

Artigo

Potencial Energético da Casca de Coco (*Cocos nucifera* L.) para Uso na Produção de Carvão Vegetal por Pirólise**Padilla, E. R. D.; Belini, G. B.; Nakashima, G. T.; Waldman, W. R.; Yamaji, F. M.****Rev. Virtual Quim.*, 2018, 10 (2), 334-345. Data de publicação na Web: 17 de abril de 2018<http://rvq.sbq.org.br>**Energetic Potential of Coconut Shell (*Cocos nucifera* L.) for Use in the Charcoal Production by Pyrolysis**

Abstract: The lack of a correct destination for the disposal of green coconut residues and their potential as biomass stimulates their use for energy purposes. Therefore, the aim of this work was investigate the energetic potential of the green coconut shell (*Cocos nucifera* L.) to charcoal production by pyrolysis. In order to obtain charcoal, samples the green coconut shell was submitted to pyrolysis at different temperatures: 300 °C (CP300), 350 °C (CP350), 400 °C (CP400), 450 °C (CP450) and 500 °C (CP500). The green coconut shell and the produced charcoal were characterized by: proximate analysis, higher heating value (HHV) and thermogravimetric analysis (TG). For the produced charcoal, their gravimetric and energy and fixed carbon yields were also determined. It was observed that with the increase of the pyrolysis temperature, there was a decrease in the volatile content (CP300 = 37.95% and CP500 = 14.94%), and consequently, increase in fixed carbon (CP300 = 56.42% and CP500 = 79.39%) and HHV (CP300 = 28.84 MJ / kg and CP500 = 29.59 MJ / kg). The increase in temperature also caused a decrease in the gravimetric yield (CP300 = 48.05% and CP500 = 33.29%) and energy yield (CP300 = 66.50% and CP500 = 52.76%) and an increase in thermal stability. It can be concluded that the charcoal of the green coconut shell is an alternative for the energy reutilization of this residue and also can be used as commercial charcoal.

Keywords: Bioenergy; biomass; residues; pyrolysis.

Resumo

A falta de um destino correto para o descarte dos resíduos de coco verde e seu potencial como biomassa estimula sua utilização para fins energéticos. Este trabalho teve como objetivo investigar o potencial energético da casca de coco verde (*Cocos nucifera* L.) para produção de carvão vegetal através de estudo pirolítico. Para a obtenção do carvão vegetal, as amostras foram submetidas à pirólise, nas temperaturas de 300 °C (CP300), 350 °C (CP350), 400 °C (CP400), 450 °C (CP450) e 500 °C (CP500). A casca de coco e os carvões produzidos foram caracterizados mediante: análise imediata, poder calorífico superior (PCS) e análise termogravimétrica (TG). Para os carvões vegetais produzidos, foram também determinados seus rendimentos gravimétricos, energéticos e em carbono fixo. Observou-se que, com o aumento da temperatura de pirólise, houve a diminuição do teor de voláteis (CP300=37,95% e CP500=14,94%) e, conseqüentemente, aumento do carbono fixo (CP300=56,42% e CP500=79,39%) e PCS (CP300=28,84 MJ/kg e CP500=29,59 MJ/kg). O aumento da temperatura também provocou a diminuição do rendimento gravimétrico (CP300=48,05% e CP500=33,29%) e energético (CP300=66,50% e CP500=52,76%) e um aumento na estabilidade térmica. Pode-se concluir que o carvão vegetal da casca de coco verde é uma alternativa para o reaproveitamento energético desse resíduo e tem condições para ser utilizado como carvão vegetal comercial.

Palavras-chave: Bioenergia; biomassa; resíduos; pirólise.

* Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências e Tecnologias para Sustentabilidade, Campus Sorocaba, CEP 18052-780, Sorocaba-SP, Brasil.

✉ fmyamaji@ufscar.br

DOI: [10.21577/1984-6835.20180026](https://doi.org/10.21577/1984-6835.20180026)

Potencial Energético da Casca de Coco (*Cocos nucifera* L.) para Uso na Produção de Carvão Vegetal por Pirólise

Elias Ricardo D. Padilla, Gabriela B. Belini, Gabriela T. Nakashima,
Walter R. Waldman, Fabio M. Yamaji*

Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências e Tecnologias para Sustentabilidade,
Campus Sorocaba, Rodovia João Leme dos Santos, km 110, Bairro Itinga, CEP 18052-780,
Sorocaba-SP, Brasil.

* fmyamaji@ufscar.br

Recebido em 12 de fevereiro de 2018. Aceito para publicação em 15 de abril de 2018

1. Introdução

2. Material e Métodos

- 2.1. Coleta, preparação e caracterização das amostras de estudo
- 2.2. Produção e caracterização dos carvões vegetais produzidos
- 2.3. Rendimentos dos carvões produzidos
- 2.4. Análise termogravimétrica do material acondicionado e dos carvões produzidos
- 2.5. Análise estatística dos dados obtidos no estudo

3. Resultados e Discussão

4. Conclusão

1. Introdução

O Brasil apresenta vantagens climáticas e geográficas para a utilização de recursos naturais para uso energético.¹ Em 2016, as fontes renováveis representaram 41,2% da oferta interna de energia nacional. Embora a oferta de lenha e carvão vegetal venha diminuindo nos últimos anos, este tipo de fonte apresentou importante participação na matriz energética brasileira, com 8,2% da oferta interna de energia.² A lenha e os resíduos da produção agroindustrial podem ser utilizados como matérias-primas para a geração de calor e eletricidade. Mesmo com a liberação de CO₂ na queima, estes materiais

durante seu crescimento e desenvolvimento, promovem a fixação deste gás, representando menor dano ao meio ambiente.³

Segundo Goldemberg e Lucon,⁴ uma característica particular do Brasil é o desenvolvimento industrial em grande escala. Um bom exemplo disso é a produção de carvão vegetal utilizando plantações de eucaliptos como matéria-prima e sua aplicação na indústria siderúrgica. A utilização de biomassa para a produção de energia vem sendo amplamente explorada como alternativa renovável. Diante das alternativas energéticas, a biomassa tem se tornado um importante recurso renovável

devido a fatores atraentes como baixo custo de produção, baixas emissões de gases nocivos e independência sazonal, além de ser facilmente estocada e utilizada quando necessário.⁵

Segundo a Coordenação de Agropecuária (COAGRO) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE),⁶ para o ano de 2017, numa área total de 1.845 hectares plantada de coco-da-bahia no estado de São Paulo são esperados 23,44 milhões de frutos. Destes frutos (coco verde), 80% a 85% do seu peso bruto são representados pelas cascas.⁷ Esses resíduos são considerados de grande volume, geralmente provenientes do consumo da água de coco e podem gerar sérios problemas urbanos quando descartados em locais impróprios como lixões clandestinos. Estima-se que 70% de todos os resíduos gerados nas praias brasileiras sejam cascas de coco verde.⁸

Vários estudos foram realizados com o objetivo de caracterizar e avaliar a disponibilidade de biomassa para produzir carvão vegetal, incluindo estudos de viabilidade técnica e econômica e as perspectivas da indústria no Brasil.⁹⁻¹⁴ Trabalhos semelhantes já foram realizados em outras partes do mundo, principalmente focados na torrefação e carbonização de materiais como bambu, casca de coco e madeira.¹⁵⁻¹⁶ Mathieson *et al.*¹⁷ estudaram a utilização da biomassa como combustível alternativo na fabricação de ferro-gusa.

A produção de carvão vegetal geralmente é realizada por meio de pirólise (decomposição térmica na ausência de oxigênio) com temperaturas que variam entre 400 e 500 °C. Uma das desvantagens da pirólise da biomassa é o baixo rendimento, que não alcança os 40%.¹⁸ Visto que o processo precisa de melhorias, algumas técnicas poderiam ser aplicadas a fim de estudá-lo com maior precisão. As técnicas de

análise de termogravimetria (TG) e termogravimetria derivada (DTG) possibilitam a visualização do registro da perda de massa da amostra, quando submetida a um programa pré-estabelecido de aquecimento. A TG permite obter informações qualitativas das reações que ocorrem durante a pirólise. Parâmetros como composição química e razão de aquecimento podem ser comparados nesta análise.¹⁹

Este trabalho teve como objetivo geral investigar o potencial energético da casca de coco para produção de carvão vegetal através de estudo pirolítico de amostras em diferentes temperaturas. Os objetivos específicos foram avaliar o rendimento gravimétrico, energético e de carbono fixo dos carvões produzidos, além de verificar pela análise termogravimétrica o comportamento térmico e influência das diferentes pirólises nas propriedades do carvão vegetal produzido.

2. Material e Métodos

2.1. Coleta, preparação e caracterização das amostras de estudo

O material utilizado neste estudo foi a casca de coco verde (Fig. 1A) coletada na cidade de Sorocaba-SP. Após coleta, seleção e limpeza, o material foi pesado e secado de acordo com a norma ASTM E871-13,²⁰ utilizando uma estufa com circulação forçada de ar (marca Marconi MA-35). O material foi mantido nesta estufa a uma temperatura de 103 ± 2 °C, retirado e pesado periodicamente e repetido o tratamento térmico até atingir massa constante. Após secagem, o material foi cortado manualmente nas dimensões aproximadas de 2x1 cm (Fig. 1B) para produção do carvão vegetal por pirólise.

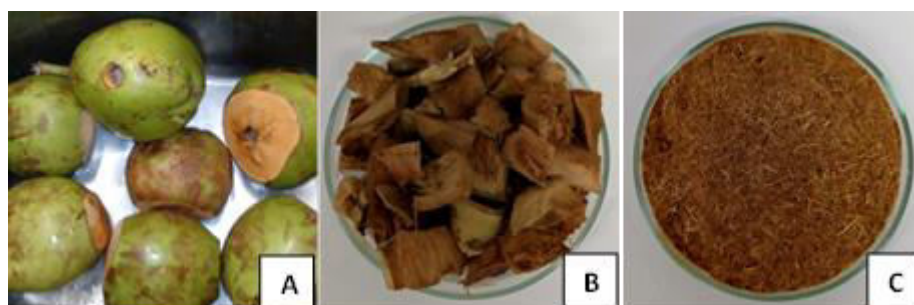


Figura 1. Amostra investigada: (A) casca de coco verde *in natura*; (B) casca seca em estufa em pedaços (CCS); (C) casca seca em estufa e triturada em moinho (material condicionado).

Uma amostra de 100 g do material preparado (Fig. 1B) por secagem em estufa ($103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$) foi triturada utilizando um moinho de facas tipo Willey (marca Marconi MA-340) e usada a granulometria inferior obtida (Fig. 1C) em peneira de 20 mesh (0,85 mm) para análise imediata e termogravimétrica.

Os procedimentos da análise imediata da casca de coco (material condicionado, Fig. 1C) foram realizados em triplicata e os cálculos realizados em base seca. O teor de voláteis foi feito de acordo com a norma ASTM E872-13,²¹ o teor de cinzas de acordo com a norma ASTM D1102-13²² e o carbono fixo (CF) foi calculado usando a Equação 1.

$$\text{CF} = 100 - (\text{C} + \text{V}) \quad \text{Eq. 1}$$

Onde: CF: teor de carbono fixo; C: teor de cinzas e V: teor de voláteis

2.2. Produção e caracterização dos carvões vegetais produzidos

Foram realizados cinco ensaios térmicos com as amostras secas em estufa a $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ e cortadas nas dimensões aproximadas de 2x1 cm (Fig. 1B), variando a temperatura de pirólise para a produção do carvão vegetal, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Amostras e tratamentos térmicos usados para a produção de carvão vegetal.

Amostras investigadas	Temperatura de pirólise aplicadas às amostras em ($^\circ\text{C}$)	Carvões produzidos (CPs) ou amostras pirolisadas
Casca de coco seca (CCS) em estufa a $103 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ e cortadas nas dimensões aproximadas de 2x1 cm	300	CP300
	350	CP350
	400	CP400
	450	CP450
	500	CP500

Pirólise das amostras - aproximadamente 20 g de cada amostra (CCS) usada em cada ensaio térmico foram inseridas em um recipiente metálico de massa conhecida. Em seguida, o conjunto (recipiente tampado com a amostra) foi introduzido em mufla (marca

Jung, modelo 0212) e aquecido na razão de $20 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$, da temperatura ambiente até a temperatura de pirólise, a qual foi mantida durante 3h. Após o aquecimento, o conjunto foi resfriado ao ar livre, pesado e os carvões produzidos (amostras pirolisadas)

transferidos para sacos de polietileno e fechados hermeticamente, para evitar alterações de propriedades em posteriores análises.

Caracterização dos carvões produzidos - Para os cinco tipos de carvão vegetal produzidos (CPs) das amostras investigadas (CCS) foram determinados os teores de voláteis, de cinzas e de carbono fixo de acordo com a norma ASTM D1762-13.²³ O poder calorífico superior (PCS) da casca de coco (material condicionado, Fig. 1C) e dos carvões vegetais produzidos (CPs; Tabela 1) foi obtido com o auxílio do calorímetro IKA modelo C200 de acordo a norma ASTM E711-04.²⁴

2.3. Rendimentos dos carvões produzidos

Os rendimentos gravimétricos (RG) foram calculados a partir das massas dos carvões produzidos (CPs, Tabela 1) e da massa das amostras secas (CCS) em estufa a 103±1°C (Fig. 1B), pela Equação 2.

$$RG = \frac{m_{CP}}{m_{CCS}} \times 100 \quad \text{Eq. 2}$$

Onde: RG: rendimento gravimétrico (%); m_{CP} : massa do carvão produzido (g); m_{CCS} : massa da amostra CCS (g).

Com os resultados da análise imediata do carvão vegetal (CPs, Tabela 1) e dos valores de RG (Eq. 2) foram calculados os rendimentos em carbono fixo, pela Equação 3.

$$RCF = RG \times CF_{CP} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde: RCF: rendimento em carbono fixo (%); RG: rendimento gravimétrico (%); CF_{CP} : carbono fixo do carvão produzido (%).

Com os valores de RG e de PCS dos materiais (material condicionado e CPs, Tab.1) foram calculados os rendimentos

energéticos (RE) de acordo com Park *et al.*²⁵ através da Equação 4.

$$RE = RG \times \frac{PCS_{CP}}{PCS_{acond}} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde: RE: rendimento energético (%); RG: rendimento gravimétrico (%); PCS_{CP} : poder calorífico superior do carvão produzido (MJ/kg); PCS_{acond} : poder calorífico superior da casca de coco (material condicionado, Fig. 1C) (MJ/kg).

2.4. Análise termogravimétrica do material condicionado e dos carvões produzidos

A estabilidade térmica foi analisada por termogravimetria (TG) e termogravimetria derivada (DTG) utilizando um analisador termogravimétrico (marca Perkin Elmer, modelo Pyris 1 TGA). Para as análises termogravimétricas foram utilizadas aproximadamente 20 mg de amostra (material condicionado – Fig. 1C ou carvão vegetal produzido – CPs, Tab. 1) em panela de platina sob atmosfera de nitrogênio de alta pureza com fluxo de 20 mL.min⁻¹. A razão de aquecimento foi de 20 °C.min⁻¹, no intervalo de 50 a 700 °C. Depois da análise o teor de resíduo obtidos em 700°C foi calculado a partir da massa do resíduo após análise e a massa da amostra utilizada, pela Equação 5.

$$R = \frac{m_r}{m_a} \times 100 \quad \text{Eq. 5}$$

Onde: R: teor de resíduo (%); m_r : massa do resíduo de amostra após análise (g); m_a : massa da amostra utilizada (g).

2.5. Análise estatística dos dados obtidos no estudo

As análises estatísticas foram realizadas com auxílio do programa Statgraphics versão 15.2.05 e Excel 2013. Foi aplicado o teste de Bartlett para verificar a homogeneidade dos dados. Foi utilizada a ANOVA para tratamento estatístico das médias dos ensaios. Foi aplicado o teste Tukey de comparação de médias. Para todas as análises foi considerado o nível de confiança

de 95% ($\alpha = 0,05$).

3. Resultados e Discussão

A Tabela 2 apresenta os resultados da análise imediata e poder calorífico superior da casca de coco (material condicionado, Fig. 1C) e dos carvões produzidos (CPs, Tab. 1).

Tabela 2. Análise imediata das biomassas investigadas (base seca)

Amostras investigadas	Voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono fixo (%)	PCS (MJ/kg)
Casca de coco	75,48±1,71 a	2,90 ± 0,39 a	21,61 ± 1,47 a	18,67±0,02 a
CP300	37,95±1,08 b	5,63±0,48 b	56,42±0,48 b	25,84±0,20 b
CP350	30,66±1,06 c	5,37±0,12 b	63,97±1,04 c	26,41±0,16 c
CP400	22,43±0,40 d	5,89±0,12 b	71,68±0,45 d	27,52±0,05 d
CP450	18,29±0,43 e	5,24±0,34 b	76,47±0,75 e	29,31±0,18 e
CP500	14,94±0,57 f	5,67±0,17 b	79,39±0,54 f	29,59±0,05 e

Onde: Casca de coco – material acondicionado; CP – cascas de coco pirolisadas (carvões produzidos; Tab. 1); Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 5,0% de erro no teste de Tukey.

A biomassa geralmente tem alto teor de voláteis.²⁶ Os resultados da análise imediata mostram que os voláteis representam a maior fração dos constituintes da casca de coco. Os valores são semelhantes aos encontrados na literatura (77,00%; 2,96%; 20,05% e 18,70 MJ/Kg) para os teores de voláteis, cinzas e carbono fixo e PCS, respectivamente.²⁷ Observou-se que a casca de coco (material acondicionado) apresentou menor teor de cinzas que os carvões produzidos. Este comportamento pode ser explicado pela remoção de materiais voláteis ocasionados pela carbonização (pirólise), aumentando a fração proporcional de elementos minerais (não volatilizados) na distribuição dos constituintes nos carvões. Os resultados estatísticos mostram que houve diferença entre os carvões produzidos nos

parâmetros avaliados (Tab. 2), com exceção do teor de cinzas.

Comparando os resultados da análise imediata da casca de coco (material acondicionado) com os carvões produzidos (Tab. 2) observa-se uma diminuição estatisticamente significativa no teor de materiais voláteis em todos os carvões produzidos. E, conseqüentemente, um aumento estatisticamente significativo no teor de carbono fixo, com o aumento da temperatura. Estas alterações são explicadas pela volatilização e degradação de constituintes da casca de coco devido ao aumento da temperatura de pirólise resultando em perda de massa. Após a pirólise, os carvões produzidos aumentam o teor em carbono e, por conseqüência, apresentam incremento no PCS. Esse

aumento do PCS foi estatisticamente significativo até a temperatura de 450 °C. Considerando apenas a análise do PCS, a temperatura ideal para a pirólise seria 450 °C, entretanto, outros parâmetros também devem ser analisados. Os resultados deste estudo são similares a outros da literatura

realizados sobre pirólises de biomassa e madeira.²⁸⁻³⁰

A Tabela 3 apresenta os rendimentos calculados: gravimétrico (RG), energético (RE) e em carbono fixo (RCF) para os carvões produzidos.

Tabela 3. Rendimentos percentuais dos carvões produzidos (gravimétrico, energético e em carbono fixo)

Carvões produzidos	RG (%)	RE (%)	RCF (%)
CP300	48,05±0,80 a	66,50±1,56 a	27,22±0,01 a
CP350	39,46±0,72 b	55,81±1,31 b	25,23±0,12 b
CP400	36,99±0,12 c	54,51±0,23 b	26,61±0,01 c
CP450	35,30±0,45 cd	55,39±0,32 b	27,12±0,14 a
CP500	33,29±0,22 d	52,76±0,22 b	26,54±0,15 c

Onde: CP – cascas de coco pirolisadas (carvões produzidos); Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 5,0% de erro no teste de Tukey

Os dados da Tabela 3 mostram que os rendimentos gravimétricos (RG) tiveram uma redução com o aumento da temperatura de carbonização (pirólise). Os resultados encontrados estão de acordo com estudos que realizaram pirólise em diferentes temperaturas utilizando casca de coco, palha de arroz e bagaço de cana-de-açúcar como matérias-primas.³¹⁻³² Esses trabalhos também

observaram que a temperatura final de pirólise é o parâmetro que mais influência no teor de carbono fixo e RG.

A Figura 2 apresenta o rendimento energético (RE), o rendimento gravimétrico (RG) e o carbono fixo em função das temperaturas de carbonização para os cinco carvões produzidos (CPs, Tab.2).

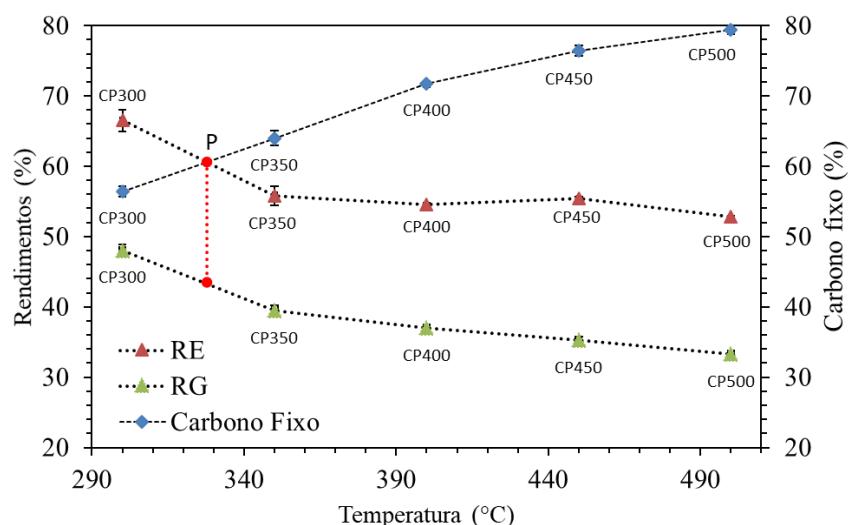


Figura 2. Análise do rendimento energético (RE), gravimétrico (RG) e carbono fixo em função da temperatura de carbonização (pirólise)

Comparando as tendências dos dados (Tabelas 2 e 3), de modo geral, há um aumento de carbono fixo e PCS conforme a elevação da temperatura de pirólise. Porém, quanto maior a temperatura, menor será o rendimento gravimétrico, o que é inversamente proporcional ao carbono fixo. Ainda, de acordo com a Fig. 2, observa-se que a partir de CP350 o rendimento energético permanece constante, diminuindo no CP500 devido ao seu baixo rendimento gravimétrico. Esse comportamento mostra que, considerando o rendimento energético, a melhor condição para a produção do carvão poderia ocorrer em temperaturas abaixo de 350 °C.

A Figura 2 mostra que a condição de pirólise mais adequada (ponto P) para a produção do carvão vegetal pirólítico (maior rendimento x teor de carbono fixo) encontra-se em 330 °C, ou seja, na intersecção entre o máximo de carbono fixo e o máximo de rendimento energético. A projeção do ponto P indica que nessa condição “teórica” de pirólise é possível produzir o carvão vegetal de casca de coco (CP330) com um rendimento gravimétrico e energético de 44 e 62% respectivamente. Com esses dados e o

PCS da casca de coco (material acondicionado, Tab. 2.) pode ser calculado o PCS de CP330 utilizando a Eq. 4 resultando no valor de 26,30 MJ/kg.

De acordo com Antal *et al.*³³ o uso final do carvão vegetal depende de sua qualidade. Por exemplo, para uso em metalurgia industrial, o carvão vegetal deve ter um teor de carbono fixo entre 85-90%, enquanto para uso residencial (cozinhar), um teor mínimo de matéria volátil entre 20-30% e máximo de 40%. O carvão vegetal de eucalipto produzido no estado de São Paulo pode ser considerado de boa qualidade, com teor de voláteis, cinzas, carbono fixo e PCS de 16,9%; 1,20%; 81,9% e 32,65 MJ/kg, respectivamente.³⁴ Verificou-se que o PCS de CP330 calculado pela Eq. 4 (26,3 MJ/kg), representa 80,5% do PCS do carvão comercial de eucalipto encontrado na literatura (32,65 MJ/kg). Dessa forma, o carvão vegetal de casca de coco (CP330) produzido na temperatura de 330 °C apresenta potencial para o uso residencial.

A Figura 3 apresenta as curvas termogravimétricas das amostras do material condicionado (Fig. 1C) e dos carvões produzidos (CPs; Tab. 2).

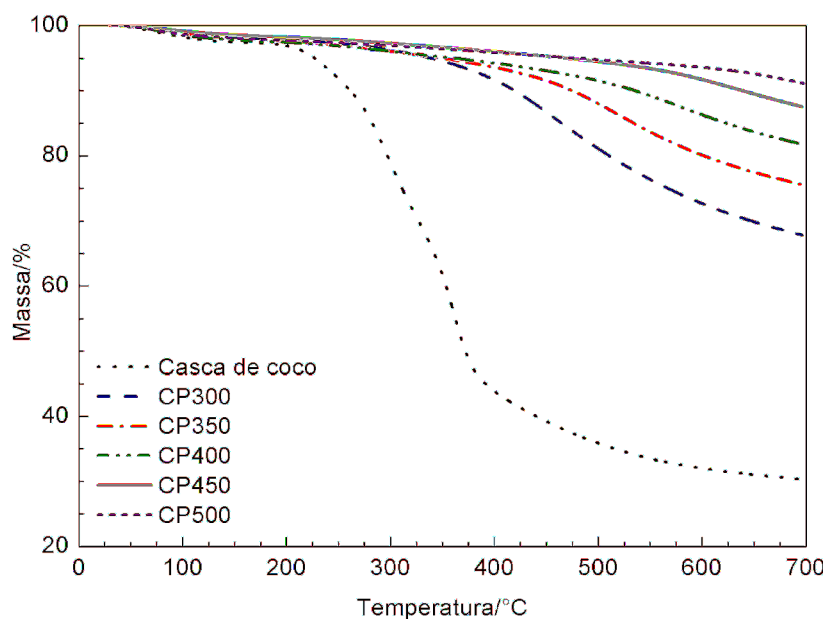


Figura 3. Análise comparativa das curvas TG das amostras investigadas

A decomposição térmica durante a pirólise da casca de coco (material acondicionado, Fig. 1C) e dos carvões produzidos (CPs, Tab. 2) são mostradas nas curvas de TG (Fig. 3), que fornece uma correlação entre a perda de massa do material analisado e a temperatura da pirólise. Comparando estas curvas termogravimétricas observa-se que o processo de pirólise melhora a estabilidade térmica dos carvões. Quanto maior a

temperatura de produção do carvão vegetal, menor é a porcentagem de perda de massa em atmosfera inerte a 700°C. O mesmo padrão foi observado por Santos *et al.*³⁵ ao estudar bio-carvão obtido a partir da pirólise de pellets de pinho em atmosfera de nitrogênio. A Tabela 4 apresenta as temperaturas de início de perda de massa, após a perda de água, para os carvões preparados (CPs, Tab. 2) a diferentes temperaturas e o resíduo obtido a 700 °C.

Tabela 4. Temperaturas de preparo dos diferentes carvões, de início de perda de massa e a diferença de temperatura entre estes dois processos

Amostras investigadas	Tp* (°C)	Ti*(°C)	ΔT^{***} (°C)	Resíduo a 700 °C (%)
Casca de coco	-	-	-	30
CP300	300	352	52	67
CP350	350	415	65	75
CP400	400	455	55	82
CP450	450	518	68	87
CP500	500	594	94	91

Onde: Casca de coco- material acondicionado; CP – cascas de coco pirolisadas (carvões produzidos);

*-Temperatura na qual foi preparado o carvão vegetal

**-Temperatura de início de perda de massa do processo principal, excluindo-se a perda associada à evaporação/ebulição da água.

***-diferença entre Ti e Tp

Apesar de sutil, há uma tendência de diminuição na quantidade de resíduos em função da temperatura de produção do carvão. Por exemplo, a diferença entre a porcentagem de resíduos dos carvões produzidos a 300°C (CP300 - 67% de resíduo) e 350°C (CP350 - 75% de resíduo) é de 8%. Para carvões produzidos a 450°C (CP450 - 87% de resíduo) e 500°C (CP500 - 91% de resíduo) a diferença é de 4%. Esta diferença na variação de resíduos em função do aumento na temperatura de produção do carvão é um indicativo que nos carvões em temperaturas menores (CP300) ainda há presença dos constituintes da biomassa (hemicelulose, celulose e lignina). Com o aumento da temperatura esses componentes são pirolisados, o que pode ser observado

nos carvões produzidos em maior temperatura (CP500), onde a presença de material que ainda pode ser degradado diminui, resultando na menor perda de massa.

A diferença entre a temperatura de preparo dos carvões e a temperatura em que há início de perda de massa é um indicativo da sua estabilidade térmica em ambientes com escassez de oxigênio (ΔT na Tabela 4). O carvão preparado a 500°C (CP500) apresentou a maior diferença de temperatura entre o início de perda de massa e a temperatura de seu preparo (94°C), indicando estabilidade da matéria que compõe o carvão. A Figura 4 apresenta as curvas derivadas das análises termogravimétricas.

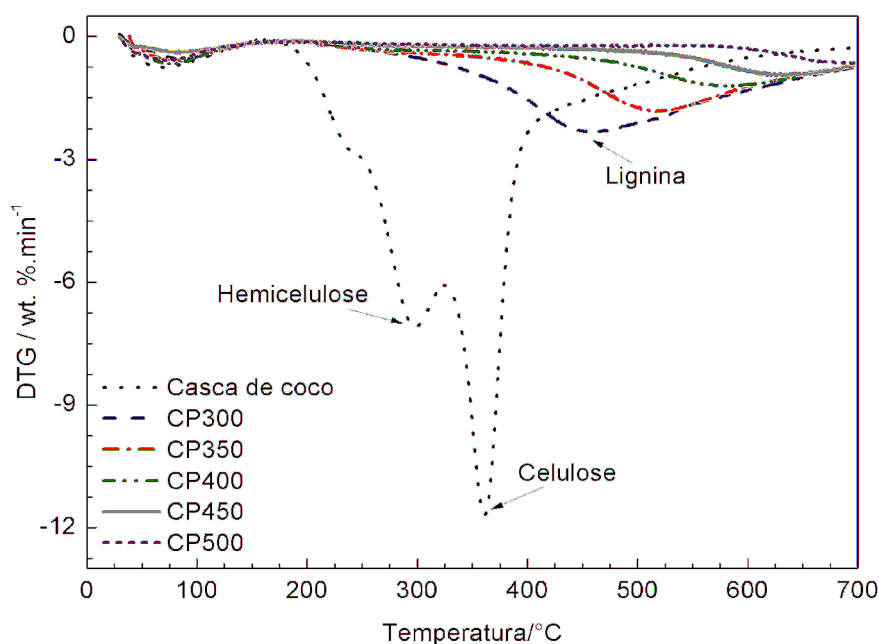


Figura 4. Análise comparativa das curvas DTG das amostras investigadas

Na Figura 4 podem ser observadas as temperaturas onde ocorrem as principais perdas de massa e as taxas de degradação máxima nos materiais estudados. Observa-se que a decomposição térmica da casca de coco (material acondicionado, Fig. 1C) acontece em duas etapas. A primeira perda de massa com uma degradação máxima em 297 °C pode ser devido à degradação da hemicelulose. Outra etapa é observada com a taxa de perda de massa máxima (11,68 %/min) em 360 °C, possivelmente associada à degradação da celulose.^{15,36,37} Observa-se que a decomposição térmica da casca de coco não apresentou o pico característico da degradação da lignina (após o pico duplo), admitindo-se que esse composto degradou junto com os outros constituintes. Segundo Yang *et al.*³⁸ a lignina degrada em uma ampla faixa de temperatura (160 a 900 °C) e o pico se sobrepõe ao da celulose.

A distribuição de pico duplo na curva de DTG da casca de coco descreve a degradação de constituintes diferentes da biomassa. Essa distribuição desaparece nas curvas de DTG dos carvões (CPs, Tab.2) devido à degradação prévia de alguns constituintes da biomassa durante a pirólise. Observa-se que o pico

característico da lignina nos carvões se torna mais definido e é deslocado para a direita à medida que a temperatura de pirólise aumenta.

4. Conclusão

De acordo com os resultados pode-se concluir que o carvão de casca de coco apresentou características necessárias para seu uso residencial. Assim, a casca de coco pode ser uma fonte de matéria-prima alternativa a madeira na produção de carvão vegetal. O ponto ótimo para a produção do carvão (maior rendimento x teor de carbono fixo) encontra-se em 330 °C, ou seja, a intersecção entre o máximo carbono fixo e o máximo rendimento energético.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio concedido pela CAPES, a Universidade Federal de São Carlos, e ao grupo de pesquisa Biomassa e

Bioenergia da UFSCar – Campus Sorocaba para a realização do trabalho.

Referências Bibliográficas

¹ Tolmasquim, M. T.; *Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear*. Empresa de Pesquisa Energética-EPE: Rio de Janeiro, 2016. [[Link](#)]

² Empresa de Pesquisa Energética-EPE. *Balço Energético Nacional 2016: Ano base 2015*. Rio de Janeiro, 2016. [[Link](#)]

³ Cassol, H. L. G.; Melo, L. C. de; Mendes, F. da S.; Fonseca, R.; Sanquetta, C. R. Redução de emissões de CO₂ pela produção de biocombustíveis a partir de óleo de dendê na Amazônia brasileira. *Revista Floresta* **2016**, *46*, 144. [[CrossRef](#)]

⁴ Goldemberg, J.; Lucon, O. Energia e meio ambiente no Brasil. *Estudos avançados* **2007**, *21*, 7. [[CrossRef](#)]

⁵ Hansted, A. L. S.; Nakashima, G. T.; Martins, M. P.; Yamamoto, H.; Yamaji, F. M. Comparative analyses of fast growing species in different moisture content for high quality solid fuel production. *Fuel* **2016**, *184*, 180. [[CrossRef](#)]

⁶ Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística- IBGE. *Levantamento Sistemático da produção Agrícola: pesquisa mensal de previsão e acompanhamento das safras agrícolas no ano civil*. Rio de Janeiro **2017**, *30*. [[Link](#)]

⁷ Rosa, M. F.; Santos, F. J. de S.; Montenegro, A. A. T.; Abreu, F. A. P. de; Correia, D.; Araújo, F. B. S. de; Norões, E. R. de V. Caracterização do pó da casca de coco verde usado como substrato agrícola. *Embrapa Agroindústria Tropical, Comunicado Técnico N° 54* **2001**, *1*. [[Link](#)]

⁸ Collares, D.; Paula, S. Propostas para o aproveitamento do potencial energético da casca do coco-verde. *Informativo da Embrapa – Agroenergetico, N° 63* **2015**. [[Link](#)]

⁹ Portugal-Pereira, J.; Soria, R.; Rathmann, R.; Schaeffer, R.; Szklo, A. Agricultural and agro-

industrial residues-to-energy: Techno-economic and environmental assessment in Brazil. *Biomass and Bioenergy* **2015**, *81*, 521. [[CrossRef](#)]

¹⁰ Paes, J. B.; Lima, C. R. de; Oliveira, E. de; Santos, H. C. M. dos. Rendimento e caracterização do carvão vegetal de três Espécies de ocorrência no semiárido brasileiro. *Revista Ciência da Madeira* **2012**, *3*, 01. [[Link](#)]

¹¹ Muylaert, M. S.; Sala, J.; Freitas, M. A. V. de. The charcoal's production in Brazil— process efficiency and environmental effects. *Renewable Energy* **1999**, *16*, 1037. [[CrossRef](#)]

¹² Piketty, Marie-Gabrielle; Wichert, M.; Fallot, A.; Aimola, L. Assessing land availability to produce biomass for energy: The case of Brazilian charcoal for steel making. *Biomass and Bioenergy* **2009**, *33*, 180. [[CrossRef](#)]

¹³ Andrade, A. M. de; Passos, P. R. de A.; Marques, L. G. da C.; Oliveira, L. B.; Vidaurre, G. B.; Rocha, J. das D. de S. Pirólise de resíduos do coco-da-baía (*Cocos nucifera* Linn) e análise do carvão vegetal. *Revista Árvore* **2004**, *28*, 707. [[CrossRef](#)]

¹⁴ Do Vale, A. T.; Barroso, R. A.; Quirino, W. F. Caracterização da biomassa e do carvão vegetal do coco-da-baía (*Cocos nucifera* L.) para uso energético. *Biomassa & Energia* **2004**, *1*, 365. [[Link](#)]

¹⁵ Chen, W. H.; Kuo, P. C. A study on torrefaction of various biomass materials and its impact on lignocellulosic structure simulated by a thermogravimetry. *Energy* **2010**, *35*, 2580. [[CrossRef](#)]

¹⁶ Liu, Z.; Han, G. Production of solid fuel biochar from waste biomass by low temperature pyrolysis. *Fuel* **2015**, *158*, 159. [[CrossRef](#)]

¹⁷ Mathieson, J. G.; Somerville, M.A.; Deev, A.; Jahanshahi, S. Utilization of biomass as an alternative fuel in ironmaking. Iron ore mineralogy, processing and environmental sustainability. *Metals and surface engineering*, Woodhead Publishing, Sawston 2015, 581. [[CrossRef](#)]

¹⁸ Lin, J. C. M. Development of a high yield and low cycle time biomass char production

- system. *Fuel Processing Technology* **2006**, *87*, 487. [CrossRef]
- ¹⁹ Campos, A. C. M. *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal de Lavras, 2008. [Link]
- ²⁰ American Society of Testing Materials - ASTM E871-13: Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels, West Conshohocken, PA, 2013. [Link]
- ²¹ American Society of Testing Materials - ASTM E872-13: Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels, West Conshohocken, PA, 2013. [Link]
- ²² American Society of Testing Materials - ASTM D1102-13: Standard Test Method for Ash in Wood, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013. [Link]
- ²³ American Society of Testing Materials - ASTM D1762-13: Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal, West Conshohocken, PA, 2013. [Link]
- ²⁴ American Society of Testing Materials - ASTM E711-04: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter, West Conshohocken, PA, 2004. [Link]
- ²⁵ Park, S. W.; Jang, C. H.; Baek, K. R.; Yang, J. K. Torrefaction and low-temperature carbonization of woody biomass: evaluation of fuel characteristics of the products. *Energy* **2012**, *45*, 676. [CrossRef]
- ²⁶ Demirbas, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science* **2004**, *30*, 222. [CrossRef]
- ²⁷ Rambo, M. K. D.; Schmidt, F. L.; Ferreira, M. M. C. Analysis of the lignocellulosic components of biomass residues for biorefinery opportunities. *Talanta* **2015**, *144*, 699. [CrossRef]
- ²⁸ Demirbas, A. Carbonization ranking of selected biomass for charcoal, liquid and gaseous products. *Energy Conversion and Management* **2001**, *42*, 1229. [CrossRef]
- ²⁹ Fagbemi, L.; Khezami, L.; Capart, R. Pyrolysis products from different biomasses: application to the thermal cracking of tar. *Applied energy* **2001**, *69*, 293. [CrossRef]
- ³⁰ Wannapeera, J.; Fungtammasan, B.; Worasuwannarak, N. Effects of temperature and holding time during torrefaction on the pyrolysis behaviors of woody biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* **2011**, *92*, 99. [CrossRef]
- ³¹ Tsai, W. T.; Lee, M. K.; Chang, Y. M. Fast pyrolysis of rice straw, sugarcane bagasse and coconut shell in an induction-heating reactor. *Journal of analytical and applied pyrolysis* **2006**, *76*, 230. [CrossRef]
- ³² Rout, T.; Pradhan, D.; Singh, R. K.; Kumari, N. Exhaustive study of products obtained from coconut shell pyrolysis. *Journal of Environmental Chemical Engineering* **2016**, *4*, 3696. [CrossRef]
- ³³ Antal, M. J.; Croiset, E. J.; Dai, X.; Almeida, C. de; Mok, W. S.; Norberg, N. High-yield biomass charcoal. *Energy & Fuels* **1996**, *10*, 652. [CrossRef]
- ³⁴ Dias Júnior, A. F.; Brito, J. O.; Andrade, C. R. Granulometric Influence on the Combustion of Charcoal for Barbecue. *Revista Árvore* **2015**, *39*, 1127. [CrossRef]
- ³⁵ Santos, L. B.; Striebeck, M. V.; Crespi, M. S.; Capela, J. M. V.; Ribeiro, C. A. De Julio, M. Energy evaluation of biochar obtained from the pyrolysis of pine pellets. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* **2016**, *126*, 1879. [CrossRef]
- ³⁶ Demirbas, A.; Arin, G. An Overview of Biomass Pyrolysis. *Energy Sources* **2002**, *24*, 471. [CrossRef]
- ³⁷ Ramiah, M. V. Thermogravimetric and differential thermal analysis of cellulose, hemicellulose, and lignin. *Journal of Applied Polymer Science* **1970**, *14*, 1323. [CrossRef]
- ³⁸ Yang, H.; Yan, R.; Chen, H.; Lee, D. H.; Zheng, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel* **2007**, *86*, 1781. [CrossRef]