalyptus grandis* aos sete anos de idade teores de matérias voláteis variando entre 18,0 e 21,9%. Frederico (2009) ao avaliar as propriedades qualitativas do carvão de cinco clones de eucalipto aos três anos de idade encontrou valores para essa variável entre 15,01 e 19,15%. Verifica-se que os teores de matérias voláteis encontrados por esses autores foram superiores aos observados para o carvão dos resíduos de macaúba analisados neste trabalho.

De acordo com Santos (2008b) o teor de matérias voláteis no carvão situa-se entre 20 e 25% e que porcentagens inferiores a 25% são desejadas para o uso siderúrgico.

Nas Tabelas 9 e 10 são apresentados os valores médios do teor de cinzas em relação à temperatura de carbonização e do tipo de resíduo, respectivamente.

Avaliando o efeito da temperatura de carbonização e tipo de resíduo na produção de carvão, pode se observar, nas Tabelas 9 e 10, valores elevados de cinzas. Quanto maior a proporção de matérias minerais no material, maior será a porcentagem de cinzas no carvão e menor o poder calorífico, não sendo desejável, principalmente para fins siderúrgicos por acarretar perda de resistência do ferro gusa e desgaste no alto-forno, além da perda de energia no sistema por redução do poder calorífico do material. Pois, segundo Santos (2008b) a presença de inorgânicos no carvão acarreta desgaste do refratário, criação de cascão na parede do alto forno, eleva o consumo de carvão dentro do alto forno, além de reduzir a resistência do ferro gusa.

Tabela 9. Valores médios do teor de cinzas do carvão vegetal em função da temperatura de carbonização.

Table 9. Charcoal ash content mean values in relation to carbonization temperature.

Temperatura de carbonização (°C)	Cinzas (%)
450°C	6,54 A
550°C	5,03 B
650°C	6,85 A

* Médias ao longo da coluna seguidas das mesmas letras maiúsculas não diferem entre si significativamente pelo teste Tukey a 95% de probabilidade.

Tabela 10. Valores médios do teor de cinzas do carvão vegetal em função do tipo de resíduo.

Table 10. Charcoal ashes mean content values in relation to the residue type.

Tipo de resíduo	Cinzas (%)
Caroço (amêndoa + endocarpo)	9,04 A
Endocarpo	3,25 B

* Médias ao longo da coluna seguidas das mesmas letras maiúsculas não diferem entre si significativamente pelo teste Tukey a 95% de probabilidade.

Os teores de cinzas observados nesse trabalho encontram-se superiores aos encontrados por Frederico (2009), os quais variaram entre 0,59 e 1,26%.

A Figura 4 apresenta os valores médios do teor de cinzas do carvão vegetal em função do tipo de resíduo e temperatura de carbonização.

Observou-se no carvão produzido a partir do endocarpo, que o aumento da temperatura foi acompanhado de um aumento no teor de cinzas (Figura 4). As carbonizações com maior tempo e temperatura final, dentro das marchas estudadas, apresentaram maiores valores médios para o teor de cinzas, devido ao efeito do aumento da concentração de minerais pela perda de massa. Para o carvão do caroço foram encontrados elevados teores de cinzas, quando comparado ao endocarpo, provavelmente pela possível contaminação do caroço com resíduos do solo e também em função de maiores resíduos fibrosos da polpa do fruto de macaúba. Outra explicação para tal fato pode ser atribuída à presença de minerais contidos na amêndoa.

Nas Tabelas 11 e 12 são apresentados os valores médios do poder calorífico superior do carvão vegetal em função da temperatura de carbonização e do tipo de resíduo, respectivamente.

Barcellos (2007) encontrou valores médios de poder calorífico para carvões com espécies de eucalipto e nativas de 7173,64 kcal/kg (temperatura de carbonização de 450 °C) e 7648,08 kcal/kg (temperatura de carbonização de 550 °C), sendo valores inferiores aos encontrados para os carvões dos resíduos de macaúba. A redução do poder calorífico na temperatura de 650oC é devido, principalmente, a redução de gases

combustíveis que foram eliminados após a temperatura de 550°C. Estes contribuem de forma significativa para o aumento de energia contida no material. Os gases combustíveis, principalmente o hidrogênio possui poder calorífico superior ao do carbono, ou seja, o incremento de carbono a partir de uma determinada temperatura é pequeno em relação à perda de hidro-

gênio, por isso o poder calorífico é ligeiramente reduzido a partir de determinadas temperaturas. Na Tabela 12, verifica-se que o carvão do endocarpo de macaúba apresentou, significativamente, o maior poder calorífico superior.

A Figura 5 apresenta os valores médios do poder calorífico superior do carvão vegetal em função do tipo de resíduo e temperatura de carbonização.

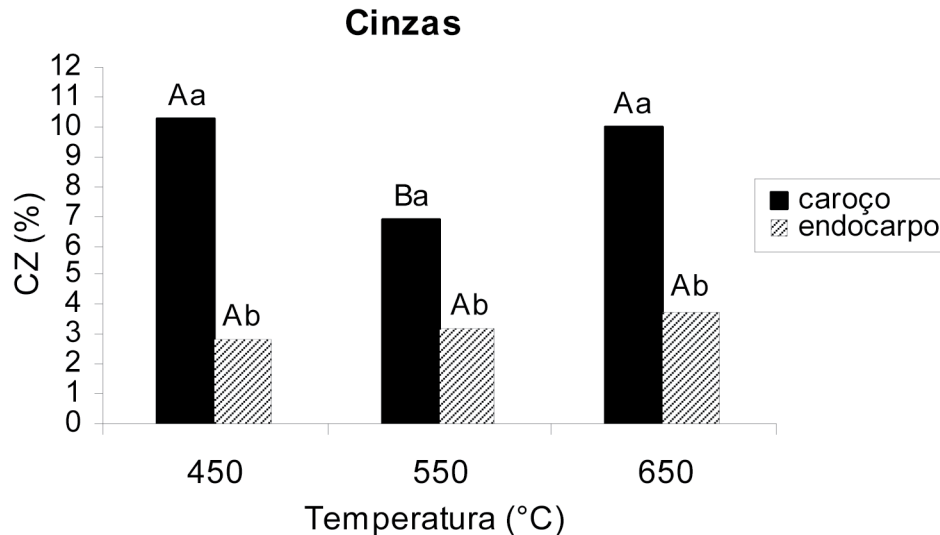


Figura 4. Valores médios do teor de cinzas do carvão vegetal em função do tipo de resíduo e da temperatura de carbonização.

Figure 4. Charcoal ashes mean content values in relation to the residue type and carbonization temperature.

Tabela 11. Valores médios do poder calorífico do carvão vegetal em função da temperatura de carbonização.

Table 11. Charcoal heating mean values in relation to carbonization temperature.

Temperatura de carbonização (°C)	Poder calorífico superior (kcal/kg)
450°C	7809,44 B
550°C	8045,56 A
650°C	7602,89 C

* Médias ao longo da coluna seguidas das mesmas letras maiúsculas não diferem entre si significativamente pelo teste Tukey a 95% de probabilidade.

Tabela 12. Valores médios do poder calorífico do carvão vegetal em função do tipo de resíduo.

Table 12. Charcoal heating mean values in relation to the residue type.

Geometria	Poder calorífico superior (kcal/kg)
Caroço (amêndoa + endocarpo)	7611,59 B
Endocarpo	8027,00 A

* Médias ao longo da coluna seguidas das mesmas letras maiúsculas não diferem entre si significativamente pelo teste Tukey a 95% de probabilidade.

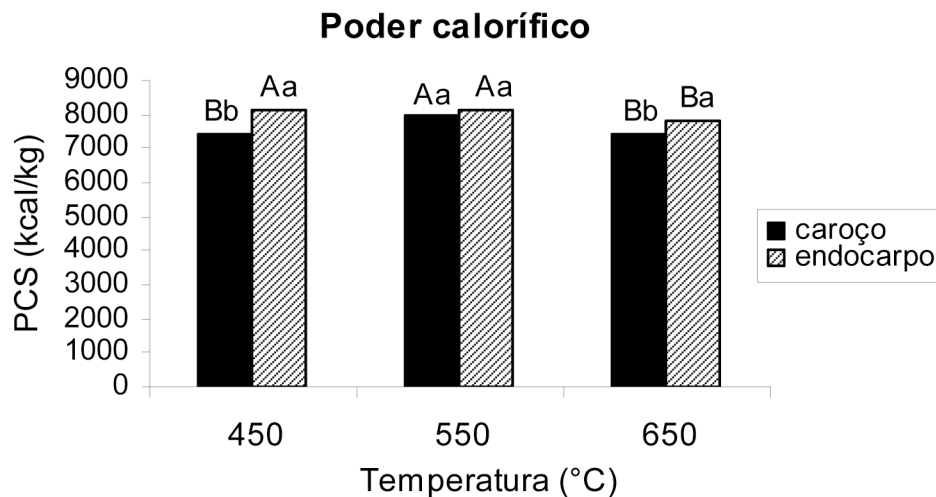


Figura 5. Valores médios do poder calorífico do carvão vegetal em função do tipo de resíduo e da temperatura de carbonização.

Figure 5. Heating mean values as related to residue type and carbonization temperature.

Verifica-se na Figura 5 que os carvões do endocarpo na temperatura de 450°C apresentaram maior poder calorífico. Para o caroço o carvão produzido a 550°C tem um poder calorífico maior comparado às demais temperaturas. Santos (2008a) diz que o poder calorífico do carvão vegetal encontra-se próximo de 7.500 Kcal/Kg. Frederico (2009) encontrou valores para essa propriedade entre 8.129 e 8.389 Kcal/Kg.

Nas Tabelas 13 e 14 são apresentados os valores médios de umidade do carvão vegetal em função da temperatura de carbonização e do tipo de resíduo, respectivamente.

Tabela 13. Valores médios da umidade do carvão vegetal em função da temperatura de carbonização.

Table 13. Mean values of charcoal moisture content as related to carbonization temperature.

Temperatura de carbonização (°C)	Umidade (%)
450°C	2,87 B
550°C	3,32 AB
650°C	3,67 A

* Médias ao longo da coluna seguidas das mesmas letras maiúsculas não diferem entre si significativamente pelo teste Tukey a 95% de probabilidade.

Tabela 14. Valores médios da umidade do carvão vegetal em função do tipo de resíduo.

Table 14. Mean values of charcoal moisture content as related to residue type.

Geometria	Umidade (%)
Coco (amêndoa + endocarpo)	3,55 A
Endocarpo	3,02 B

* Médias ao longo da coluna seguidas das mesmas letras maiúsculas não diferem entre si significativamente pelo teste Tukey a 95% de probabilidade.

Pode se observar pela Tabela 13, um aumento da umidade do carvão com o aumento da temperatura e da taxa de aquecimento, ou seja, com o aumento da temperatura final os carvões ficaram mais higroscópicos. Vale ressaltar que para as determinações da umidade de equilíbrio higroscópico do carvão, os mesmos foram climatizados a temperatura de 20°C e umidade relativa de 65% até atingir peso constante. Ressalta-se que altos teores de umidade no carvão vegetal acarretam diminuição da sua resistência mecânica, acarretando aumento no percentual de finos gerados. De acordo com a Tabela 14, o maior teor de umidade foi obtido no carvão produzido a partir do caroço da macaúba.

CONCLUSÕES

Conclui-se que as características físicas e químicas do carvão vegetal produzido a partir dos resíduos de macaúba sofreram interferência da temperatura final de carbonização, sendo, portanto a

mesma responsável pela qualidade final. O rendimento gravimétrico em carvão vegetal foi reduzido com o aumento da temperatura de carbonização.

Conclui-se que o carvão vegetal produzido a partir do caroço da macaúba apresenta elevados teores de cinzas, o que pode inviabilizar o seu uso na siderurgia. O carvão vegetal produzido com o endocarpo da macaúba apresenta características desejáveis tanto para uso energético quanto siderúrgico. Assim, recomenda-se a produção de carvão vegetal a partir de resíduos de macaúba, utilizando apenas o endocarpo, na temperatura final de 550°C, onde se obtém rendimento e qualidade do produto final.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6923:1981 Carvão vegetal - Amostragem e preparação da amostra. Rio de Janeiro: ABNT, 1981. 15p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8112:1986 Carvão vegetal - Análise imediata. Rio de Janeiro: ABNT, 1986. 5p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8633:1984 Carvão vegetal - Determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro: ABNT, 1986. 13p.

ALMEIDA, M.R., REZENDE, M.E.A. O processo de carbonização contínua da madeira. In: **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC, 1982. 393p.

AMS - ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA. **Anuário Estatístico 2008**. Disponível em: <<http://www.silviminas.com.br>>. Acesso em: 02. Abr. 2009.

BAER FILHO, R. Endocarpo de Macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Martius) comparado a madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden para produção de carvão vegetal. In: CONGRESSO BRASILEIRO AGROBIOENERGIA E SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE BIOCUMBUSTÍVEIS, 2008, Uberlândia, **Resumos dos trabalhos apresentados...** Uberlândia: Conbien, 2008.

BARCELLOS, D.C. **Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo**. 2007. 140p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

- BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanco Energético Nacional BEN 2008 – Base 2007, Preliminar**. Brasília: MME, 2008. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 02 abr. 2009.
- BRITO, J.O. **Reflexões sobre a qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico**. Piracicaba: IPEF, 1993. 6p. (Circular técnica no 181).
- FREDERICO, P.G.U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**. 2009. 85p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.
- LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. Nova Odessa: Plantarum, 1992. v1. 352p.
- MACHADO, F.S.; ANDRADE, A.M. Propriedades termoquímicas dos finos de carvão vegetal e de carvão mineral para a injeção nas ventaneiras de altos-fornos siderúrgicos. **Revista biomassa e energia**, Viçosa, v.1, n.4, p.353-363, 2004.
- MOTTA, P.E.; OLIVEIRA FILHO, A.T.; GOMES, J.B.V. Ocorrência da macaúba em Minas Gerais: relação com atributos climáticos, pedológicos e vegetacionais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.7, p.1023-1031, 2002.
- PINHEIRO, P.C.C.; VIANA, E.; REZENDE, M.E.A.; SAMPAIO, R.S. **A produção de Carvão vegetal**. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC, 2006. 103p.
- SANTOS, I.D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica, contração da madeira e nos rendimentos e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado**. 57p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Florestal, Brasília, 2008^a
- SANTOS, M.A.S. **Uso do carvão vegetal em alto forno**. In: FÓRUM NACIONAL DE CARVÃO VEGETAL, 1, 2008, Belo Horizonte. **Anais...**Belo Horizonte: SIF, 2008b.
- SILVA, J.C. **Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* HILL ex. MAIDEN, de diferentes idades, visando a sua utilização na indústria moveleira**. 2001. 160p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.
- SILVA, J.C.; BARRICHELO, L.E.G.; BRITO, J.O. Endocarpos de Macaúba e de Babaçu comparados a madeira de *Eucalyptus grandis* na produção de carvão vegetal. IPEF, Piracicaba, n.34, p.31-34, 1986.
- TENÓRIO, E.C. **O babaçu e coqueiros assemelhados em Minas Gerais**. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC, 1982, 216p.
- TRUGILHO, P.F.; LIMA, J.T.; MORI, F.A.; LINO, A.L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. **Revista Cerne**, Lavras, v.7, n.2, p.114-201, 2001.
- VALE, A.T.; COSTA, A.F.; GONÇALVES, J.C.; NOGUEIRA, M. 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.
- VITAL, B.R. **Métodos de determinação da densidade da Madeira**. Viçosa: SIF, 1984. 21 p. (SIF, Boletim Técnico, 1)
- WANDECK, F.A.; JUSTO, P.G. A macaúba, fonte energética e insumo industrial: sua significação econômica no Brasil. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, SAVANAS, 6., 1988, Brasília. **Anais...** Planaltina: Embrapa-CPAC, 1988. p.541-577.

Recebido em 14/12/2009

Aceito para publicação em 14/07/2010