



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas

**PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL DE BAMBU
(*Bambusa vulgaris*) COM A RECUPERAÇÃO DE LICOR
PIROLENHOSO E ALCATRÃO**

Clélio Dílson Lemos de Carvalho Jr

Cruz das Almas-Bahia
Dezembro/2010

Clélio Dílson Lemos de Carvalho Jr

PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL DE BAMBU (*Bambusa vulgaris*) COM A RECUPERAÇÃO DE LICOR PIROLENHOSO E ALCATRÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado junto ao curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Florestal. Área de concentração: Tecnologia da Madeira.

Orientador: Prof^o Dr. José Mauro de Almeida

Cruz das Almas-Bahia

Dezembro/2010

Clélio Dílson Lemos de Carvalho Jr

PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL DE BAMBU (*Bambusa vulgaris*) COM A RECUPERAÇÃO DE LICOR PIROLENHOSO E ALCATRÃO

Orientador: Prof^o Dr. José Mauro de Almeida

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - CCAAB

Membro Titular: Prof^o MSc. Claudia Marcia Gomes

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – CCAAB

Membro Titular: Prof^o Dr. Clair Rogério Cruz

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – CCAAB

Cruz das Almas-Bahia

Dezembro/2010.

*A meu pai, minha mãe,
meus irmãos de sangue e de coração.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e irmãos que, com seus inúmeros conselhos, me incentivaram a não desistir da profissão de Engenheiro Florestal, da qual agora eu faço parte.

Ao prof^o Clair Rogério Cruz, por todos seus ensinamentos e por sua paciência em saber passá-los.

Ao prof^o José Mauro de Almeida, por sua orientação.

A todos os professores da Engenharia Florestal, pelo aprendizado transmitido no decorrer deste curso.

A Léo, o rapaz que trabalha junto ao laboratório de tecnologia da madeira da UFRB, pela amizade criada ao longo da monografia, e por seu apoio técnico.

A meus colegas de curso, pelo companheirismo e pelo período em que estivemos juntos nas salas de aula.

PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL DE BAMBU (*Bambusa vulgaris*) COM A RECUPERAÇÃO DE LICOR PIROLENHOSO E ALCATRÃO

RESUMO

Uma das opções para atender a demanda de matéria-prima para o consumo doméstico é a utilização do carvão vegetal do bambu da espécie *Bambusa vulgaris* Schrad, conhecido popularmente como “bambu-verde”. Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o carvão vegetal da espécie *Bambusa vulgaris*, cultivada na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, no campus do município de Cruz das Almas – BA. Para isso, utilizou-se um colmo maduro do bambu, que foi colhido diretamente de uma touceira e em seqüência levado para o laboratório de tecnologia da madeira. No laboratório, o colmo foi transformado em cavacos, para a produção do carvão vegetal, através do processo de carbonização em um forno mufla adaptado, no qual também foi inserido um sistema de recuperação de gases condensáveis, para que fossem coletados o licor pirolenhoso e o alcatrão produzidos durante o processo. Foram realizadas 4 carbonizações, e os valores médios dos rendimentos gravimétrico, pirolenhoso e de alcatrão foram quantificados. Posteriormente, o carvão produzido foi moído, classificado, determinou-se o seu teor de umidade, realizou-se a análise química imediata do carvão. Os resultados médios são apresentados e mostram ser o produto viável para uso doméstico com possibilidade de recuperação dos subprodutos.

Palavras-chave: Produtos energéticos, bambu, licor pirolenhoso, alcatrão.

PRODUCTION OF BAMBOO'S CHARCOAL (*Bambusa vulgaris*) WITH THE PYROLIGNOUS AND TAR RECOVERY

ABSTRACT

One of the options to supply raw material demand for domestic consumption is the utilization of charcoal from bamboo, *Bambusa vulgaris* Schrad species, commonly known in Brazil as "green-bamboo". Thus, the present work is looking for evaluate the charcoal product from the *Bambusa vulgaris* species, cultivated in Federal University of "Recôncavo da Bahia", at the campus located in Cruz das Almas city, Bahia State, Brazil. For this purpose, mature bamboo's culm was used, reaped directly from the bush and subsequently brought to the wood technology laboratory. In the lab, the culm was transformed in chips, for the production of charcoal, through a carbonization process in an adapted mufla oven in which a system for the recovery of condensable gases was also inserted for the collection of pyrolignous yield and the tar produced during the process. Four carbonizations were performed, and the average results for gravimetric yield, pyrolignous and tar were, measured. After that, the charcoal produced was milled, classified, charcoal's humidity content, and immediate chemical analysis was performed. The average shows to be available for domestic use with possibility to recovery byproducts.

Key-words: energetic products, bamboo, pyrolignous, tar .

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Colmo do bambu transformado em cavacos.....	18
FIGURA 2: Adaptação do forno mufla para carbonização e condensação de gases condensáveis (A) e Compartimento de carregamento de madeira e saída da fumaça (B).....	18
FIGURA 3: Agitador de peneiras (A) e Peneiras de 20 e 100 mesh acopladas (B).....	20
FIGURA 4: Moinho utilizado no preparo das amostras (A) e Carvão moído (B).....	22
FIGURA 5: Forno mufla utilizado para análise química imediata.....	23

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Resultados dos valores de rendimentos gravimétricos de carvão vegetal, de licor pirolenhoso e de alcatrão obtidos de quatro carbonizações de amostras de colmo do bambu da espécie <i>Bambusa vulgaris</i>	23
TABELA 2: Resultados dos valores da análise química imediata do carvão vegetal obtidos de quatro carbonizações de amostras de colmo do bambu da espécie <i>Bambusa vulgaris</i>	25

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. Objetivo	10
2. REVISÃO DE LITERATURA	11
2.1. Aspectos gerais da cultura	11
2.2. O carvão vegetal do bambu	12
2.2.1. <i>Rendimento gravimétrico do carvão vegetal</i>	13
2.2.2. <i>Licor pirolenhoso e alcatrão</i>	13
2.2.3. <i>Umidade</i>	14
2.2.4. <i>Carbono fixo</i>	15
2.2.5. <i>Materiais voláteis</i>	15
2.2.6. <i>Cinzas</i>	16
3. MATERIAIS E MÉTODOS	17
3.1. Material experimental	17
3.2. Coleta do material	17
3.3. Carbonização da madeira em laboratório	17
3.3.1. <i>Preparação das amostras para carbonização</i>	17
3.3.2. <i>Carbonização e recuperação dos gases condensáveis</i>	18
3.4. Rendimento gravimétrico de carvão vegetal, de alcatrão e de licor pirolenhoso	19
3.5. Análise química imediata	19
3.5.1 <i>Teor de umidade do carvão moído</i>	20
3.5.2. <i>Teor de cinzas</i>	21
3.5.3. <i>Teor de matérias voláteis</i>	22
3.5.4. <i>Carbono fixo</i>	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
4.1. Rendimentos gravimétrico de carvão gevetal, de licor pirolenhoso e alcatrão	23
4.2. Análise do carvão vegetal	25
5. CONCLUSÃO	27
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores produtores e consumidores de carvão vegetal no planeta, ao contrário da maioria dos países industrializados, que ainda utiliza o carvão mineral. Geralmente são usadas como matérias-primas na fabricação do carvão vegetal madeiras de árvores plantadas do gênero *Eucalyptus*, também são utilizadas diversas espécies nativas por carência de plantios de florestas energéticas. Os carvões vegetais deste gênero são muito utilizados nas indústrias siderúrgicas, como termorreduzidor de minério de ferro para a produção de ferro gusa e de ligas metálicas bem como na produção de aço e de aços especiais bem assim como energético na indústria cimenteira. Outra aplicação bastante comum do carvão vegetal é no uso doméstico, nas pizzarias e nos fornos das churrasqueiras.

A espécie *Bambusa vulgaris*, conhecida vulgarmente como bambu-verde, também pode apresentar potencial para a produção do carvão vegetal. É de grande importância a pesquisa de viabilidade desta espécie como carvão vegetal no recôncavo baiano, já que grande parte do carvão utilizado para uso doméstico na região é proveniente de madeiras nativas.

Na região do recôncavo da Bahia, a espécie *Bambusa vulgaris* tem apresentado, ao longo de décadas, um bom crescimento e desenvolvimento. Há bastantes plantações espalhadas por vários lugares da região, inclusive na cidade de Santo Amaro, onde era matéria-prima na obtenção da celulose. Em Cruz das Almas, essa espécie já adquiriu uma grande importância cultural. Todos os anos, nos meses que antecedem a festa de São João, os bambus são usados (a parte dos colmos) na fabricação artesanal de fogos de artifício - as “espadas” - que movimentam boa parcela da economia da cidade no mês de junho. Sendo assim, o carvão do bambu pode ser uma alternativa de renda para os pequenos produtores da região que possuem bambuzais em suas propriedades.

1.1. Objetivo

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a espécie *Bambusa vulgaris* (bambu-verde) como uma alternativa para a produção de carvão vegetal, bem como o rendimento da recuperação de licor pirolenhoso e alcatrão.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Aspectos gerais da cultura

- Origem da matéria-prima

Segundo Hidalgo López (1974), citado por Costa (2008), o bambu é classificado como uma espécie não arbórea do reino vegetal pertencente à família das gramíneas, com aproximadamente 45 gêneros e mais de mil espécies espalhadas pelo mundo, sendo que atualmente a maior biodiversidade de bambu está localizada nos continentes Asiático, Americano e Africano. No Brasil, a maioria das espécies de bambus foi trazida pelos portugueses na época da colonização. Os portugueses introduziram as espécies tropicais sendo as mais comuns a *Bambusa vulgaris* (bambu-verde), *Bambusa vulgaris* variedade *wittata* (bambu imperial), *Bambusa tuldoides* (bambu comum), *Dendrocalamus gigantes* (bambu gigante ou bambu balde) e *Dendrocalamus latiflonnus*.

- Características gerais do bambu

O bambu é um material ecológico, leve, resistente, versátil e com excelentes características físicas, químicas e mecânicas, que lhe possibilitam milhares de aplicações ao natural ou processadas. Na prática serve como alimento humano e animal, biomassa energética para energia renovável e energia limpa, material de construção e matéria-prima industrial para vários setores, como o da cosmética, da medicina, celulose e papel, compósitos de madeira, além de também ser identificado como elemento de conservação e recuperação ambiental, principalmente para conter erosão. O bambu é uma planta que oferece muitas vantagens econômicas, tais como: rápido crescimento, perenidade, facilidade de estabelecimento, manutenção e colheita, pois não exige técnicas complexas para o seu estabelecimento como plantação. Pode ser utilizado como substituto agrônômico em áreas marginais, para otimizar produções que recebem mais atenção do mercado externo, substituindo a madeira em diversos aspectos (REMADE, novembro 2009).

- Propagação vegetativa

De acordo com Costa (2003), os tipos de bambus são classificados quanto ao crescimento de rizomas, ou seja, o bambu é uma planta rizonhosa, constituída por três estruturas básicas: uma área representada pelos colmos, e duas subterrâneas constituídas pelas raízes e rizomas.

Os bambus entouceirantes são conhecidos também como cespitoso e simpodial. Seus rizomas se denominam paquimorfos, por serem curtos e grossos, com internódios assimétricos, mais curtos que comprimidos, sólidos, com raízes em sua parte inferior. Os rizomas têm gemas laterais solitárias em forma de círculo ou de semi-esfera, que só se desenvolvem em novos rizomas e conseqüentemente em novos colmos. Os novos rizomas crescem horizontalmente por curta distância e logo seu ápice se volta para cima formando um colmo. As espécies entouceirantes são menos resistentes ao frio, não se desenvolvendo bem a baixas temperaturas, apresentando folhas queimadas devido a geadas provocando a morte dos brotos (COSTA, 2003).

O maior desenvolvimento vegetativo de bambus se observa em solos arenosos com elevado teor de matéria orgânica e boa drenagem, essencial para o ciclo de vida vegetativa de espécies tropicais. As chuvas, por sua vez, desempenham papel de grande relevância, pois o bambu é um grande consumidor de água e nutriente. Conforme dados científicos, o nível de precipitação pluviométrica para o desenvolvimento dos bambus varia de 1.300 a 1.400 mm por ano (COSTA, 2003).

2.2. O carvão vegetal do bambu

Conforme estudos realizados por Brito et al. (1987), citados por Souza (2008), o bambu tem possibilidades de se tornar uma opção alternativa na produção de carvão vegetal, por possuir semelhanças com as madeiras utilizadas na produção de carvões.

Manhães (2008), citando Ribeiro (2005), afirma que o poder calorífico do bambu é igual ou superior às espécies comumente usadas para a obtenção de carvão, como o *Pinus sp* e o *Eucalyptus sp*, e a sua alta capacidade de renovação caracteriza esta planta como uma importante fonte renovável de energia.

Em relação ao manuseio da madeira no processo de produção de carvão vegetal é necessário conhecimento, técnica, experiência e atenção do carbonizador em relação aos parâmetros de controle do processo. A qualidade do carvão vegetal depende de algumas

propriedades do material e de parâmetros de carbonização como: temperatura final, tempo de aquecimento, pressão, densidade, composição química, umidade e dimensões das peças. O processo na carvoaria se inicia na estocagem (secagem da madeira), preparação (seleção dimensional), carregamento do forno com a lenha (no caso da madeira) e manuseio da carga produzida (descarregamento) (SOUZA, 2008).

2.2.1. Rendimento gravimétrico do carvão vegetal

O rendimento gravimétrico é a relação entre o peso seco do carvão e o peso de madeira seca, expresso em porcentagem. Segundo Oliveira (1988), o rendimento gravimétrico apresenta correlação positiva com o teor de lignina total e o teor de extrativos, com a massa específica básica da madeira e correlação negativa entre largura e diâmetro dos lúmens e das fibras. Outros fatores importantes para o aumento do rendimento gravimétrico são: a temperatura máxima média e a taxa de aquecimento da carbonização. (OLIVEIRA, 1982a).

2.2.2. Licor pirolenhoso e alcatrão

Durante o processo de carbonização da madeira, o carvão é apenas uma fração dos produtos que podem ser obtidos. Caso sejam utilizados sistemas apropriados para a coleta, aproveitam-se os condensados pirolenhosos (fração pirolenhosa ou líquido pirolenhoso) e os gases não-condensáveis. A prática mais completa e eficiente é o aproveitamento do carvão vegetal, dos condensados e também dos gases incondensáveis da madeira, pelo processo de “destilação seca”, podendo ser implantada a partir da utilização de retortas, ao invés dos fornos convencionais. A fase líquida mais conhecida e que poderá ser utilizada na agricultura é o líquido pirolenhoso, denominada de extrato pirolenhoso, ácido pirolenhoso, vinagre de madeira, licor pirolenhoso, fumaça líquida e bioóleo. A carbonização da madeira é a principal fonte (CAMPOS, 2007).

De acordo com Pasa (1994), os processos utilizados para obtenção do alcatrão vegetal baseiam-se na condensação das fumaças expelidas pelos fornos durante a carbonização da madeira. O alcatrão, em virtude da sua composição, constituída basicamente por compostos fenólicos, creosoto e piche, pode ser utilizado como: combustível, preservativo de madeira ou ainda, como uma importante matéria-prima nas indústrias química e farmacêutica.

Pasa (1994) menciona que o alcatrão vegetal é uma mistura complexa contendo constituintes que possuem as mais variadas funções químicas, sendo que funcionam, mais comumente, como intermediários químicos em síntese orgânica. O termo alcatrão é utilizado para uma grande variedade de líquidos viscosos, de coloração preta ou marrom, obtidos da destilação destrutiva dos materiais orgânicos como carvão mineral, petróleo ou madeira. Sua composição química é complexa e constitui-se de uma mistura de composto fenólicos e não-fenólicos.

2.2.3. Umidade

Umidade pode ser definida como a medida de quantidade de água livre na biomassa e que pode ser avaliada pela diferença entre os pesos de uma amostra, antes e logo após ser submetida à secagem. É possível apresentar os valores de umidade em base seca ou em base úmida, conforme a condição de referência adotada (NOGUEIRA et al., 2000, citado por BARCELLOS, 2005).

O fato de a umidade ser colocada como uma característica técnica na produção de madeira para energia é porque, na maioria das vezes, é necessário que a madeira seja pelo menos parcialmente seca, antes de ser usada como fonte energética.

A presença de água na madeira representa redução do poder calorífico, em razão da energia necessária para evaporá-la. Além disso, se o teor de umidade for muito variável, o controle do processo de combustão pode se tornar difícil (COTTA, 1996, citado por BARCELLOS, 2005).

O elevado teor de umidade, além de estender o tempo de carbonização, reduz o rendimento gravimétrico ao consumir parte da carga da lenha para evaporar a água, o que reduz o rendimento em base seca. Logo se espera maiores rendimento ao se utilizar madeiras com teores de umidade baixos (VALENTE, 1986, citado por BARCELLOS, 2002).

O teor de umidade é um fator que influencia na friabilidade do carvão vegetal, ou seja, quanto maior o teor de umidade da matéria-prima maior é a quantidade de finos gerados, pois torna os carvões friáveis e quebradiços, gerando material particulado (carbono), também chamado de moinha. A umidade do carvão vegetal influencia nas propriedades de resistência mecânica (COSTA, 2004).

2.2.4. Carbono fixo

A fração "não evaporada" do carvão, descontado o teor de materiais minerais ("cinzas") e de materiais voláteis, é denominada de carbono fixo, e sofre combustão no estado sólido sem a formação de chama (BRITO, 1992). O rendimento em carbono fixo apresenta relação diretamente proporcional aos teores de lignina, extrativos e massa específica da madeira e inversamente proporcional ao teor de holocelulose. Por outro lado, o teor de carbono fixo apresenta correlação indireta com o rendimento gravimétrico (OLIVEIRA 1988).

Segundo Costa (2004), o teor de carbono fixo é função das temperaturas de carbonização que variam de acordo com a matéria-prima, que em sua estrutura apresentam átomos de carbono após a fase de degradação da fração gasosa e da fase da fração condensável. Quanto maior o teor de carbono fixo, maiores serão o poder calorífico e sua capacidade energética.

De acordo com Brito (1987), convém mencionar que a relevância do parâmetro carbono fixo é função da aplicação do produto sendo que, em geral, quanto maior o teor de carbono fixo, melhor a qualidade do carvão obtido. É o caso da produção de carvão ativado e uso doméstico. O carvão das espécies de bambu possibilita a obtenção de produtos com diferentes teores de carbono fixo, ampliando as possibilidades de emprego frente às diferentes condições de uso.

2.2.5. Materiais voláteis

De acordo com Carmo (1988), citado por Barcellos (2005), o teor de materiais voláteis é influenciado pela temperatura de carbonização, taxa de aquecimento e composição química da madeira, sendo a temperatura o principal parâmetro que regula os teores de materiais voláteis e carbono fixo do carvão.

Os resultados obtidos como materiais voláteis dão indicações das frações que sob condições padrões de temperatura, em geral entre 700 e 800 °C, serão eliminadas do carvão na forma gasosa, sofrendo em seguida combustão com formação de chama. Com o aumento da temperatura, a madeira passa a sofrer transformações através da eliminação maciça de produtos voláteis, e uma crescente concentração de material mais resistente à ação do calor (carbono fixo) no produto sólido residual (BRITO, 1992).

Segundo Costa (2004), os resultados da análise do teor de materiais voláteis são importantes para conhecer as fases gasosas, suas quantidades e tipos de gases que são

liberados e auxiliam na identificação das fases do processo e nas reações de combustão. Assim, em seu trabalho de viabilidade técnica do emprego da espécie *Bambusa vulgaris* como carvão vegetal, Costa (2004) pôde verificar vários fenômenos ocorrendo simultaneamente em distintas regiões no interior da estrutura do *Bambusa vulgaris* e do *Eucalyptus urophylla* quando submetidas a diferentes temperaturas. A faixa até 200 °C caracteriza-se pela produção de gases não combustíveis, tais como, vapores d'água; na faixa de 200 °C a 400 °C observa-se reações exotérmicas; e na faixa de 600°C o carvão está totalmente formado.

2.2.6. Cinzas

Os minerais presentes na madeira são importantes do ponto de vista energético pois podem, quando queimados em fornalhas, caldeiras etc., formar incrustações nos equipamentos e nas tubulações. O teor de minerais da madeira, usualmente expresso como teor de cinzas, corresponde, em geral, a menos de 1% com base na madeira absolutamente seca. Muitos desses minerais encontram-se presentes em combinação com compostos orgânicos, e os complexos formados desempenham funções fisiológicas. Os principais minerais encontrados são cálcio, magnésio, fósforo e silício. Em algumas espécies, principalmente na casca, o teor de cinzas é elevado.

A casca contém de 2-5% de sólidos inorgânicos, base peso seco da casca (determinado como cinzas). Os principais sais que existem na madeira são carbonatos de metais alcalinos e alcalino-terrosos, os quais constituem mais de 80% das cinzas. Os metais estão presentes na forma de vários sais, incluindo oxalatos, fosfatos, silicatos etc. Alguns deles estão ligados a grupos de ácidos carboxílicos das substâncias da casca. O potássio e cálcio são metais predominantes. A maioria do cálcio ocorre como cristais de oxalato de cálcio, depositados nas células do parênquima axial. Os fosfatos estão presentes na forma de éster e têm papel ativo no metabolismo, logo se concentram nas zonas meristemáticas. A sílica ou ocorre combinada aos carboidratos, formando ésteres, ou se deposita como cristais. A casca também contém traços de elementos como boro, cobre e manganês (ANDRADE, 1989).

Em um estudo realizado por Brito e Barrichelo (1978), pôde-se verificar que a quantidade de cinzas produzidas na casca é de 300% a 2.000% maior que no lenho. É nas cinzas que está presente a maioria dos minerais da madeira.

O teor de cinzas determinado na análise representa o material que não foi queimado, permanecendo no local do processo, porque as cinzas não são combustíveis. No

caso do carvão vegetal, o teor de cinzas é sempre baixo, em relação aos teores de materiais voláteis e carbono fixo, a sua maior influência esta como catalizador na reação de C - CO₂ (COSTA, 2004).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Material experimental

Foram utilizados, para a presente pesquisa, colmos de bambus da espécie *Bambusa vulgaris* provenientes de um plantio situado na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), localizada no município de Cruz das Almas, BA.

3.2. Coleta do material

O experimento foi realizado no Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, campus de Cruz das Almas.

Para o encaminhamento da pesquisa, foram coletados colmos maduros de bambu da espécie *Bambusa vulgaris* (bambu-verde), no campus da universidade. Em seguida o bambu foi levado ao laboratório de tecnologia da madeira do setor florestal do campus, onde foi preparado para as etapas seguintes.

3.3. Carbonização da madeira em laboratório

3.3.1. Preparação das amostras para carbonização

Para o procedimento de carbonização, os colmos foram cortados em pedaços de 10 cm com o auxílio de uma serra fita e, em seguida, fragmentados em cavacos (Figura 1), com o uso de uma machadinha. Os cavacos foram secos ao ar livre, até que atingissem a umidade de equilíbrio de 15% com o ambiente. Após atingir a umidade de equilíbrio, os cavacos foram acondicionados em saco de polietileno para os testes posteriores.



Figura 1 – Colmo do bambu transformado em cavacos

3.3.2. Carbonização e recuperação dos gases condensáveis

A carbonização foi realizada em um forno elétrico mufla adaptado (Figura 2A). Os cavacos foram inseridos em uma caixa metálica (Figura 2B), conectada com um sistema de recuperação, que funcionou por meio de condensadores, onde a fumaça canalizada foi resfriada, promovendo a condensação e recuperação de licor pirolenhoso e alcatrão.

A taxa de aquecimento foi de 2 °C por minuto, a temperatura inicial foi de 100°C e a temperatura máxima foi de 450°C, na qual permaneceu estabilizada por um período de 30 minutos. O tempo total de cada carbonização foi de quatro horas e meia. O teor de umidade da madeira foi determinado com base no seu peso seco, antes das carbonizações, para que se soubesse o peso seco real de madeira utilizado.

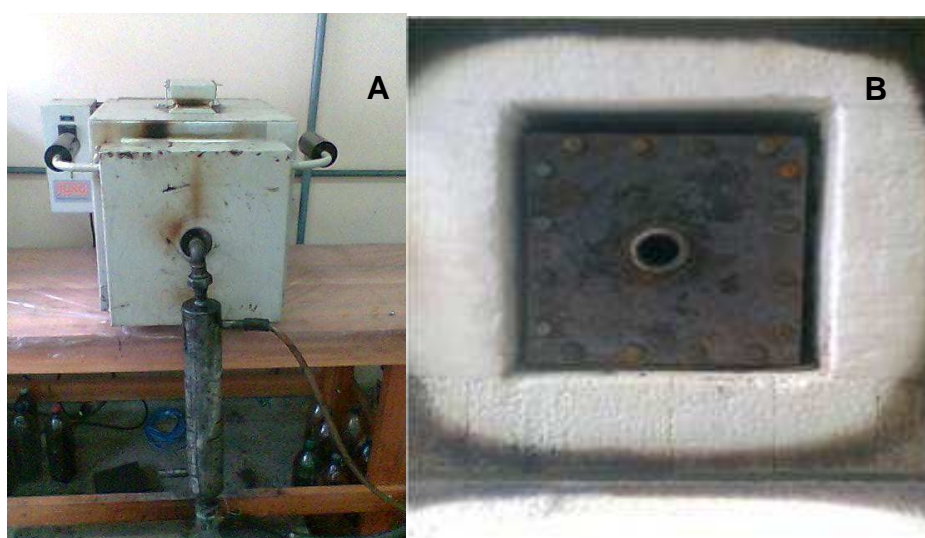


Figura 2: Adaptação do forno mufla para carbonização e condensação de gases condensáveis (A) e Compartimento de carregamento de madeira e saída da fumaça (B).

3.4. Rendimento gravimétrico de carvão, de alcatrão e de licor pirolenhoso

O rendimento gravimétrico foi determinado pela relação entre o peso seco de carvão e o peso a.s. (absolutamente seco) de madeira, dado por:

$$RG = \frac{psc}{psm} \times 100$$

sendo:

RG = Rendimento gravimétrico de carvão, (%);

psc = peso seco do carvão, (g); e

psm = peso a.s. da madeira, (g).

Os rendimentos gravimétricos de alcatrão e licor pirolenhoso foram determinados utilizando-se o peso dos respectivos líquidos e o peso de madeira seca de cada carbonização e foram calculados, respectivamente, conforme a seguir:

$$RA = \frac{pA}{psm} \times 100 \quad \text{e} \quad RLP = \frac{pLP}{psm} \times 100$$

sendo:

RA = Rendimento de alcatrão, (%);

RLP = rendimento de licor pirolenhoso, (%);

pA = peso do alcatrão, (g);

pLP = peso do licor pirolenhoso, (g); e

psm = peso a.s. de madeira, (g).

3.5. Análise química imediata

Os procedimentos adotados para a análise química imediata foram realizados seguindo as normas ABNT NBR 8112/83. De cada carbonização foi retirada uma amostra de carvão que foi moído e depois peneirado e classificado nas peneiras de 20 e 100 mesh (Figura 3A e B). Foi utilizado o material retido na peneira de 100 mesh para as análises.



Figura 3: Agitador de peneiras (A) e Peneiras de 20 e 100 mesh acopladas (B).

3.5.1. Teor de umidade

a – Umidade da madeira

Foram retiradas quatro amostras de cavacos do colmo do bambu, inseridas em um béquer previamente tarado, e depois pesadas em balança analítica de 0,1g de precisão. As amostras foram secas em estufa a 105 ± 2 °C e pesadas novamente após secagem. O teor de umidade das amostras foi dado por:

$$TU = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100$$

sendo:

TU = Teor de umidade, (%)

M_0 = massa inicial, (g)

M_1 = massa seca, (g)

b- Umidade do carvão

Foram retiradas amostras do carvão peneirado e classificado em peneiras de 20 e 100 mesh. O material retido na peneira de 100 mesh foi pesado, seco em estufa a 105 ± 2 °C e

pesado novamente após secagem. As amostras foram pesadas em uma balança analítica de precisão 0,0001g. O teor de umidade foi dado por:

$$TU = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100$$

sendo:

TU = Teor de umidade, (%)

M₀ = massa inicial, (g)

M₁ = massa seca, (g)

3.5.2. Teor de cinzas

Utilizou-se 1 grama a.s. (absolutamente seco) do carvão moído, colocado em cadinhos de porcelana, previamente tarados, e levados à mufla, aquecida a uma temperatura de 750 °C e mantida até a queima completa do carvão, em torno de 4 horas. Em seguida os cadinhos foram colocados em dessecadores, com sílica gel em seu interior, até o resfriamento, e depois foram pesados. Os teores de cinzas foram obtidos através da equação:

$$CZ = \frac{m_0}{m_1} * 100$$

Onde:

CZ = Teor de cinzas, (%);

m₀ = peso de cinzas, (g); e,

m₁ = peso a.s. de carvão moído, (g).



Figura 4: Moinho utilizado no preparo das amostras (A) e Carvão moído (B).

3.5.3. Teor de matérias voláteis

Utilizou-se 1 grama a.s. de carvão moído que foi colocado em cadinhos de porcelana previamente tarados. Os cadinhos foram fechados com tampas e colocados na porta da mufla a uma temperatura de 950 °C por 3 minutos, depois os mesmos foram colocados dentro da mufla por um período de 7 minutos. A equação para obtenção do teor de materiais voláteis foi:

$$MV = \frac{m_0}{m_1} * 100$$

sendo:

MV = Materiais voláteis, (%);

m_0 = peso do material volatilizado, (g); e,

m_1 = peso a.s. do carvão, (g)



Figura 5: Forno mufla utilizado para análise química imediata.

3.5.4. Teor de Carbono fixo

O teor de carbono fixo é uma medida indireta, calculada de acordo com a equação abaixo:

$$CF = 100 - (CZ + MV)$$

Onde:

CF = Teor de carbono fixo, (%)

Cz = Teor de cinzas, (%)

MV = Teor de materiais voláteis, (%)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Rendimentos gravimétricos de carvão vegetal, de licor pirolenhoso e de alcatrão

As médias gerais dos rendimentos gravimétrico, de licor pirolenhoso e de alcatrão podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados dos valores de rendimentos gravimétricos de carvão vegetal, de licor pirolenhoso e de alcatrão obtidos de quatro carbonizações de amostras de colmo do bambu da espécie *Bambusa vulgaris*.

Rendimento Gravimétrico, %	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Média	Desvio Padrão
Carvão Vegetal	28,65	29,53	29,64	28,50	29,08	0,51
Licor pirolenhoso	41,60	37,20	35,95	36,45	37,82	2,27
Alcatrão	5,25	5,58	5,48	4,98	5,32	0,23

De acordo com os resultados obtidos, o valor médio do rendimento gravimétrico do carvão vegetal de bambu da espécie *Bambusa vulgaris* foi de 29,08%, semelhante aos 29,6% encontrados por Brito (1987) para a mesma espécie, com temperatura final de 550°C. Essa semelhança de rendimentos em carvão, a diferentes temperaturas de carbonização, pode ser atribuída ao material genético do colmo da amostra de bambu utilizada, sua idade e localização geográfica.

Costa (2004) obteve rendimento em carvão de 32,54% também para a mesma espécie, contudo a temperatura máxima média empregada na carbonização foi de 400°C. À medida que a temperatura, no trabalho desenvolvido por Costa (2004), aumentou de 600°C a 800°C, foram encontrados rendimentos inferiores em carvão de 25,30% e 23,02%, respectivamente. Essa diminuição dos rendimentos em face ao aumento da temperatura pode ser atribuída, entre outros fatores, à saída de materiais voláteis contidos inicialmente no carvão. Trugilho et al. (2005) encontraram para clones de *Eucalyptus spp.* valor médio de 36,13% a 450°C, sendo, portanto, superiores às médias do carvão vegetal obtidas de *Bambusa vulgaris*. Apesar disto, existem outros parâmetros que devem ser levados em consideração à comparação entre os rendimentos em carvão encontrados para estas espécies, como a produtividade silvicultural, ou seja, quantidade de biomassa que essas espécies rendem por hectare. Conforme Costa (2004), a biomassa do bambu depende da espécie botânica, da qualidade do solo, do tipo do solo, do clima, entre outros fatores. A produtividade do bambu pode variar entre 50 a 100 ton/ha/ano, dependendo da espécie e condições locais. Há que também acrescentar que o bambu possui alta taxa de crescimento, estando viável para o corte aos três anos de idade. Além disso, apresenta alto poder de rebrota e ciclo de corte curto (de três em três anos), podendo ser cortado por muitas vezes, sem a necessidade de replantios.

O rendimento médio do licor pirolenhoso foi de 37,82%. Segundo Colombo (2006) e colaboradores, citando Pimenta (2002), uma fração do licor pirolenhoso é constituída de alcatrão solúvel, com uma porcentagem média de 5%. Brito (1987) obteve, na pesquisa de produção e caracterização do carvão vegetal de cinco espécies e variedades de bambu, para *Bambusa vulgaris*, um rendimento de 33% e para o *Eucalyptus urophylla*, 49,9%, utilizando temperatura final de 550°C. Essa inferioridade do rendimento de licor pirolenhoso encontrado por Brito (1987) não se explica pela temperatura de tratamento usada, porquanto, segundo Costa (2004), o licor pirolenhoso é recuperado a uma faixa de temperatura de 280°C e 500°C. Acima dos 500°C o carvão vegetal já está formado.

Uma das importâncias da recuperação dos gases condensáveis no processo de carbonização é a minimização do impacto ambiental na atmosfera causado pelo lançamento dos gases produzidos. Outra vantagem da recuperação do licor é que ele pode ser usado na agricultura, como controlador de pragas e adubo orgânico.

O rendimento em alcatrão foi de 5,32%. Foi inferior quando comparado com o rendimento médio de alcatrão relatado por Ferreira (2010) para a espécie *Corymbia citriodora*, de 6,7%. O alcatrão, constituindo uma parcela dos gases condensáveis no processo de carbonização, também contribui para uma atmosfera menos poluída. Ademais, em virtude de sua composição química, pode ser utilizado como: combustível, preservativo de madeira ou ainda, como uma importante matéria-prima nas indústrias química e farmacêutica (PASA, 1994).

4.2. Análise do carvão vegetal

De acordo com a Tabela 2, o teor de umidade do carvão vegetal da espécie *Bambusa vulgaris* apresentou um valor médio de 2,44%. Costa (2004) encontrou um valor médio de umidade de 0,87% para a mesma espécie e 1,98% para *Eucalyptus saligna* quando a temperatura de tratamento foi de 400°C. O teor de umidade é um fator que influencia na friabilidade do carvão vegetal, ou seja, quanto maior o teor de umidade da matéria-prima maior é a quantidade de finos gerados, pois torna os carvões friáveis e quebradiços, gerando material particulado (carbono), também chamado de moinha. A umidade do carvão vegetal influencia nas propriedades de resistência mecânica (COSTA, 2004).

Tabela 2 – Resultados dos valores da análise química imediata do carvão vegetal obtidos de quatro carbonizações de amostras de colmo do bambu da espécie *Bambusa vulgaris*. *

Variáveis %	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Média	DP
Umidade	3,28	3,24	2,30	0,97	2,44	0,94
Mat. Voláteis	17,83	16,88	16,18	16,17	16,76	0,68
Cinzas	4,42	4,28	4,46	4,03	4,29	0,17
Carbono fixo	77,75	78,84	79,36	79,80	78,94	0,76

* média de 03 repetições

O teor de materiais voláteis apresentou média de 16,76% e desvio padrão baixo entre as amostras. Costa (2004) encontrou valor médio superior, de 29,33%, para *Bambusa*

vulgaris, em temperatura de tratamento de 400°C. Esta diferença de valores se justifica pela temperatura de tratamento usada. Assim, quando o rendimento gravimétrico de carvão vegetal do presente trabalho foi de 29,08% à temperatura máxima média de 450°C, o rendimento em carvão relatado por Costa (2004) foi de 32,54% à temperatura de 400°C, explicando que, quanto menor a temperatura de carbonização, maior o rendimento gravimétrico, por, entre outros fatores, conter o carvão maior teor de materiais voláteis. Para clones de *Eucalyptus spp.* Trugilho et al. (2005) obtiveram valor médio de 31,33% para o teor de materiais voláteis, superior ao resultado encontrado para a espécie *Bambusa vulgaris* avaliada no presente trabalho.

O teor de cinzas, com média de 4,29%, foi superior aos 3,5% encontrados por Brito (1987) para a mesma espécie e superior aos 0,5% obtidos pelo mesmo autor para o carvão de *Eucalyptus urophylla* (vale ressaltar que a temperatura final de carbonização usada por Brito (1987) foi de 550°C). Essa significativa diferença entre os teores de cinza de *Bambusa vulgaris* e de *Eucalyptus urophylla* se deve à composição química do colmo de bambu, que apresenta elevadas porcentagens de sílica, conforme menciona Brito (1987), citando Tamolang et al. (1979). Segundo Barcellos (2002), o baixo teor de cinzas é um importante referencial para quando se utiliza o carvão para a produção de ligas metálicas.

O carbono fixo apresentou valor médio de 78,94%, inferior aos 86,3% encontrados por Brito (1987) para a mesma espécie, a uma temperatura final de 550°C. Essa inferioridade do teor de carbono fixo da presente pesquisa deveu-se à menor temperatura de carbonização (450°C), a qual fez com que menor quantidade de materiais voláteis fosse vaporizada no processo de carbonização e, conseqüentemente, maior teor de materiais voláteis fosse obtido na análise química imediata. Trugilho et al. (2010) encontraram teor médio de carbono fixo de 68,13% para clones de *Eucalyptus spp.*, inferior ao da presente pesquisa. Isso se justifica porquanto o carbono fixo apresenta uma correlação inversa ao rendimento gravimétrico. Assim sendo, segundo Brito (1987), há tendência para que os materiais que apresentam menor rendimento gravimétrico em carvão vegetal resultem em um produto com maior teor de carbono fixo. Ademais, o efeito do teor de carbono fixo no carvão vegetal é o de aumentar a produtividade do alto-forno, sendo que quanto maior a sua porcentagem, maior é a utilização volumétrica do mesmo.

No trabalho de Costa (2004) sobre o a viabilidade técnica do emprego do bambu da espécie *Bambusa vulgaris* como carvão vegetal, foram apresentadas as propriedades médias das características do carvão vegetal comercializado no Brasil para churrasco. A porcentagem de carbono fixo deve ser superior a 78%, e os materiais voláteis e cinzas devem

apresentar porcentagens máximas de 16% e 6%, respectivamente. Como na presente pesquisa os resultados médios encontrados na análise química imediata para o carvão vegetal de *Bambusa vulgaris* foram, para carbono fixo, 78,94%, materiais voláteis, 16,76%, e cinzas, 4,29%, pode-se concluir que a espécie apresenta potencial no emprego do seu carvão para churrasco (uso doméstico e comercial não industrial).

5. CONCLUSÃO

A partir da análise dos dados experimentais obtidos no presente trabalho, cujos valores médios para os teores de umidade, cinzas, materiais voláteis e carbono fixo foram, respectivamente, de 2,44%, 4,29%, 16,76% e 78,94%, pode-se concluir que a espécie *Bambusa vulgaris*, cultivada no campus de Cruz das Almas da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, tem possibilidades de se tornar uma alternativa na produção de carvão vegetal, principalmente para o uso doméstico e comercial não industrial. Na siderurgia, por possuir alto teor de cinzas, a espécie apresenta características inferiores à matéria-prima atualmente utilizada (*Eucalyptus spp.*). Quanto à recuperação dos gases condensáveis, com rendimentos de licor pirolenhoso e alcatrão de 37,82% e 5,32%, essa prática tende a ser essencial no futuro para o processo de carbonização, pois, entre outros fatores, há necessidade de se produzir energia menos poluente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARCELLOS, D. C.; **Forno container para produção de carvão vegetal: desempenho, perfil térmico e controle da poluição.** Tese – UFV, 2002

BARCELLOS, D. C. et al. **O estado-da-arte da qualidade da madeira de eucalipto para produção de energia : um enfoque nos tratamentos silviculturais.** *Biomassa & Energia*, v. 2, n. 2, p. 141-158, 2005

BRITO, J. O.; **Estudo das influências da temperatura, taxa de aquecimento e densidade da madeira de *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus citriodora* sobre os resíduos sólidos da pirólise.** Piracicaba, SP; agosto, 1992

CAMPOS, A. D. Técnicas para a produção de extrato pirolenhoso para uso agrícola. **Circular Técnica**, n. 65, Pelotas, dez. 2007

COLOMBO, S. de F. O; PIMENTA, A. S; HATAKEYAMA, K; **Produção de carvão vegetal em fornos cilíndricos verticais: um modelo sustentável.** XIII SIMPEP - Bauru, SP, Brasil, 6 a 8 de Novembro de 2006

COSTA, T. M. S. **Estudo da viabilidade técnica do emprego do bambu da espécie *Bambusa vulgaris* Shard. como carvão vegetal.** 2004. 74 p. Dissertação (Mestre em ciências na área de Tecnologia Nuclear-Materiais) – Autarquia associada à Universidade de São Paulo, São Paulo

FERREIRA, R. S. **QUALIDADE DA MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL DE *Corymbia citriodora* Hill & Johnson CULTIVADOS NA REGIÃO DO RECÔNCAVO DA BAHIA**, Cruz das Almas – Ba, 2010. Monografia – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Bahia

MANHÃES, A. P. **Caracterização da cadeia produtiva do bambu no Brasil: abordagem preliminar.** 2008. 39 p. Monografia – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro

MOIZÉS, F. A. **Painéis de Bambu, uso e aplicações: uma experiência didática nos cursos de Design em Bauru, São Paulo.** 2007, 116 p. Dissertação – Universidade Estadual Paulista, Bauru, São Paulo

OLIVEIRA, A.C.; CARNEIRO, A. C. O; VITAL, B. R; ALMEIA, W; PEREIRA, B. L. C; CARDOSO, M. T. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell.** Sci. For., Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-439, set. 2010

PASA, V. M. D. **Pinche de alcatrão de eucaliptos: Obtenção, caracterização e desenvolvimento de aplicações.** Belo Horizonte, UFMG. 227p. (Dissertação de Mestrado em Química) – Universidade Federal de Minas Gerais, 1994.

REVISTA DA MADEIRA. **Plantações energéticas de bambu.** Minas Gerais. Edição nº 121. Novembro, 2009

TRUGILHO, P. F. et al. ; **Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem de clones de *Eucalyptus*.** Cerne, Lavras, v. 11, n. 2, p. 178-186, abr./jun. 2005

