

Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas, químicas e energéticas do carvão de cinamomo (*Melia azedarach* L.)

Influence of temperature carbonization in physical, chemical and energy of charcoal from cinamomo (*Melia azedarach* L.)

Gilmara de Oliveira Machado^{1(*)}

Franciele Vogel²

Matheus Moraes e Silva³

Resumo

O objetivo deste trabalho foi verificar a influência da temperatura final de carbonização sobre algumas das principais características físicas e químicas desejáveis no carvão vegetal de cinamomo (*Melia Azedarach* L.). Foram obtidos corpos-de-prova do plantio experimental provenientes do Colégio Florestal, localizado na cidade de Irati, estado do Paraná. As amostras foram obtidas de um disco retirado na altura referente à altura do peito. O potencial energético foi avaliado determinando-se os rendimentos gravimétricos, de carbono fixo e energético bem como o Poder Calorífico Superior e teor de finos, além das características químicas da espécie. A carbonização da madeira foi realizada em forno mufla, nas temperaturas de 300°C e 400 °C. O teor de carbono fixo, e o poder calorífico superior do carvão vegetal aumentaram com o aumento da temperatura de carbonização e o teor de cinzas não variou significativamente com o aumento da temperatura final de carbonização. A espécie apresentou teor de lignina acima do esperado, 34,66%, com o melhor rendimento gravimétrico, 35,21%, obtido com a carbonização à 300 °C. O maior PCS, de 7259,07 kcal/kg, foi obtido para a amostra carbonizada a 400 °C. Entretanto, considerou-se a carbonização a 300 °C como a mais eficiente, uma vez que apresentou o maior rendimento energético, com valor de 54,66%.

Palavras-chave: carbonização; análise imediata; poder calorífico.

1 Dra.; Ciências Exatas; Professora Adjunta do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Estadual do Centro-Oeste, UNICENTRO; Endereço: PR-153, km 07, Riozinho, CEP: 84500-000, Irati, Paraná, Brasil; E-mail: gilmarachado@yahoo.com.br (*) Autora para correspondência.

2 MSc.; Engenharia Florestal; Laboratório de Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais na Universidade Estadual do Centro-Oeste, UNICENTRO; Endereço: PR-153, km 07, Riozinho, CEP: 84500-000, Irati, Paraná, Brasil; E-mail: francieli.vogel@yahoo.com.br

3 Engenheiro Florestal; Mestrando em Bioenergia; Laboratório de Tecnologia e utilização de produtos Florestais da Universidade Estadual do Centro-Oeste, UNICENTRO; Endereço: PR-153, km 07, Riozinho, CEP: 84500-000, Irati, Paraná, Brasil; E-mail: matheusmoraess@hotmail.com

Abstract

The objective of this work was to verify the influence of the final temperature carbonization on some of the main physical and chemical characteristics desirable in charcoal Chinaberry (*Melia azedarach* L.). Bodies were obtained from the test piece from the experimental planting of Forestry College, located in Irati, Parana. Samples were obtained from a disc removed in time for the height of the chest. The potential energy was evaluated by determining the gravimetric yield of fixed carbon and energy as well as the Higher Calorific Value and fines content, in addition to the chemical characteristics of the species. The wood carbonization was performed in a muffle furnace at temperatures of 300 °C and 400 °C. The fixed carbon content and the calorific value of charcoal increased with the increase in the carbonization temperature and ash content did not vary significantly with increasing final temperature of carbonization. The species showed lignin content than expected, 34.66 %, with the best gravimetric yield, 35.21 %, obtained by carbonization at 300 °C. The greatest PCS was obtained for the sample carbonized at 400 °C 7259.07 kcal / kg. However, we considered the carbonization at 300 °C as the most efficient since it had the highest energy yield, 54.66%.

Key words: wood carbonization; proximate analysis; calorific value.

Introdução

A busca por melhor aproveitamento da biomassa florestal tem aumentado dia após dia, decorrente de questões econômicas, sociais, ambientais, e climáticas que ameaçam a qualidade de vida na Terra (GONÇALVES et al., 2010).

Conforme Trugilho et al. (2005), a ampla disponibilidade de terra, aliada a um alto índice de insolação, mostra que a biomassa de origem florestal é muito importante para um país tropical como o Brasil, sendo a madeira, na sua forma direta como lenha ou do seu derivado, o carvão vegetal, amplamente utilizadas para finalidade energética.

Segundo Brito e Cintra (2004), estima-se que, de cada seis pessoas no mundo, três utilizem a madeira como a principal fonte de energia, particularmente as famílias de países

em desenvolvimento, sustentando processos de secagens, cozimentos, fermentações e produções de eletricidade. De cada duas árvores que são cortadas no planeta para alguma utilização, uma é para energia, enquanto que, no Brasil, em torno da metade da madeira produzida tem destinação energética (FAO,2003).

A carbonização é um processo de decomposição da madeira por ação de calor em altas temperaturas, na faixa de 300 a 500 °C, pelas quais são volatilizados os líquidos e se produz em compostos gasosos, restando apenas um sólido composto quase que exclusivamente de carbono puro. Este sólido é chamado de carvão vegetal.

A carbonização tem por principal aplicação a produção de carvão vegetal, cujo rendimento pode atingir até 40% em massa, em relação à madeira de partida. Em conjunto com o carvão também são produzidos

voláteis condensáveis como, alcatrões solúveis e insolúveis, ácidos orgânicos, cetonas, água, alcoóis e hidrocarbonetos. Com exceção do alcatrão insolúvel, a mistura dos demais compostos forma um subproduto importante, geralmente intitulado como ácido pirolenhoso, o qual contém substâncias químicas valiosas como o ácido acético, metanol e acetona. A fase gasosa, a qual pode ser utilizada como fonte de energia suplementar ao processo, possui rendimentos da ordem de 5 a 20% em massa, dependendo da faixa de temperatura em que a carbonização se realiza. Os principais gases produzidos são gás carbônico, monóxido de carbono, metano, hidrogênio e hidrocarbonetos de até quatro carbonos. Nos processos convencionais de transformação da madeira em carvão vegetal, existe a presença controlada de oxigênio do ar, para que parte da madeira sofra combustão, gerando, assim, a energia necessária para a carbonização se realizar. Essa queima leva também à formação de compostos inorgânicos denominados cinzas (SANTIAGO; PANNIRSEL, 2004).

A utilização mais simples do carvão vegetal é como combustível, mas ocorrem utilizações mais complexas. Nos processos siderúrgicos, é utilizado, ao mesmo tempo, como redutor do minério de ferro e como fonte térmica. No Brasil, geralmente, as instalações existentes de carvoejamento estão projetadas para o aproveitamento apenas do carvão vegetal, liberando para a atmosfera os líquidos e os gases da carbonização, o que representa, além de um grande desperdício energético, um alto grau de poluição ambiental (MONTEIRO, 2006).

A principal motivação para a realização da carbonização reside no fato de o carvão vegetal liberar, em sua queima, uma quantidade de energia muito maior que a

lenha de partida. A quantidade de energia liberada por unidade de massa na combustão da madeira é denominado Poder Calorífico. Enquanto que na madeira o Poder Calorífico gira em torno de 4500 kcal/Kg na base seca, no carvão vegetal pode chegar a 8000 kcal/Kg (BRITO; CINTRA, 2004).

A madeira é um material orgânico e os seus constituintes químicos estão relacionados com as suas propriedades. O conhecimento da composição química da madeira é importante para a definição do melhor uso desse material como lenha ou do seu derivado, o carvão. Quimicamente, a madeira é composta por substâncias de baixa massa molar denominadas extrativos (natureza orgânica) e cinzas (substâncias inorgânicas), bem como, por substâncias macromoleculares que compreendem os polissacarídeos (celulose e hemiceluloses) e a lignina. No processo de conversão da madeira em carvão, as hemiceluloses, que são os componentes menos estáveis, decompõem-se na faixa de 200 a 300 °C e a celulose se degrada em temperaturas mais altas, entre 300 e 400 °C. A lignina, que é a mais estável, decompõe-se gradualmente, entre 200 e 500 °C, quando o carvão vegetal é produzido. Os polissacarídeos são os responsáveis, no processo de carbonização, pela formação da maioria dos produtos voláteis e uma boa quantidade de água, enquanto a lignina contribui principalmente para a produção de carvão vegetal e alcatrões (FENGEL; WEGENER, 1984).

Um grande problema na utilização do carvão vegetal é a sua alta diferença em qualidade, necessitando de um controle mais rigoroso das suas propriedades, o que ocasiona um grande desperdício do material, dificultando a operação na queima (TRUGUILHO et al., 2001). Segundo

esses mesmos autores, as diferenças nas propriedades físico-químicas de diversas espécies lenhosas exercem uma grande variabilidade na qualidade do carvão vegetal. Dessa forma, a utilização de uma determinada madeira para fins energéticos deve basear-se no conhecimento de suas características químicas e físicas, sendo que, quanto maior sua densidade e seu teor de lignina, maior será o rendimento em carvão vegetal na carbonização, bem como, maior será a quantidade de energia liberada em sua combustão. Vale et al. (2000) mostram que o poder calorífico superior da madeira é função da sua composição química elementar, em uma relação direta com o teor de carbono e de hidrogênio e inversa com o teor de oxigênio. Essas propriedades podem ser utilizadas para classificar e escolher as melhores espécies de madeira para uso energético.

Embora haja grande utilização da madeira para fins energéticos, há relativamente poucos estudos que descrevem as características importantes de uma determinada espécie de madeira para tal fim.

O Cinamomo é uma meliácea nativa da região nordeste da Índia, sendo encontrada atualmente em quase todos os países de clima tropical. Possui várias denominações populares tais como Lírio, Lilás da Índia ou Cinamomo. Essa espécie foi introduzida no Brasil no século retrasado e, por possuir facilidade de adaptação e expansão vegetativa, é bastante cultivada como árvore de sombra e ornamental. Apresenta tronco de secção cilíndrica, reto ou levemente tortuoso com base normal, ramificado, de coloração acinzentada. O seu sistema radicular é constituído de uma raiz pivotante, associada a muitas raízes superficiais estendidas. Os ramos são grossos e quando jovens apresentam cor roxo-escuro que realça muito

os pecíolos verdes. A copa é alta, densifolhada, de ramificação irregular, simpótica, verde, tornando-se amarelada nos meses de maio e junho, quando acontece a queda das folhas. Sua casca apresenta espessura total de 7 a 10 mm (SCHNEIDER et al., 1987).

Por se tratar de uma cultura não muito utilizada até então nos reflorestamentos, poucas informações existem sobre o crescimento da espécie, especialmente no Brasil. Sua longevidade é bastante precoce, atingindo aos cinco anos, 12 a 17 m de altura e 16 a 30 cm de DAP, podendo atingir mais de 40 cm de diâmetro aos cinco anos de idade (RIBEIRO, 1973).

No Brasil, esta espécie é bastante cultivada, com alto grau de adaptabilidade na região Sul. Observações efetuadas em pequenos plantios na região de Missões, no Rio Grande do Sul, detectou uma regeneração natural extremamente abundante. Isso leva a crer que existe a possibilidade de execução de plantios diretos e manejo através de regeneração natural para obtenção de novo povoamento. Adicionalmente, o Cinamomo tem a vantagem de ser uma espécie exótica sendo, portanto liberada para o corte (TRIANOSKI, 2010).

Observações efetuadas em pequenos plantios, na região de Missões no Rio Grande do Sul, detectaram uma regeneração natural extremamente abundante.

Em termos mundiais, o Cinamomo tem sido cultivado há muitos anos, apresentando crescimento rápido podendo chegar a 546,1 m³/ha aos quatro anos de idade, equivalendo a um incremento médio anual (IMA) de 136,5m³.ha.ano, (RIBEIRO, 1973). O IMA do Cinamomo é excelente se comparado às espécies tradicionalmente utilizadas para produção de energia cujo crescimento médio se encontra na faixa de 35-60 m³ /ha. ano (DOSSA et al., 2002).

Sua madeira é moderadamente densa (0,59 a 0,66 g/cm³), sendo muito utilizada na confecção de móveis de luxo, laminados e compensados, além de produzir lenha de boa qualidade. Possui uso não tradicional na produção de carvão vegetal. Na Índia, tem seu principal emprego como planta medicinal, devido às suas propriedades como fungicida, inseticida, antiviral, anti-malária e anti-helmíntica, (SCHNEIDER et al., 1987).

No Brasil, essa espécie é amplamente conhecida, principalmente devido ao seu grande uso na arborização urbana. Porém, vem sendo pouco estudada em relação aos seus potenciais usos em outros setores. Em relação ao manejo, existe a necessidade de definição das técnicas de poda, desbastes e rotação, mais adequados à condução dos povoamentos dessa espécie, buscando maximizar os investimentos e atendendo aos objetivos de produção (SEIXAS et al., 2006).

Em função de espécies florestais, de maneira geral, apresentarem um crescimento lento, cujos resultados e lucros obtidos manifestam-se a longo prazo, torna-se necessário o estudo e descoberta de novas espécies que venham a fornecer matéria prima e retorno imediato do capital investido mais precocemente, sendo o cinamomo uma opção viável.

Esta pesquisa tem por objetivo foi verificar a influência da temperatura final de carbonização sobre algumas das principais características físicas e químicas desejáveis no carvão vegetal de Cinamomo (*Melia Azedarach* L.).

Material e Métodos

Procedência da Madeira Utilizada

A madeira selecionada foi proveniente do Colégio Florestal localizado na cidade de Irati, estado do Paraná. A cidade está

localizada nas coordenadas 25°27'56" de latitude Sul, com interseção com o meridiano 50°37'51" de longitude Oeste, no segundo planalto paranaense. O clima do município é classificado como do tipo "Cfb" (método de Köppen), clima subtropical úmido mesotérmico, não apresentando estação seca.

As amostras foram obtidas de um disco retirado na altura referente ao Diâmetro à Altura do Peito (DAP), a 1,30 m em relação ao nível do solo. Deste disco, foram obtidos os corpos-de-prova para serem utilizados na análise. A carbonização foi realizada em forno mufla nas temperaturas de 300 e 400 °C, com corpos-de-prova de madeira nas dimensões 2x3x5 cm, com quatro repetições. Para a realização da análise imediata, pulverizou-se o material carbonizado e não carbonizado, utilizando-se uma granulometria de 42 mesh, resultando em serragem, a qual foi peneirada utilizando-se, na análise, a fração que passou pela peneira de 42 mesh e ficou retida na de 60 mesh. A fim de se reduzir o erro experimental, todas as análises foram realizadas em quadruplicata (quatro repetições) determinando-se a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação de cada experimento.

Os ensaios foram realizados no laboratório de Tecnologia da Madeira de Testes Físico-químicos do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Estadual do Centro-Oeste, *campus* Irati/PR. Foi realizado delineamento experimental inteiramente casualizado. A análise estatística foi realizada utilizando o *software* SPSS. Os valores foram submetidos à ANOVA para verificar se há diferença estatística significativa entre as médias. Para médias diferentes, foi realizado o teste Tukey com $\alpha=5\%$.

Determinação do teor de umidade

O teor de umidade da amostra não carbonizada foi quantificado pelo método da secagem em estufa. Tal método consiste em se colocar uma massa conhecida do material na estufa, em torno de 1g, regulada à 105°C, com tempo de permanência determinado por pesagem até massa constante. Por diferença entre a massa inicial e a final, calcula-se o teor de umidade. Sabendo-se que P é a massa inicial da amostra e Pas a massa da amostra seca em estufa, teremos, para um teor de umidade (U), a seguinte equação:

$$U = [(P - Pas) / P] \times 100 \quad (1)$$

Determinação do teor de extrativos

A serragem de madeira foi tratada com água destilada e etanol para remover os compostos orgânicos de baixa massa molar solúveis em meio aquoso e orgânico. Pesou-se em balança analítica 3g de serragem de madeira e colocou-se dentro de um balão de fundo redondo, acoplado a um condensador de refluxo, onde foram acrescentados 300 mL de solução de álcool e água destilada (proporção 1:1). O sistema foi deixado sob refluxo por 30 minutos, medido a partir do ponto de ebulição da solução. Após esse procedimento, a serragem foi filtrada em papel de filtro previamente pesado e de teor de umidade conhecido. O filtro mais o resíduo refluxado foram secados em estufa de circulação de ar até no máximo 40 °C de temperatura. A baixa temperatura de secagem foi para que não ocorresse degradação térmica dos polissacarídeos e lignina, os quais iriam ser quantificados nos ensaios posteriores. Em seguida, determinou-se o teor de umidade da

serragem após a extração. O teor de extrativos foi quantificado pela seguinte expressão:

$$\%S = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (2)$$

Onde S é o teor de extrativos (%), m_1 é a massa (g) de amostra seca antes da extração em água e álcool e m_2 a massa (g) de amostra seca após a extração.

Determinação do teor de cinzas

Neste ensaio, usou-se cadinho de porcelana previamente tratado a 600 °C. por três horas. Para determinação do teor de cinzas, ou teor de inorgânicos, as amostras foram colocadas em cadinho de porcelana, numa mufla, na temperatura de 750 °C, por seis horas, para a completa degradação térmica dos compostos orgânicos. As amostras calcinadas foram colocadas em dessecador para resfriamento até massa constante. O teor de cinzas foi determinado pelo quociente entre a massa de cinzas e a massa seca inicial da amostra por meio da seguinte expressão:

$$\%Cinzas = (m1 / m2) \times 100 \quad (3)$$

Onde % Cinzas é o teor de cinzas em percentual, $m1$ é a massa (g) de cinzas e $m2$ a massa (g) de amostra seca antes da pirólise.

Determinação do teor de lignina

É importante que o método de extração elimine os extrativos da madeira sem, no entanto, alterar significativamente a lignina e os polissacarídeos presentes nela. Nesse sentido, foi utilizada, nesta análise, serragem de madeira livre de extrativos conforme descrito anteriormente e com teor de umidade conhecido. A lignina foi isolada como resíduo utilizando-se ácido sulfúrico

(H₂SO₄) concentrado 72%. Nesse meio, os polissacarídeos são hidrolisados em açúcares simples e facilmente removidos da madeira por meio de solubilização em solvente aquoso. A lignina, insolúvel neste meio, foi removida por simples filtração. O uso de ácido sulfúrico 72% para o isolamento leva à lignina denominada Klason.

Para quantificação do teor de lignina, pesou-se 1g de serragem de madeira seca e a transferiu para um frasco de erlenmeyer de 100 mL, com tampa. Adicionou-se lentamente 15 mL de H₂SO₄ 72% e, em seguida, procedeu-se à agitação magnética por duas horas, à temperatura ambiente. Em seguida, realizou-se uma pós-hidrólise, diluindo-se a solução ácida da seguinte forma: transferiu-se a solução, do erlenmeyer para um balão de refluxo de 500 mL, utilizando 300 mL de água destilada para lavagem do erlenmeyer. O sistema foi deixado em refluxo por 4 h, após início da fervura. Assim, o volume final da solução foi igual a 315 mL. Ao final do tempo de refluxo, aguardou-se resfriamento do sistema, e em seguida, a lignina foi filtrada. A amostra foi filtrada com dois litros de água destilada a 100 °C, para a total remoção do ácido. O material retido no filtro, lignina, foi colocado para secagem em estufa a 100 °C, por 24 horas. O conteúdo de lignina insolúvel foi determinado pela expressão:

$$Li = (mr / ma) \times 100 \quad (4)$$

Onde Li é a lignina insolúvel na amostra (%), mr é a massa de resíduo (g), base seca e ma a massa da amostra (g), base seca.

Determinação do teor de polissacarídeos

A determinação do teor de polissacarídeos da madeira (celulose e

hemiceluloses) foi através do método da diferença (análise somativa). Considerando-se o total de constituintes químicos na madeira como 100% e subtraindo-se deste os teores de extrativos, cinzas e lignina, têm-se o teor de polissacarídeos da amostra de madeira.

Determinação da densidade da madeira e do carvão vegetal

A densidade aparente a 0% de umidade foi obtida pela relação entre a massa determinada em balança analítica e o volume medido com o auxílio de um paquímetro, de cada corpo-de-prova de dimensões 2x3x5 cm, em que: Da = densidade aparente da madeira (g/cm³); MM = massa do corpo-de-prova seco(g) e VM = volume do corpo-de-prova seco (cm³). A determinação da densidade foi realizada na madeira antes do processo de carbonização e, posteriormente, em material carbonizado.

Determinação do teor de finos

O carvão vegetal, sendo um material bastante friável, produz quantidade razoável de finos durante seu manuseio. O teor de finos de cada uma das amostras é um parâmetro de comparação importante para avaliar a qualidade de carvões vegetais de diferentes espécies e processos de carbonização. Nesta pesquisa, foi considerado fino a fração de partículas produzidas na desagregação do carvão que passou através de peneira de 1 mm de abertura. A determinação de finos foi aferida nos corpos-de-prova carbonizados que produziram material particulado ao serem manuseados.

Determinação do Rendimento gravimétrico

Após o esfriamento, o carvão obtido foi pesado e determinado o rendimento gravimétrico com o emprego da seguinte equação:

$$R_g = (M_a/M_n)100\%. \quad (5)$$

Em que: R_g = Rendimento gravimétrico (%); M_C = Massa de carvão vegetal seco (g) e M_M = Massa de madeira seca (g).

Determinação do Poder Calorífico Superior (PCS)

O poder calorífico foi determinado utilizando-se análise de regressão, onde foi determinada a seguinte equação: $PCS = 0,3536 \times (\text{teor de carbono fixo}) + 0,1559 (\% \text{ materiais voláteis}) - 0,0078 (\% \text{ cinzas})$. Visando determinar a precisão desta equação, comparou-se o valor obtido do PCS por meio da equação, 4438,84 kcal/kg, com o PCS fornecido por uma bomba calorimétrica, 4568 kcal/kg, para esta espécie (valor obtido da literatura). O erro foi de 2,83%, valor bastante adequado para a pesquisa em questão.

Análise Imediata

Na análise química imediata da madeira ou do carvão vegetal, as amostras foram moídas e peneiradas, sendo que o material utilizado foi obtido após o peneiramento, com granulometria entre 40 e 60 mesh. A análise química imediata do combustível consiste na determinação das suas características em termos de:

Materiais voláteis (%)

A porcentagem de voláteis é determinada como a perda de massa a 600

°C, sob condições específicas e por meio da fórmula: Teor de materiais voláteis (%) = $[(A-B)/A] \times 100$, onde A = massa do combustível seco em estufa a 105 °C, usando o mesmo procedimento da determinação do teor de umidade e B = massa do combustível após tratamento a 600 °C. Colocou-se 1,0 g de serragem de madeira, isento de umidade em um cadinho com tampa, previamente seco e tarado em uma mufla aquecida a 600 °C, por dez minutos de acordo com a norma ASTM Standard E711-87 (2004).

Carbono fixo (%)

A determinação do carbono fixo é feita por diferença material volátil e cinzas de 100%. O combustível pode ser considerado como sendo constituído, em termos de análise química imediata, de três partes: carbono fixo, materiais voláteis e cinzas. O carbono fixo pode ser definido como a quantidade de carbono presente no carvão vegetal ou na madeira após tratamento térmico. A quantidade de carbono fixo fornecido por unidade de madeira é função do teor de lignina. O teor de carbono fixo é uma medida indireta e foi calculado pela equação: Teor de carbono fixo em % = $100 - (\text{Teor de cinzas em \%} + \text{teor de materiais voláteis em \%})$

Rendimento Energético

O rendimento energético relaciona o rendimento em massa e o poder calorífico superior da madeira e carvão por meio da seguinte equação: $\text{Rendimento Energético} = \text{Rendimento em massa (gravimétrico)} \times (\text{PCS do carvão} / \text{PCS da madeira})$

Normas utilizadas para as análises

As amostras de serragem foram tratadas com etanol e água para determinação do teor de extrativos. O teor de cinzas foi determinado segundo a norma TAPPI T211 om-93 1985; o de lignina, pela norma TAPPI T222 om-98 modificada; e o de holocelulose, por diferença de 100% da soma dos teores de extrativos, cinzas e lignina. A análise imediata foi realizada seguindo a norma ASTM Standard E711-87 (2004); o teor de finos foi determinado como sendo a fração de partículas de carvão que passou por uma peneira de 10 mm.

Resultados e Discussões

De acordo com os resultados obtidos para a amostra de cinamomo (*Melia*

azedarach), tabela 1, observa-se um baixo coeficiente de variação, o qual indica uma boa precisão experimental. Observa-se, também, que o teor de extrativos foi de 3,21%, sendo compatível com os valores encontrados para esta espécie. O teor de cinzas foi de 0,51%, estando em concordância com os resultados apresentados na literatura por Fengel e Wegener (1984), que se referem à composição química da madeira de uma forma geral, englobando tanto folhosas quanto coníferas, cujo valor não ultrapassa 1%. A espécie em questão apresenta um alto teor de lignina, 34,66% e, por conseguinte, o teor de polissacarídeos (celulose + hemicelulose) foi de 61,74%, estando abaixo dos valores encontrados na literatura para uma folhosa que, em média, é de 65 a 75%.

Tabela 1- Resultados da análise química de cinamomo (*Melia azedarach*)

	Média	CV%	Valores da literatura*
Teor de cinzas (%)	0,51 ± 0,06	12,40	0,10 - 1,00
Teor de extrativos (%)	3,21 ± 0,63	19,62	2,00 - 18,00
Teor de lignina (%)	34,66 ± 0,62	1,78	20,00 - 25,00
Polissacarídeos (%)	61,74 ± 0,94	1,53	65,00 - 75,00

Fonte: Autores (2012).

Nota: Médias seguidas do valor do desvio padrão. * (Fengel;Wegener, 1984).

O baixo teor de cinzas (0,51%) é um bom indicativo para aplicação desta madeira como combustível. Geralmente, em aplicações como energético, indica-se a escolha de madeiras de baixo teor de inorgânicos, pois estes compostos quando presentes em grande quantidade favorecem a produção de um alto teor de cinzas na combustão. As cinzas contribuem, também, quando se utiliza uma grande quantidade de biomassa, para um

menor rendimento energético na queima, uma vez que o processo de fusão dos inorgânicos absorve parte da energia liberada. Para Vale et al. (2007), o teor de cinza está relacionado com a presença de quantidades e de qualidades diferentes de minerais presentes na biomassa. A lenha é um combustível muito utilizado em caldeiras e tem teor de cinzas em torno de 1%, o que é bom índice para não prejudicar caldeiras e fornalhas.

Altos teores de lignina e extrativos, bem como baixo teor de cinzas, tabela 1, aliados ao crescimento rápido desta espécie são características desejadas no uso desta madeira como combustível, uma vez que esses parâmetros determinam uma grande disponibilidade desta biomassa e uma maior quantidade de energia liberada em reações de combustão.

A madeira de cinamomo foi submetida à carbonização em duas temperaturas diferentes, 300 °C e 400 °C. A proporção entre os componentes voláteis e carbono fixo influencia as características de queima do combustível pelo fato de os componentes voláteis, quando aquecidos,

saírem do material e se queimarem rapidamente na forma gasosa, enquanto que o carbono fixo queima-se vagarosamente na fase sólida do carvão vegetal. A combustão por meio de chama faz com que unidades de calor se difundam em um espaço bastante amplo da região da queima. Tal comportamento é contrário ao que ocorre com o carbono fixo, que se queima na forma sólida, despreendendo energia em pontos mais próximos da região da combustão, permitindo a obtenção de altas intensidades de calor em pontos específicos.

Os resultados da análise imediata e rendimento gravimétrico dos carvões obtidos encontram-se na tabela 2.

Tabela 2 - Análise Imediata e Rendimentos

	Madeira	Carbonização 300 °C	Carbonização a 400 °C
Carbono fixo	15,73±0,06 a (0,39%)	67,60±1,47 b (2,17%)	75,35±1,64 c (2,18%)
Voláteis	83,36±0,06 a (0,07%)	31,48±1,46 b (4,62%)	23,73±1,67 c (6,83%)
Cinzas	0,51±0,06 a (12,4%)	0,76±0,18 a (23,53%)	0,69±0,05 a (6,96%)
Rendimento Gravimétrico	-	35,21±0,47 a (1,34%)	26,46±0,49 b (1,85%)
Rendimento Carbono fixo	-	23,80±0,32 a (1,34%)	19,94±0,37 b (1,85%)

Fonte: Autores (2012).

Nota: Todos os valores são seguidos do desvio padrão e respectivo coeficiente de variação. Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente ao nível de 5% de significância, utilizando o teste TUKEY.

Os dados de análise imediata indicam um teor de carbono fixo ascendente e, conseqüentemente, um teor de voláteis descendente com o aumento da temperatura de carbonização, com um ganho no teor de carbono fixo de 329,75% para a amostra carbonizada a 300 °C e de 379,02% para a carbonizada a 400 °C. Com relação ao teor de voláteis, observa-se uma diminuição da

ordem de 62,24% na carbonização à 300 °C e 71,53% na de 400 °C. Todas as amostras apresentaram teores de cinzas abaixo de 1% e não há diferença estatística entre os valores ao nível de 5% de significância.

Para qualificar a matéria-prima para fins energéticos, o rendimento em carbono fixo é um parâmetro importante. Segundo Andrade (1989), quanto maior

for o rendimento em carbono fixo, melhor será a qualidade da biomassa para utilização energética. O rendimento em carbono fixo apresentou, respectivamente, 23,80% e 19,94%, demonstrando diferença estatística ao nível de 5% de significância.

O maior teor de carbono fixo ocorreu no material carbonizado à temperatura de 300 °C, porém o tratamento apresentou maior teor de materiais voláteis. Andrade e Carvalho (1998) ressaltaram que, com o aumento da temperatura máxima de carbonização, intensifica-se o processo de extração dos compostos volatilizáveis presentes na madeira quando esta é submetida à ação da energia térmica. Para a espécie em questão, o comportamento não foi o esperado, já que o teor de voláteis foi maior para a temperatura de 300 °C.

Para diversas variedades de Eucalipto, Brito e Barrichelo (1978) determinaram a variação de carbono fixo entre 10 e 25% e de materiais voláteis de 75 a 90%. Os valores apresentados para a espécie Cinamomo estão dentro da faixa determinada pelos mesmos autores.

Pelos dados de rendimento gravimétrico e rendimento em carbono fixo,

os resultados demonstram que o carvão a 300 °C apresentou melhores valores, com uma menor perda de massa bem como um maior conteúdo de carbono fixo quando comparado ao carvão produzido a 400 °C.

Para uma mesma espécie vegetal, quanto maior a temperatura máxima de carbonização menor o rendimento gravimétrico em carvão, resultado da maior emissão de gases nas maiores temperaturas de pirólise, em razão do maior tempo de exposição aos efeitos degradantes da energia térmica.

Em comparação com o estudo realizado por Trugilho e Silva (2001), que estudaram a influência da temperatura final na carbonização de Jatobá (*Hymenea courbaril* L.), foram encontrados valores superiores no rendimento gravimétrico em carvão em comparação com os rendimentos de *Melia azedarach*. Explica-se o fato, devido às características de cada espécie, que pode ter sido influenciado por diferenças entre os teores de lignina das espécies ou densidades básicas das mesmas. Tais fatores influenciam na produção e características do carvão vegetal.

Tabela 3 - Avaliação energética das amostras

	Madeira	Carbonização 300 °C	Carbonização a 400 °C
PCS (kcal/kg)	4438,84±2,78 a (0,06 %)	6891,19±70,05 b (1,02%)	7258,07±78,35c (1,08%)
Rendimento Energético (%)		54,66±0,73 a (1,34%)	42,83±0,79 b (1,85%)
Densidade (g/cm ³)	0,64±0,03 a (4,73 %)	0,34±0,01 b (2,66 %)	0,30±0,02 b (5,55 %)
Finos (%)	-	0,04±0,03 a (92,15%)	0,67±0,17 b (25,63%)

Fonte: Autores (2012).

Nota: Todos os valores são seguidos do desvio padrão e respectivo coeficiente de variação. Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente ao nível de 5% de significância, utilizando o teste TUKEY.

O poder calorífico representa a quantidade de calor liberado quando uma dada quantidade de combustível é queimada completamente. Os desta forma, observa-se pela tabela 3, um aumento gradual nos valores do PCS com o aumento da temperatura de carbonização, porém esses valores são acompanhados de uma queda no rendimento energético da ordem de 12%. A baixa no rendimento energético de 300 °C a 400 °C é explicada pela diminuição na densidade do carvão que, comparativamente à madeira de partida, foi de 46,88% e 53,13%, respectivamente. Observa-se, ainda, que o maior poder calorífico, por sua vez, está relacionado ao menor teor de cinzas e maior teor de carbono fixo.

O aumento da temperatura de carbonização produz um carvão mais friável, gerando um teor de finos dezesseis vezes maior. Desde a sua produção até o seu uso final, o carvão vegetal vai gerando finos. Um carvão que apresente mais de 30% de finos é considerado muito friável; entre 25 e 29% bastante friável; entre 15 e 24% friabilidade média; entre 10 e 15% pouco friável e menor que 10% muito pouco friável (Norma ABNT, 1986; MACHADO; ANDRADE, 2004). O carvão vegetal proveniente da madeira de Cinamomo apresentou um teor de finos inferior a 10%, para ambos os experimentos o teor de finos foi inferior a 1%. (Tabela 3) Segundo a norma, classifica-se o carvão como muito pouco friável.

Conclusões

Por meio da análise dos resultados obtidos neste estudo, pode-se concluir que a madeira de cinamomo (*Melia azedarach*) possui teor de extrativos de 3,21%. Apresenta alto teor de lignina (34,66 %) e baixos teores

de cinzas (0,51%) e holocelulose (61,74%). Altos teores de lignina associados a um baixo teor de cinzas, aliados ao crescimento rápido desta espécie sugerem um alto potencial de aplicação desta madeira para produção de energia, na forma de lenha ou seu derivado mais energético; o carvão vegetal.

Os resultados mostraram, também, que o carvão produzido a 300 °C apresenta propriedades bem diferentes do produzido a 400 °C, observando-se, respectivamente, um aumento no teor de carbono fixo de 67,60 a 75,35% para o carvão produzido a 300 e 400 °C, respectivamente, queda no teor de voláteis liberado de 31,48 (carvão produzido a 300 °C) a 23,73% (carvão produzido a 400 °C) e um aumento no PCS de 6891,19 a 7258,07 kcal/kg. O maior poder calorífico, por sua vez, está relacionado ao menor teor de cinza e maior de carbono fixo. A temperatura final da carbonização é determinante nas características e qualidade do material produzido.

O baixo teor de cinzas (0,51%) é um bom indicativo para aplicação desta madeira como combustível, estando dentro dos parâmetros esperados. Destaca-se a pouca friabilidade do combustível carbonizado, que demonstra a integridade, o que favorece o transporte, manuseio e reduz a perda de biomassa.

O carvão produzido a 300 °C é mais denso (0,34 g/cm³) que o produzido a 400 °C (0,30 g/cm³) e, em termos de rendimento, apresentou maiores valores tanto no que se refere ao rendimento gravimétrico, (35,21%), quanto ao rendimento em carbono fixo (23,80%) e um menor teor de finos (0,04%). Apesar do PCS do carvão produzido a 400 °C ser maior, o seu rendimento energético apresentou-se inferior, (42,83%) quando, comparado a carbonização a 300 °C (54,66%).

Referências

ASTM. American Society for Testing and Material. **Standard test method for gross calorific value of refuse-derived fuel by the bomb calorimeter**. West Conshohocken, PA, USA. E711-87, 2004.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Norma para ensaios de qualidade de carvão vegetal**. São Paulo, 1986. 40 p.

ANDRADE, A. M. de; CARVALHO, L. M. de. Potencialidades energéticas de oito espécies florestais do estado do Rio de Janeiro. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v.5, n.1, p. 24-42, 1998.

ANDRADE, A. M. de. **Influência da casca de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden no rendimento e qualidade de carvão vegetal**. 1989. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1989.

BRITO, J. O.; CINTRA, T. C. Madeira para energia no Brasil: realidade, visão, estratégia e demandas de ações. **Biomassa & Energia**, Viçosa, v. 1, n. 2, p. 157-163, 2004. RENABIO.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Características do eucalipto como combustível: análise química imediata da madeira e da casca. **IPEF**, v.16, p.63-78, 1978.

DOSSA, D.; SILVA, H. D.; BOLLOTE, A. F. J.; RODIGHIERI, H. R. Produção e rentabilidade do Eucaliptos em empresas florestais. **Comunicado Técnico 83**, Embrapa, 2002. 4 p.

FAO. Wood Energy. **Promoting sustainable energy systems**. Rome: Forest Products Division, 2003. 24 p.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood-chemistry, ultrastructure, reactions**. Berlin and New York: Walter de Gruyter & Co., 1984. 613 p.

GONÇALVES, F. G.; SILVA, A. G.; FERRARO, A. C.; COSTA, N. N. M.; SOUZA, R. A. B.; TOSATO, A. F. Captação de líquido pirolenhoso da carbonização da madeira de *Eucalyptus cloeziana* em forno rabo quente. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.5, n.2, p.232-237, 2010.

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. **Biomassa & Energia**, Viçosa, v. 1, n. 4, p. 353-363, 2004

MONTEIRO, M. A. Em busca de carvão vegetal barato: O deslocamento de siderúrgicas para a Amazônia. **Novos Cadernos NAEA**, v. 9, n. 2, p. 55-97, 2006. UFPA - Acre-PA ISBN 1516-6481.

RIBEIRO, M. A. **Cultivo do cinamomo (*Melia azedarach* L.) e perspectivas para o aproveitamento industrial.** Valença: IPEAL, 1973. 6 p. (Série Monografia, 7).

SANTIAGO, B. H. S.; PANNIRSELVAM, P. V. Estudo comparativo do uso do processo de pirólise e gaseificação para integração energética no ambiente rural na agroindústria do coco. In: BIENNIAL INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN ENERGY STUDIES, 4., 2004, Ribeirão Preto. **Biennial...** Ribeirão Preto, 2004. p. 24.

SCHNEIDER, P. R.; LONGHI, S. J.; FINGER, C. A. G. **Cultura do cinamomo (*Melia azedarach* L.).** Santa Maria: Centro de Pesquisas Florestais, CEPEF/FATEC, 1987. 23p. Série Técnica, número 01.

SEIXAS, F.; COUTO, L.; RUMMER, R. B. Harvesting short-rotation woody crops (SRWC) for energy. **Biomassa & Energia**, Viçosa, v. 3, n. 1, p. 1-16, 2006. RENABIO.

TRIANOSKI, R. **Avaliação do potencial de espécies florestais alternativas, de rápido crescimento, para produção de painéis de madeira aglomerada.** 2010. 262 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, J. R. M.; MORI, F. A.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M.; MENDES, L. F. B. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem em clones de *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, v.11, n.2, p.178-186, 2005.

TRUGILHO, P. F.; SIVA, D. A. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão de jatobá (*Hymenea courbaril* L.). **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 2, n. 1-2, p. 45-53, 2001.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; LINO, A. L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v.7, n.2, p.104-114, 2001.

VALE, A. T.; GENTIL, L. V.; GONÇALEZ, J. C.; COSTA, A. F. Caracterização energética e rendimento da carbonização de resíduos de grãos de café (*Coffea arabica* L.) e da madeira (*Cedrelinga catenaeformis* Duke.). **Cerne**, Lavras, v. 13, n. 4, p. 416 - 420, 2007.

VALE, A. T.; MOURÃO, M. A.; CARVALHO, C. M.; VEIGA, R. A. A. Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* hill ex-maiden e *Acacia mangium* willd em diferentes níveis de adubação. **Cerne**, Lavras, v.6, n.1, p.083-088, 2000.