



**GREGÓRIO MATEUS SANTANA**

**RESÍDUOS DE BAMBU (*Bambusa vulgaris* Schrad.)  
PARA A PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO**

**LAVRAS – MG**

**2014**

**GREGÓRIO MATEUS SANTANA**

**RESÍDUOS DE BAMBU (*Bambusa vulgaris* Schrad.) PARA A  
PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração Madeira como Matéria-Prima, para obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Paulo Fernando Trugilho

Coorientadores

Dr. Juarez Benigno Paes

Dr. José Tarcísio Lima

**LAVRAS – MG**

**2014**

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Coordenadoria de produtos e  
Serviços da Biblioteca Universitária da UFLA**

Santana, Gregório Mateus.

Resíduos de bambu (*Bambusa vulgaris* Schrad.) para a produção de carvão ativado / Gregório Mateus Santana. – Lavras : UFLA, 2014.

60 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2014.

Orientador: Paulo Fernando Trugilho.

Bibliografia.

1. Aproveitamento de resíduos. 2. Tratamento de contaminantes do meio ambiente. 3. Carvão ativado. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 662.93

**GREGÓRIO MATEUS SANTANA**

**RESÍDUOS DE BAMBU (*Bambusa vulgaris* Schrad.) PARA A  
PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração Madeira como Matéria-Prima, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 18 de fevereiro de 2014.

Dr. Paulo Fernando Trugilho	UFLA
Dr. Juarez Benigno Paes	UFES
Dra. Maria Lúcia Bianchi	UFLA

Dr. Paulo Fernando Trugilho  
Orientador

**LAVRAS – MG**  
**2014**

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira (PPGCTM) e ao Depto. de Ciências Florestais (DCF) e Depto. de Química (DQI) da UFLA pela realização do mestrado e execução deste trabalho. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado.

A todos os professores da PPGCTM/UFLA, na qual poderia destacar o Prof. Dr. Paulo F. Trugilho, Profa. Dra. Maria L. Bianchi e Prof. Dr. José T. Lima pelas considerações e orientações recebidas durante este trabalho. Ao Prof. Dr. Fábio A. Mori pelas exigências e aprofundamento dos conteúdos desenvolvidos em sala de aula. Aos professores Dr. Paulo R. Gheradi Hein e Dr. Gustavo H. Denzin Tonoli pelas instruções sobre eficiência na prática científica.

Aos professores Dr. Carlos Roberto de Lima da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e Dr. Juarez Benigno Paes da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) pelos aprendizados, orientações e amizade construída.

Ao amigo M.Sc. William Miguel da Silva Borges (Will), pelas orientações e conhecimentos repassados em todas as etapas deste trabalho.

Ao doutorando João Rodrigo Coimbra Nobre pelas dicas repassadas e a doutoranda Alessandra de Souza Fonseca pelo auxílio nas análises de MEV.

À Empresa Celulose e Papel de Pernambuco S.A. (CEPASA), Grupo Industrial João Santos, pelo apoio logístico, coleta e envio do material de estudo.

A Deus, toda a minha família, minha namorada, amigos e a todos que contribuíram de forma direta ou indireta na realização deste trabalho.

## RESUMO

Resíduos de Bambu (*Bambusa vulgaris* Schrad.) foram utilizados como material precursor na produção de vários tipos de carvão ativado (CAs). Para a produção dos CAs foram aplicados dois tipos de ativações: 1) ativação física com dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e com vapor d'água ( $\text{H}_2\text{O}$ ); e 2) ativação química, com um sal (cloreto de zinco -  $\text{ZnCl}_2$ ), um ácido (ácido fosfórico -  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) e uma base (hidróxido de sódio -  $\text{NaOH}$ ). Os CAs obtidos foram caracterizados por análise elementar (CHNS), microscopia eletrônica de varredura (MEV), método titulométrico de Boehm (BOEHM) e área superficial por azul de metileno ( $S_{AM}$ ). Os materiais foram testados quanto à capacidade de adsorção de azul de metileno, fenol, íon  $\text{Cr}^{+6}$ . Todos os CAs obtidos apresentaram alto rendimento. Pela análise elementar, verificou-se, aumento dos teores de carbono e diminuição dos teores de oxigênio e hidrogênio. As morfologias dos CAs são diferentes entre si e variaram de acordo com o tipo de impregnação utilizada, do material precursor, carvão vegetal e CA comercial. Pelo método titulométrico de Boehm, verificou-se que os materiais ativado fisicamente apresentam menor acidez total que os ativado quimicamente, e que a ativação química elevou a quantidade de grupos carboxílicos. Os CA  $\text{ZnCl}_2$  e CA  $\text{H}_2\text{O}$  foram os mais eficientes na adsorção do azul de metileno. Os CA  $\text{ZnCl}_2$ , CA  $\text{CO}_2$ , CA  $\text{H}_2\text{O}$  e o CA  $\text{H}_3\text{PO}_4$  foram os melhores adsorventes para o fenol, enquanto apenas os CA  $\text{ZnCl}_2$ , CA  $\text{H}_3\text{PO}_4$  e CA comercial adsorveram o cromo hexavalente. O CA  $\text{ZnCl}_2$  foi o que apresentou maior área superficial ( $1319,16 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ). Os CAs apresentaram resultados iguais ou superiores ao CA comercial.

**Palavras-chave:** *Bambusa vulgaris* Schrad. Carvão ativado. Aproveitamento de resíduos. Tratamento de contaminantes do meio ambiente.

## ABSTRACT

Bamboo waste (*Bambusa vulgaris* Schrad.) were used as a precursor material in the production of various types of activated carbon (ACs). For the ACs production two types of activations were applied: 1) physical activation with carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and water vapor (H<sub>2</sub>O); and 2) chemical activation with a salt (zinc chloride - ZnCl<sub>2</sub>), an acid (phosphoric acid - H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) and a base (sodium hydroxide - NaOH). The ACs obtained were characterized by elemental analysis (CHNS), scanning electron microscopy (SEM), Boehm titration method (BOEHM) and surface area per methylene blue (S<sub>AM</sub>). The materials were tested for their ability to adsorb methylene blue, phenol and ion Cr<sup>+6</sup>. All ACs obtained showed high yield. By elemental analysis, it was found, increased of carbon levels and decrease of oxygen levels and hydrogen. The ACs morphology are different between them and varied according to the impregnation type used, the precursor material, charcoal and commercial AC. By the Boehm titration method, it was noted that materials activated physically have a lower total acidity than chemically activated and chemical activation increased the amount of carboxylic groups. The AC ZnCl<sub>2</sub> and AC H<sub>2</sub>O were the most efficient in the adsorption of methylene blue. The AC ZnCl<sub>2</sub>, AC CO<sub>2</sub>, AC H<sub>2</sub>O and AC H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> were the best adsorbent for phenol, while only the AC ZnCl<sub>2</sub>, AC H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> and AC commercial adsorbed the hexavalent chromium. The AC ZnCl<sub>2</sub> was the only one that exhibited the largest surface area (1319.16 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>). The ACs showed results equal or higher than the commercial AC.

**Keywords:** *Bambusa vulgaris* Schrad. Activated charcoal. Waste recovery. Treatment of environmental contaminant.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de distribuição geográfica do bambu no mundo. Fonte: Hidalgo Lopez (2003). .....	16
Figura 2 Bambu do tipo leptomorfos – alastrantes. Fonte: Apuama (2014). .....	19
Figura 3 Bambu do tipo paquimorfo – entouceirantes. Fonte: Apuama (2014). .....	19
Figura 4 Resíduos de <i>Bambusa vulgaris</i> Schrad. (CEPASA S.A.).....	23
Figura 5 Forno tubular (a) e (b) rotâmetro para controle dos fluxos. ....	25
Figura 6 Rampa de aquecimento utilizada para a ativação química. ....	26
Figura 7 Representação do processo de produção dos CAs por ativação química: impregnação (a), secagem em estufa (b e e); ativação em forno elétrico tubular (c); lavagem em ácido clorídrico e/ou água (d) e (f) CA obtido. Fonte: adaptado de Couto (2009). .....	27
Figura 8 Aparelho utilizado para obtenção das micrografias. ....	28
Figura 9 Aparelho titulador utilizado para obtenção dos grupos funcionais. ....	29
Figura 10 Aparelho utilizado para obtenção das concentrações nos testes de cinética e isoterma de adsorção. ....	31
Figura 11 Preparação dos materiais para os testes de adsorção. ....	32
Figura 12 Micrografias dos resíduos de bambu. ....	36
Figura 13 Micrografias do carvão vegetal. ....	37
Figura 14 Micrografias do CA H <sub>2</sub> O. ....	37
Figura 15 Micrografias do CA CO <sub>2</sub> . ....	38
Figura 16 Micrografias do CA ZnCl <sub>2</sub> . ....	39
Figura 17 Micrografias do CA H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> . ....	39
Figura 18 Micrografias do CA NaOH. ....	40
Figura 19 Micrografias do CA comercial. ....	40



Figura 20 Isotermas de adsorção para o corante azul de metileno (10 mg de carvão ativado; 10 mL de solução com $C_0$ de $50 \text{ mg L}^{-1}$ ; pH = 6,0; agitação mecânica de 100 rpm; temperatura ambiente) .....	45
Figura 21 Isotermas de adsorção para o fenol (10 mg de carvão ativado; 10 mL de solução com $C_0$ de $50 \text{ mg L}^{-1}$ ; pH = 6,8; agitação mecânica de 100 rpm; temperatura ambiente).....	48
Figura 22 Isotermas de adsorção para o cromo hexavalente (10 mg de carvão ativado; 10 mL de solução com $C_0$ de $50 \text{ mg L}^{-1}$ ; pH = 5,0; agitação mecânica de 100 rpm; temperatura ambiente). .....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Áreas reflorestadas com bambu. ....	16
Tabela 2 Produtividade de algumas espécies de bambu. ....	20
Tabela 3 Características dos contaminantes estudados.....	30
Tabela 4 Modelos aplicados para os ajustes dos dados obtidos.....	343
Tabela 5 Rendimentos gravimétricos em carvão ativado ( $RG_{CA}$ ) obtidos.....	354
Tabela 6 Composição elementar dos materiais.....	35
Tabela 7 Grupos funcionais ácidos de superfície .....	41
Tabela 8 Áreas superficiais por azul de metileno ( $S_{AM}$ ) .....	42
Tabela 9 Cinética de adsorção para o corante azul de metileno (10 mg de carvão ativado; 10 mL de solução com $C_0$ de 50 mg L <sup>-1</sup> ; pH = 6,0; agitação mecânica de 100 rpm; temperatura ambiente). ....	43
Tabela 10 Parâmetros de Langmuir e Freundlich para o corante azul de metileno. ....	45
Tabela 11 Cinética de adsorção para o fenol (10 mg de carvão ativado; 10 mL de solução com $C_0$ de 50 mg L <sup>-1</sup> ; pH = 6,8; agitação mecânica de 100 rpm; temperatura ambiente).....	47
Tabela 12 Parâmetros de Langmuir e Freundlich para o fenol.....	48
Tabela 13 Cinética de adsorção para o cromo hexavalente (10 mg de carvão ativado; 10 mL de solução com $C_0$ de 50 mg L <sup>-1</sup> ; pH = 5,0; agitação mecânica de 100 rpm; temperatura ambiente). ....	49
Tabela 14 Parâmetros de Langmuir e Freundlich para o cromo hexavalente ....	50

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	15
<b>2.1</b>	<b>Complexidade - A visão holística</b> .....	15
<b>2.2</b>	<b>Bambu como matéria-prima</b> .....	15
<b>2.3</b>	<b>Características de crescimento e produtividade do bambu</b> .....	18
<b>2.4</b>	<b>Emprego do bambu</b> .....	20
<b>2.5</b>	<b>Resíduos de bambu e o seu aproveitamento</b> .....	22
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	23
<b>3.1</b>	<b>Material precursor</b> .....	23
<b>3.2</b>	<b>Produção dos carvões ativados</b> .....	24
<b>3.2.1</b>	<b>Ativação física</b> .....	24
<b>3.2.2</b>	<b>Ativação química</b> .....	26
<b>3.3</b>	<b>Caracterizações dos carvões ativados</b> .....	27
<b>3.3.1</b>	<b>Análise elementar</b> .....	27
<b>3.3.2</b>	<b>Morfologia superficial</b> .....	28
<b>3.3.3</b>	<b>Método titulométrico de Boehm</b> .....	28
<b>3.3.4</b>	<b>Área superficial por azul de metileno</b> .....	29
<b>3.4</b>	<b>Aplicações dos carvões ativados</b> .....	30
<b>3.4.1</b>	<b>Cinética de adsorção</b> .....	31
<b>3.4.2</b>	<b>Isotermas de adsorção</b> .....	32
<b>3.4.3</b>	<b>Modelos aplicados para os ajustes dos dados</b> .....	33
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	33
<b>4.1</b>	<b>Produção dos carvões ativados</b> .....	33
<b>4.1.1</b>	<b>Rendimento gravimétrico em carvão ativado</b> .....	33
<b>4.2</b>	<b>Caracterizações dos carvões ativados</b> .....	34
<b>4.2.1</b>	<b>Análise elementar</b> .....	34

<b>4.2.2</b>	<b>Morfologia superficial.....</b>	<b>35</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Método titulométrico de Boehm .....</b>	<b>41</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Área superficial por azul de metileno .....</b>	<b>42</b>
<b>4.3</b>	<b>Aplicações para adsorção do azul de metileno .....</b>	<b>43</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Cinética de adsorção .....</b>	<b>43</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Isotermas de adsorção e parâmetros de Langmuir e Freundlich... ..</b>	<b>44</b>
<b>4.4</b>	<b>Aplicações para adsorção do fenol .....</b>	<b>46</b>
<b>4.4.1</b>	<b>Cinética de adsorção .....</b>	<b>46</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Isotermas de adsorção e parâmetros de Langmuir e Freundlich... ..</b>	<b>47</b>
<b>4.5</b>	<b>Aplicações para adsorção do cromo hexavalente .....</b>	<b>49</b>
<b>4.5.1</b>	<b>Cinética de adsorção .....</b>	<b>49</b>
<b>4.5.2</b>	<b>Isotermas de adsorção e parâmetros de Langmuir e Freundlich... ..</b>	<b>50</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>52</b>
<b>6</b>	<b>RECOMENDAÇÃO .....</b>	<b>54</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>55</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O novo paradigma do mundo pode ser chamado de uma visão de mundo holística (visão global ou da totalidade), que concebe o mundo como um todo integrado, e não como uma coleção de partes dissociadas. Assim, reconhece a interdependência fundamental de todos os fenômenos e que, enquanto indivíduos e sociedades, estamos todos encaixados nos processos cíclicos da natureza e, em última análise, dependentes desses processos (CAPRA, 1996).

Nessa baila, inconcebível não trazer a celeuma o conhecimento do Brasil como portador de imensurável biodiversidade, isso sem levar em conta sua relevante área propícia ao cultivo, a possibilidade de implantação de diferentes culturas, a posição no globo favorável a intensa radiação durante o ano, a dinâmica climática tropical, requisitos tais o que colocam numa instância privilegiada (VASCONCELLOS; VIDAL, 1998; PAULA, 2010), restado configurada, pois, sua posição sólida enquanto detentor da biomassa vegetal.

Nos estados do Nordeste brasileiro, com áreas cultivadas com bambu (*Bambusa vulgaris* Schrad.), destacam-se o Maranhão, Pernambuco e Paraíba, onde o Grupo Industrial João Santos, utiliza-se de tal matéria-prima para o beneficiamento e produção de papel e celulose. A demanda por essa espécie de bambu, associada ao seu potencial, velocidade de crescimento, e quantidade de matéria seca produzida por hectare, torna viável sua utilização, que como consequência acarreta na geração de grande quantidade de resíduos.

Com destaque, frise-se que os resíduos são considerados a sobra após uma ação ou processo produtivo passando a ser descartados e acumulados no meio ambiente. Podem, ainda, ser conceituados como toda substância, material, ou produto destinado por seu proprietário ao abandono, muitas vezes associado à ideia de problema, devido ao desconhecimento de mecanismos de aproveitamento dos mesmos (BRAND et al., 2002; QUIRINO, 2003). Destarte,

várias são as formas de aproveitamento dos resíduos e, nesse contexto, seu uso para a produção de um produto com maior valor econômico, tal como o carvão ativado, tido como um excepcional adsorvente, torna-se uma alternativa viável.

A maioria dos resíduos podem ser convertidos em carvão ativado. Mas especificamente, destaca-se, neste estudo, o carvão ativado a partir de resíduos de bambu dada as características de crescimento/produktividade do bambu. Dito isso, o carvão ativado é um material poroso, com área superficial elevada e que desponta como um adsorvente eminentemente versátil, com elevada capacidade de adsorção para compostos orgânicos e inorgânicos, sendo usado no tratamento de água, recuperação de produtos químicos, em processos de purificação, no armazenamento de gás, bem como suporte para catalisadores.

Em geral, os carvões ativados amplamente empregados possuem uma área superficial na faixa de 600 a 1500 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>, apresentando uma rede bem desenvolvida de poros (BANSAL; GOYAL, 2005; UTRILLA et al., 2011) que conjuntamente a sua microporosidade inteiramente coopera para a remoção dos compostos orgânicos e inorgânicos (IOANNIDOU; ZABANIOTOU, 2007).

A produção de carvão ativado brasileira mostra-se insuficiente frente às suas reais necessidades, tendo que importar o produto devido à demanda ser bem maior que a oferta do mesmo (BORGES et al., 2003). Assim, estudos para o desenvolvimento de carvões ativados a partir de resíduos da indústria podem suscitar inúmeros benefícios, de ordem econômica, ambiental, política e social.

Neste contexto, objetivou-se produzir e avaliar a qualidade de carvões ativados preparados a partir de resíduos de bambu (*Bambusa vulgaris* Schrad.) gerados por uma indústria de celulose e papel. Os materiais foram obtidos por ativação física (vapor d'água e dióxido de carbono) e química (ZnCl<sub>2</sub>, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> e NaOH); em seguida, caracterizados e aplicados como adsorventes de compostos orgânicos (azul de metileno e o fenol) e inorgânico (cromo hexavalente).

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Complexidade - A visão holística**

Há soluções para os principais problemas dos tempos atuais. Algumas delas beiram até mesmo a simplicidade, mas que requerem uma mudança radical nas percepções habituais, nos pensamentos e nos valores corriqueiros. De fato, vive-se atualmente no princípio dessa mudança fundamental de visão do mundo, na ciência e na sociedade, uma mudança de paradigmas, fincadas em um contexto de complexidade (CAPRA, 1996; MORIN, 1977; MORIN, 2003).

### **2.2 Bambu como matéria-prima**

O bambu, um recurso renovável e abundante, pertence à família Poaceae e subfamília Bambusoideae, algumas vezes também tratado como pertencente à família Bambusaceae. Ocorrem com maior incidência nas regiões tropicais e subtropicais da Ásia, África e América do Sul (HIDALGO LOPEZ, 2003).

Com aproximadamente 1100 espécies, divididas em cerca de 90 gêneros (VASCONCELLOS, 2013), o bambu se desenvolve naturalmente em todos os continentes, exceto na Europa, sendo que 62% das espécies são nativas da Ásia, 34% das Américas e 4% da África e Oceania (HIDALGO LOPEZ, 2003). A Figura 1 ilustra a distribuição geográfica do bambu no mundo.



Figura 1 Mapa de distribuição geográfica do bambu no mundo  
 Fonte: Hidalgo Lopez (2003)

No planeta, existem, aproximadamente, 20 milhões de hectares de áreas reflorestadas com bambu, possuindo a China e Índia as maiores áreas, com aproximadamente 14,5 milhões de hectares. Na China e na Índia o bambu é tido como uma planta com acentuada importância econômica, de grande demanda e produção, e incentivada ano a ano o aumento das áreas reflorestadas (Tabela 1).

Tabela 1 Áreas reflorestadas com bambu

Áreas reflorestadas (ha)	Local
20 milhões	No planeta
7,5 milhões	Índia
7,0 milhões	China
136 mil	Brasil
123 mil	Japão

Fonte: adaptado de Ostapiv (2007)

No Brasil destacam-se 136 mil hectares de áreas reflorestadas com bambu, da qual cerca de 40 mil hectares pertencem às unidades de produção de



papel e celulose do Grupo Industrial João Santos, que possui plantios da espécie *Bambusa vulgaris* Schrad., nos estados do Maranhão, Pernambuco e Paraíba (ALBUQUERQUE; SILVA NETO; GUTIÉRREZ-CÉSPEDES, 2010).

O Grupo Industrial João Santos possui duas unidades de produção de papel e celulose, a ITAPAGÉ S.A. Celulose Papéis e Artefatos, em Coelho Neto, Maranhão, que fabrica papéis para cartões duplex para embalagens, e a CEPASA S.A. Celulose e Papel de Pernambuco S.A., Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco, que fabrica sacos multifoliados (PEREIRA; BERALDO, 2008).

De crescente importância para humanidade, o bambu é tido como a madeira dos pobres, na Índia, o amigo das pessoas, na China; no ocidente ainda é pouco notório, sendo associados a obras de pouca importância (PEREIRA; BERALDO, 2008). Há indícios de que a palavra bambu teve origem no barulho de estouro dos colmos quando submetidos ao fogo, “bam-boo” (SILVA, 2006).

Segundo Costa (2004), no Brasil, o bambu foi trazido pelos portugueses na época da colonização, sendo os mais comuns, os de espécies tropicais exóticas tais como o *Bambusa vulgaris* (bambu-verde), *Bambusa vulgaris* var *vittata* (bambu imperial) e o *Dendrocalamus gigante* (bambu gigante). Sendo o bambu da espécie *Bambusa vulgaris* o mais disseminado no país.

O Bambu produz bem em quase todos os tipos de solo (COSTA, 2004). É uma planta tropical, perene, e que origina novos brotos sem a necessidade do replantio (MARINHO et al., 2012). Em espécies de pequeno porte é possível atingir sua altura máxima em 30 dias e até 180 dias para as de porte maiores (KLEINLEIN et al., 2010). Podendo algumas espécies crescer até 40 cm ao dia.

Trata-se, portanto, de uma planta de fácil cultivo, longa vida útil, tendo acompanhado a humanidade desde o início, fornecendo abrigo, alimentação, utensílios, carvão, papel, tecidos, outros (COLLA; BERALDO; BRITO, 2011).

### 2.3 Características de crescimento e produtividade do bambu

Os bambus apresentam parte aérea constituída por colmo, folhas e ramificações e parte subterrânea composta por raízes e rizomas (SILVA, 2006). Os rizomas são os responsáveis pela propagação do bambu, sendo, cada ano, novos colmos originados, formando a parte aérea da planta (SERVIÇO BRASILEIRO DE RESPOSTAS TÉCNICAS - SBRT, 2007).

Ao contrário das árvores, o bambu não possui câmbio vascular e, portanto, não tem anéis anuais de crescimento, que estão associados ao crescimento secundário (AHMAD; KAMKE, 2005).

A maior parte das espécies tem baixa resistência ao ataque de organismos xilófagos, como os fungos e insetos (CHUNG; CHENG; CHANG, 2009; PEREIRA; BERALDO, 2008), devido a presença do amido em seu tecido parenquimatoso que o torna mais susceptível ao ataque desses organismos.

De maneira geral, o bambu possui boa estabilidade dimensional, porém é influenciado pela umidade quando abaixo do Ponto de Saturação das Fibras (OSTAPIV, 2007). Seus colmos são tão firmes quanto elásticos e flexíveis, ricos em sílica (COSTA, 2004) que agrega resistência mecânica (SBRT, 2007).

Avaliando as características químicas do *B. vulgaris*, Fernández (2010) obteve 67,63% de holocelulose, 22,91% de lignina total, 22,03% de lignina insolúvel, 0,88% de lignina solúvel, 9,46% de extrativos totais, 1,16% de cinzas.

A cultura do bambu é economicamente interessante por ser perene e produzir colmos assexuadamente, ano após ano, sem necessidade de plantio. A forma assexuada de propagação possibilita maior difusão e uniformidade genética a partir do enraizamento de estacas provindas de gemas primárias (BERALDO; AZZINI, 2004). A maioria das espécies floresce uma só vez, daí a forma sexuada ser usada só para obter híbridos com boas características agrônômicas (ALBUQUERQUE; SILVA NETO; GUTIÉRREZ-CÉSPEDES, 2010).

Os tipos de bambus são classificados quanto ao crescimento de seus rizomas (COSTA, 2004). Nos leptomorfos, gênero *Phyllostachys* (Figura 2), as gemas brotam e produz colmos esparsos, de menor produtividade. Já nos paquimorfos, gêneros *Bambusa*, *Dendrocalamus* e *Guadua* (Figura 3), formam touceira densa e concêntrica, de maior produtividade (SILVA, 2006).



Figura 2 Bambu do tipo leptomorfo – alastrantes  
Fonte: Apuama (2014)



Figura 3 Bambu do tipo paquimorfo – entouceirantes  
Fonte Apuama (2014)

A biomassa do bambu depende da espécie botânica, da qualidade e tipo de solo, do clima e idade (COSTA, 2004). Em geral, os bambus no centro das touceiras são os mais velhos e os da periferia, os mais jovens (SBRT, 2007).

Um manejo do bambuzal com organização do plantio, controle de corte, extirpação de mazelas e condicionamento do solo aumentam o rendimento e qualidade dos colmos (ALBUQUERQUE; SILVA NETO; GUTIÉRREZ-CÉSPEDES, 2010; COSTA, 2004; OSTAPIV; GONÇALVES, 2010).

Dados sobre a produtividade média dos bambus são muito variáveis na literatura. Assim sendo, a maioria delinea a espécie em função das características geográficas da região onde o mesmo é encontrado (Tabela 2).

Tabela 2 Produtividade de algumas espécies de bambu

<b>Espécie</b>	<b>Produtividade/ano</b>	<b>País</b>
<i>Phyllostachys pubescens</i>	30 t/ha	China
<i>Guadua angustifolia</i>	56 t/ha	Colômbia
<i>Bambusa vulgaris</i>	20 t/ha	Brasil
<i>Dendrocalamus latiflorus</i>	70 - 80 t/ha	China

Fonte: adaptado de Ostapiv (2007)

O bambu suporta até 100 cortes sem a necessidade de replantio. Sendo que o primeiro corte ocorre no terceiro ano após plantio e os demais a cada dois anos. O bambu, em treze anos, permite ser explorado até seis vezes antes de ocorrer a primeira exploração do *Pinus* e a segunda do eucalipto (BORGES; GUTIÉRREZ-CÉSPEDES, 2006). Trata-se de um recurso de crescimento abundante que permite sua expansão rapidamente (FEBRIANTO et al., 2010; OHMAE; NAKANO, 2008; PRASAD; PANDEY, 2010; YU et al., 2011). Configura-se então como de rápido crescimento e ciclos curtos de produção.

## 2.4 Emprego do bambu

Em países como China, Nepal, Filipinas e Havaí, o bambu tem sido objeto de pesquisas e desenvolvimento prático (CALEGARI et al., 2007).

Cientistas chineses têm se especializado sobre o bambu, com pesquisas na área de reprodução *in vitro*, painéis, carvão ativado, álcool e éter, produtos alimentícios e maquinário específico para o seu processamento (SBRT, 2007).

Como material de construção civil, o bambu tem sido o foco de estudos, devido ao impacto ambiental causado por materiais convencionais, como o cimento e o aço (BERALDO et al., 2010; PAES et al., 2009; YEH; LIN, 2011).

No Brasil, o uso do bambu ainda é incipiente quando levado em conta seu potencial (CALEGARI et al., 2007). Esse panorama tende a se inverter desde a criação da Rede Brasileira do Bambu (RBB), direcionada ao estudo da arte do bambu. Por meio de uma reunião em Brasília, DF, nas dependências do Ministério do Meio Ambiente e com apoio da Secretaria Nacional de Florestas pode-se discutir, a reintrodução do bambu no cenário Brasileiro (RBB, 2013).

Entre outras conquistas geridas pela RBB, encontra-se a Lei nº 12.484, de 8 de setembro de 2011, que dispõe sobre a PNMCB - Política de Incentivo ao Manejo Sustentado e ao Cultivo do Bambu (BRASIL, 2011).

Entre outras, são diretrizes da PNMCB no Art.3 (RBB, 2013):

I - a valorização do bambu como produto agro-silvo cultural capaz de suprir necessidades ecológicas, econômicas, sociais e culturais;

II - o desenvolvimento tecnológico do manejo sustentado, cultivo e das aplicações do bambu;

III - o desenvolvimento de polos de manejo sustentado, cultivo e de beneficiamento de bambu, em especial nas regiões de maior ocorrência de estoques naturais do vegetal, em regiões cuja produção agrícola baseia-se em unidades familiares de produção e no entorno de centros geradores de tecnologias aplicáveis ao produto.

## 2.5 Resíduos de bambu e o seu aproveitamento

No Nordeste brasileiro, mas especificamente nos estados do Maranhão, Pernambuco e Paraíba, a empresa CEPASA possui grandes reservas de bambu (*Bambusa vulgaris*). Em informações pessoais com técnicos da CEPASA, revela-se que essa espécie tem rendimentos de até 20 toneladas por hectare.ano<sup>-1</sup>, em plantios no Maranhão, em função da adaptação da espécie ao clima.

Produtividades elevadas geram grandes quantidades de resíduos, muitas vezes subutilizados como cobertura morta ou queimados em caldeiras para geração de energia. Tais resíduos têm potencial de utilização, possibilitando um destino de natureza mais tecnológica, entre eles, a produção de carvão ativado.

O descarte de resíduos de biomassa em atividades agrícolas e florestais pode gerar um problema ambiental (AMAYA et al., 2006; CHEN; XING; HAN, 2009; FELFLI et al., 2011; SUHARTINI; HIDAYAT; WIJAYA, 2011).

Os resíduos, depois de gerados, necessitam de destino adequado, pois, do contrário, além de ocasionar impactos, representam perdas de matéria-prima e energia, resultantes de todo o processo, exigindo, investimentos significativos no tratamento da poluição por eles gerada (PAULA, 2010).

O conhecimento da quantidade, qualidade e possibilidades de uso dos resíduos podem, não obstante, gerar alternativas de uso que viabilize seu aproveitamento, evitando, assim, os problemas anteriormente mencionados. Como exemplo pode-se citar, ademais, a utilização dos resíduos em coberturas, granjas, indústrias de painéis de madeira reconstituída, compostagem, geração de energia, na compactação e transformação em briquetes e carvão ativado.

Desse modo, como consequência cabal restaria evidente o eventual retorno econômico aliado, sobretudo, a geração de renda, de novos empregos, melhorando a conjuntura exposta em aspectos políticos, sociais e ambientais.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Os procedimentos em geral realizados para as etapas de produção, caracterizações e aplicações dos carvões ativados obtidos foram estabelecidos com base nos estudos realizados no Departamento de Química da UFLA.

#### 3.1 Material precursor

Os resíduos de *Bambusa vulgaris* Schrad. (Figura 4), resultado da sobra do picador (folhagem e galhos finos), foram provenientes da Empresa Celulose e Papel de Pernambuco S.A (CEPASA), pertencente ao Grupo Industrial João Santos, com sede no Município de Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco.

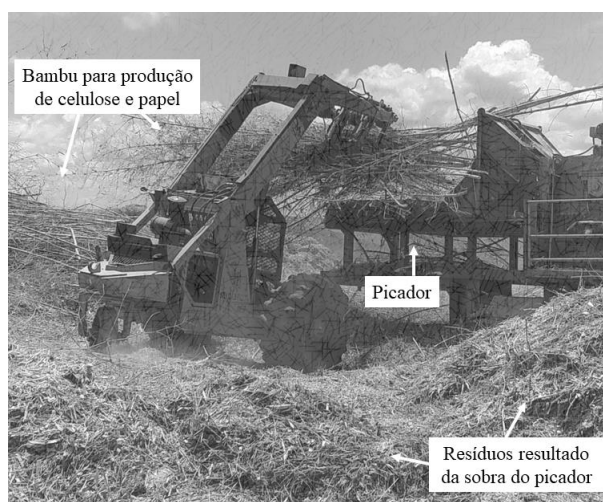


Figura 4 Resíduos de *Bambusa vulgaris* Schrad. (CEPASA S.A.)

Os mesmos foram lavados em água corrente, secos à sombra, moídos e classificados em peneiras, sendo a fração utilizada para a produção dos carvões ativados a que passou na peneira de 40 mesh e ficou retida na de 60 mesh.

Os materiais foram postos em sala de climatização, à temperatura de  $20 \pm 2$  °C e umidade de  $65 \pm 5\%$ , até atingirem massa constante e umidade de 12%.

### 3.2 Produção dos carvões ativados

Os carvões ativados foram produzidos mediante ativações física e química. No caso da ativação física foram utilizados como agentes ativantes o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e o vapor d'água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), enquanto que na ativação química foram usados como agentes ativantes um sal (cloreto de zinco -  $\text{ZnCl}_2$ ), um ácido (ácido fosfórico -  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) e uma base (hidróxido de sódio -  $\text{NaOH}$ ).

#### 3.2.1 Ativação física

Para a ativação física, o material precursor foi inicialmente transformado em carvão vegetal em forno elétrico tipo mufla. Dessa forma, foram utilizados 25 g de material, divididos em três cadinhos, que foram inseridos no reator e iniciado o processo de carbonização, sendo aquecidos de 25 a 40 °C, com taxa de aquecimento de  $1,67$  °C  $\text{min}^{-1}$ , permanecendo por 60 min nesta temperatura.

Em seguida, passou de 40 a 500 °C, com a mesma taxa de aquecimento, sendo o tempo de residência (na temperatura final) de 60 minutos. O rendimento gravimétrico em carvão vegetal ( $\text{RG}_C$ ) foi determinado conforme a Equação 1.

$$\text{RG}_C (\%) = \frac{m_{cv}}{m_0} \times 100 \quad (1)$$

em que,  $m_{cv}$  é a massa seca final (g) de carvão vegetal e  $m_0$  é a massa seca inicial (g) do material precursor.



O material carbonizado, cerca de 3,5 g, foi ativado em forno elétrico tubular (Figura 5), com o emprego dos agentes ativantes no tempo de residência. Em vista disso, o processo de ativação foi efetuado nas temperaturas finais de 850 °C (CO<sub>2</sub>) e 800 °C (vapor d'água), com taxa de aquecimento de 10 °C min<sup>-1</sup> e tempo de residência de 60 min., fluxo de CO<sub>2</sub> e vapor d'água de 100 mL min<sup>-1</sup> e de N<sub>2</sub> de 200 mL min<sup>-1</sup>, sendo um rotômetro utilizado para controle dos fluxos.

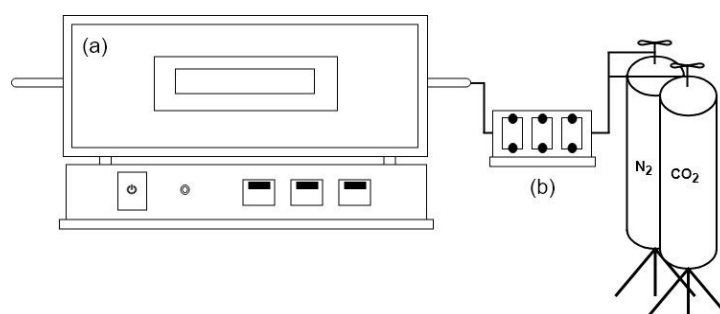


Figura 5 Forno tubular (a) e (b) rotômetro para controle dos fluxos

Ao final do processo, o forno foi desligado e o rendimento gravimétrico em carvão ativado ( $RG_{CA}$ ) calculado de acordo com a Equação 2, sendo ainda os carvões ativados obtidos denominados de CA CO<sub>2</sub> e CA H<sub>2</sub>O.

$$RG_{CA}(\%) = \frac{m_{ca}}{m_0} \times 100 \quad (2)$$

em que,  $m_{ca}$  é a massa seca final (g) do carvão ativado e  $m_0$  é a massa seca inicial (g) do material precursor.

### 3.2.2 Ativação química

Para a ativação química, inicialmente, o material precursor foi impregnado com soluções concentradas de cada agente ativante, sendo eles o cloreto de zinco ( $\text{ZnCl}_2$ ), ácido fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) e hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ), na proporção de 1:1, em massa. Para o material impregnado com  $\text{NaOH}$  foi utilizado o carvão vegetal (devido a degradação do material precursor).

Os materiais foram postos sob agitação e aquecidos em manta aquecedora, à temperatura de  $80\text{ }^\circ\text{C}$ , por 2 h. Em seguida, foram secos em estufa a  $110\text{ }^\circ\text{C}$ , por 24 h, sendo em seguida levado ao forno para ativação.

O material impregnado, cerca de 3,5 g, foi ativado no forno elétrico tubular, a uma temperatura final de  $500\text{ }^\circ\text{C}$  (apenas na ativação com  $\text{NaOH}$  que foi empregada temperatura de  $380\text{ }^\circ\text{C}$ ), taxa de aquecimento de  $10\text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$ , tempo de residência de 3 h e sob atmosfera de  $\text{N}_2$  de  $200\text{ mL min}^{-1}$  (Figura 6).

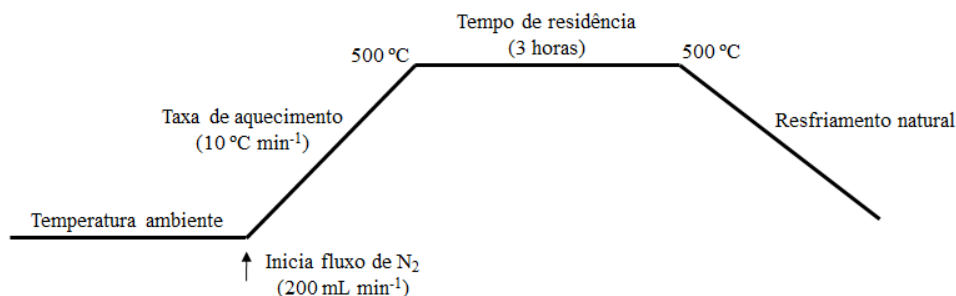


Figura 6 Rampa de aquecimento utilizada para a ativação química

Ao final do processo, o forno foi desligado e os carvões ativados obtidos (denominados de CA  $\text{ZnCl}_2$ , CA  $\text{H}_3\text{PO}_4$  e CA  $\text{NaOH}$ ) foram lavados com água destilada, a quente, até pH neutro (apenas o CA  $\text{ZnCl}_2$  foi inicialmente lavado com ácido clorídrico 1:1, por 1 h, sendo logo após lavado com água destilada). Após isso, foram secos em estufa a  $110\text{ }^\circ\text{C}$ , por 24 h (Figura 7).

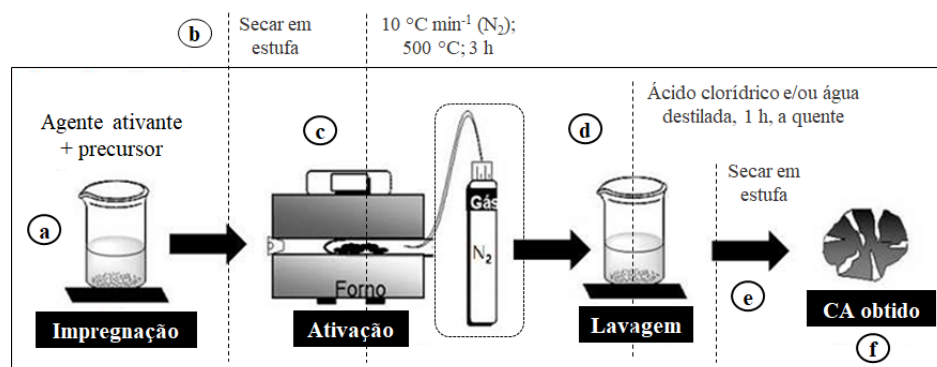


Figura 7 Representação do processo de produção dos CAs por ativação química: impregnação (a), secagem em estufa (b e e); ativação em forno elétrico tubular (c); lavagem em ácido clorídrico e/ou água (d) e (f) CA obtido.

Fonte: adaptado de Couto (2009)

### 3.3 Caracterizações dos carvões ativados

Os carvões ativados foram caracterizados quanto ao seu teor de carbono (análise elementar), morfologia superficial (análise de MEV), grupos funcionais ácidos de superfície (método titulométrico de Boehm) e área superficial por azul de metileno (adsorção do azul de metileno). Foi caracterizado também um CA comercial, a título de comparação, empregado mesmas análises.

#### 3.3.1 Análise elementar

A quantificação dos teores de carbono - C, hidrogênio - H, nitrogênio - N e enxofre - S (CHNS) dos materiais produzidos e/ou analisados (material precursor, carvões ativados produzidos e carvão ativado comercial), cerca de 3 mg, foi realizada, em duplicata, empregando-se um analisador simultâneo de elementos, sendo o teor de oxigênio obtido por diferença dos demais elementos.

### 3.3.2 Morfologia superficial

As micrografias dos materiais produzidos e/ou analisados (material precursor, carvões ativados produzidos e carvão ativado comercial) foram obtidas mediante análise de Microscopia Eletrônica de Varredura, que possibilita a avaliação da morfologia superficial, ao empregar tensão de 25 kv.

Para tanto, cada amostra de material foi inicialmente posta sobre a superfície de um suporte de alumínio com fita de carbono (dupla face) e em seguida coberta com fina camada de ouro em um evaporador (Figura 8).

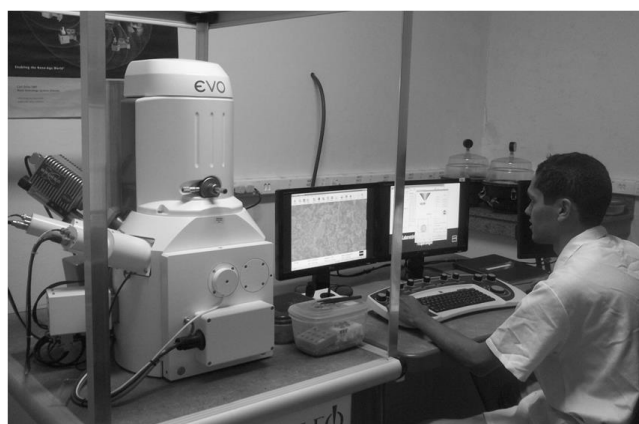


Figura 8 Aparelho utilizado para obtenção das micrografias

### 3.3.3 Método titulométrico de Boehm

A determinação dos grupos funcionais ácidos de superfície seguiu o método titulométrico de Boehm (1994), empregando-se um aparelho titulador automático 888 Titrande da Metrohm interfaciado a um computador (Figura 9).



Figura 9 Aparelho titulador utilizado para obtenção dos grupos funcionais

Dessa maneira, em 0,25 g dos materiais produzidos e/ou analisados (material precursor, carvões ativados produzidos e carvão ativado comercial) foram adicionados 10 mL de NaOH, 10 mL de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> e 10 mL de NaHCO<sub>3</sub> (todos a uma concentração de 0,05 mol L<sup>-1</sup>) e colocados sob agitação por 24 h.

Após agitação, os materiais foram filtrados em papel de filtro e retiradas alíquotas de 5 mL. Após isso, foram adicionados nas alíquotas retiradas de NaOH e de NaHCO<sub>3</sub> 10 mL de solução de HCl (0,05 mol L<sup>-1</sup>) e na alíquota de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> adicionados 15 mL de solução de HCl (0,05 mol/L). Para toda reação, foram deixadas as soluções na presença de N<sub>2</sub> por 2 h. Em seguida, foram tituladas com NaOH (0,05 mol/L) e padronizados as soluções de NaOH e HCl.

O número de grupos ácidos foi determinado, usando a consideração de que NaOH neutraliza ácidos carboxílicos, lactonas e fenóis; Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> neutraliza ácidos carboxílicos e lactonas e NaHCO<sub>3</sub> neutraliza somente ácidos carboxílicos.

### 3.3.4 Área superficial por azul de metileno

A área superficial por azul de metileno, formada pelos mesoporos e microporos maiores dos materiais produzidos e/ou analisados (material precursor, carvões ativados produzidos e carvão ativado comercial), uma vez que a molécula de azul de metileno (AM) tem diâmetro mínimo, aproximado, de 0,8 nm, foi calculada a partir da adsorção do corante AM conforme a Equação 3.

$$S_{AM} = 1000 \times S_{AM}^{\circ} \times q_m \quad (3)$$

em que,  $S_{AM}$  é a área superficial por azul de metileno ( $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ ),  $S_{AM}^{\circ}$  é a área superficial da molécula de azul de metileno ( $S_{AM}^{\circ} = 1,93 \text{ m}^2 \text{g}^{-1}$ ) e  $q_m$  é a capacidade máxima de adsorção do azul de metileno ( $\text{mg g}^{-1}$ ) alcançada mediante testes das isotermas de adsorção e os parâmetros obtidos a partir do modelo de Langmuir (STAVROPOULOS; ZABANIOTOU, 2005).

### 3.4 Aplicações dos carvões ativados

Visando à aplicação dos CAs produzidos como adsorventes (Tabela 3), foram realizados testes de adsorção, empregando, como moléculas-modelo, compostos orgânicos, tais como o azul de metileno (corante da indústria têxtil) e fenol (resíduo da indústria siderúrgica, petroquímica e de papel e celulose); e inorgânico tal como o cromo hexavalente (metal com efeito bioacumulante). A título de comparação, um CA comercial também foi analisado.

Tabela 3 Características dos contaminantes estudados

Contaminantes	M ( $\text{g mol}^{-1}$ )	$\lambda$ (nm)
Azul de metileno	319,85	665
Fenol	94,12	270
Cromo hexavalente	51,99	430

### 3.4.1 Cinética de adsorção

Para o estudo de cinética de adsorção (relacionado ao efeito do tempo de contato adsorvato / adsorvente) foram utilizados 10 mg dos materiais produzidos e/ou analisados e 10 mL de soluções com os respectivos contaminantes analisados (azul de metileno, fenol e cromo hexavalente) na concentração inicial ( $C_0$ ) de  $50 \text{ mg L}^{-1}$ , os quais foram inseridos em um conjunto de recipientes, que foram devidamente fechados, e em seguida, mantidos sob agitação durante 24 h.

Em intervalos predeterminados de 0,5, 1, 2, 3, 6, 12 e 24 h, alíquotas das soluções, com aproximadamente 3,5 mL, foram retiradas e suas concentrações determinadas, ao empregar o comprimento de onda ( $\lambda$ ) característico para cada contaminante, conforme apresentado na Tabela 3. O aparelho UV-visível Biosystems, modelo SP-2000 UV (Figura 10) e cubetas de quartzo foram utilizados para determinação das concentrações dos respectivos contaminantes.



Figura 10 Aparelho utilizado para obtenção das concentrações nos testes de cinética e isoterma de adsorção

### 3.4.2 Isotermas de adsorção

Para este ensaio foram realizados os mesmos procedimentos iniciais descritos para o estudo de cinética de adsorção. Sendo que o conjunto de recipientes (Figura 11) foram mantidos sob agitação constante (100 rpm) por 24 h, à temperatura ambiente, até que atingissem o equilíbrio de adsorção. Após esse período, os recipientes foram retirados da mesa giratória, as amostras filtradas e a concentração de equilíbrio determinada em aparelho UV-visível (Biosystems, modelo SP-2000 UV), em análise pontual de absorvância ( $\lambda$ ).



Figura 11 Preparação dos materiais para os testes de adsorção

Foram preparadas curvas de calibração com soluções de 25, 50, 100, 250, 500 e 1000 mg L<sup>-1</sup> para cada contaminante analisado, sendo as soluções de cromo hexavalente obtidas a partir da dissolução do sal de dicromato de potássio (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>). A quantidade de contaminante adsorvida, por grama de adsorvente,  $q_{eq}$  (mg g<sup>-1</sup>), foi calculada conforme a Equação 4.



$$q_{eq} = \frac{(C_0 - C_{eq})xV}{m} \quad (4)$$

em que,  $C_0$  e  $C_{eq}$  representam, respectivamente, as concentrações inicial e no equilíbrio ( $\text{mg L}^{-1}$ );  $V$  o volume de adsorvato (L) e  $m$  a massa de adsorvente (g).

### 3.4.3 Modelos aplicados para os ajustes dos dados

Os dados obtidos nas isotermas de adsorção ( $q_{eq}$  e  $C_{eq}$ ) foram ajustados segundo os modelos de Langmuir e Freundlich (Tabela 4). O modelo de Langmuir é baseado na formação de uma monocamada de adsorvato sobre a superfície do adsorvente. Já o de Freundlich há a formação de várias camadas.

Tabela 4 Modelos aplicados para os ajustes dos dados obtidos

Modelos	Equação	Equação Linearizada
Langmuir	$q_{eq} = \frac{q_m x K_L x C_{eq}}{1 + K_L + C_{eq}}$	$\frac{C_{eq}}{q_{eq}} = \frac{1}{q_m x K_L} + \frac{1}{q_m} x C_{eq}$
Freundlich	$q_{eq} = K_F x C_{eq}^{1/n}$	$\log q_{eq} = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_{eq}$

$q_{eq}$  = a quantidade adsorvida para uma dada concentração do adsorvato ( $\text{mg g}^{-1}$ );  $q_m$  = a capacidade máxima de adsorção ( $\text{mg g}^{-1}$ );  $C_{eq}$  = concentração do adsorvato após ter atingido o equilíbrio ( $\text{mg L}^{-1}$ );  $K_L$  = constante de Langmuir;  $K_F$  = coeficiente de sorção e  $1/n$  = medida da intensidade de sorção (constantes de Freundlich).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Produção dos carvões ativados

#### 4.1.1 Rendimento gravimétrico em carvão ativado

Foi obtido o rendimento gravimétrico em carvão vegetal ( $RG_C$ ) de 35,83%. Para os carvões ativados, o CA  $CO_2$  (21,60%) apresentou o maior rendimento gravimétrico em carvão ativado dentre os materiais ativados fisicamente e o CA  $H_3PO_4$  (56,26%) dentre os materiais ativados quimicamente (Tabela 5). Além disso, todos os carvões ativados quimicamente apresentaram, vide de regra, um  $RG_{CA}$  superior aos materiais ativados fisicamente, o que está diretamente relacionado à menor temperatura empregada na ativação (500 °C).

Tabela 5 Rendimentos gravimétricos em carvão ativado ( $RG_{CA}$ ) obtidos

<b>Materiais</b>	<b>Processo</b>	<b>Temperatura de ativação (°C)</b>	<b>Tempo de residência (h)</b>	<b><math>RG_{CA}</math> (%)</b>
CA $H_2O$	Vapor	800	1	11,73
CA $CO_2$	Gás	850	1	21,60
CA $ZnCl_2$	Sal	500	3	53,98
CA $H_3PO_4$	Ácido	500	3	56,26
CA $NaOH$	Base	500	3	28,93

## 4.2 Caracterizações dos carvões ativados

### 4.2.1 Análise elementar

O CA  $NaOH$ , dentre os materiais, foi o que apresentou o menor teor de carbono (63,70%), enquanto que o CA  $CO_2$  (82,13%) e CA  $ZnCl_2$  (83,41%) apresentaram teor de carbono maior que o encontrado para o CA comercial (75,47%). Verifica-se, de modo geral, quando comparado o teor de carbono dos materiais produzidos com os resíduos, que há aumento no teor de carbono nos materiais obtidos e redução nos teores de oxigênio e hidrogênio (Tabela 6).

Tabela 6 Composição elementar dos materiais

<b>Materiais</b>	<b>C (%)</b>	<b>H (%)</b>	<b>O (%)</b>	<b>N (%)</b>	<b>S (%)</b>	<b>C/H</b>	<b>O/C</b>
Resíduos	45,25	6,13	46,87	1,73	0,02	7,38	1,04
Carvão vegetal	81,17	2,83	13,62	2,35	0,03	28,68	0,17
CA H <sub>2</sub> O	74,73	2,48	20,82	1,94	0,03	30,13	0,28
CA CO <sub>2</sub>	82,13	1,62	13,8	2,34	0,11	50,70	0,17
CA ZnCl <sub>2</sub>	83,41	2,75	10,29	3,52	0,03	30,33	0,12
CA H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	70,68	3,25	24,24	1,83	0,00	21,75	0,34
CA NaOH	63,70	2,43	31,75	2,07	0,05	26,21	0,50
CA comercial	75,47	3,75	19,00	1,78	0,00	20,13	0,25

C = carbono; H = hidrogênio; O = oxigênio; N = nitrogênio; S = enxofre.

Esses resultados estão relacionados com a liberação dos compostos voláteis durante o processo de carbonização e ativação, que possibilita, por conseguinte, o desenvolvimento da porosidade e a elevação da área superficial. Além disso, verifica-se aumento nos valores de C/H e diminuição nos valores de O/C, quando se compara os resíduos de bambu e os materiais produzidos e/ou analisados. Esta ocorrência sinaliza o incremento nas reações de condensação e a aromatização dos materiais após o processo de carbonização e ativação (BRUM, 2007; AVELAR, 2008; COUTO, 2009; PEREIRA, 2010).

#### **4.2.2 Morfologia superficial**

Pode-se identificar a presença de muitos poros de abertura nos materiais, que são decorrentes do processo de ativação, que promove o alargamento e/ou limpeza dos poros superficiais, permitindo a difusão mais rápida dos contaminantes até as regiões mais internas (Figuras 12, 13, 14 e 15). Além disso, a morfologia superficial dos materiais foi modificada de acordo com as variáveis empregadas do processo, tais como a temperatura final de ativação, o tempo de

residência e o tipo de agente ativante utilizado. Desse modo, para a ativação física, os CA H<sub>2</sub>O e CA CO<sub>2</sub> apresentaram morfologias semelhantes, com uma limpeza de superfície (Figuras 14 e 15), e distintas quando comparadas as morfologias dos resíduos de bambu (Figura 12) e carvão vegetal (Figura 13).

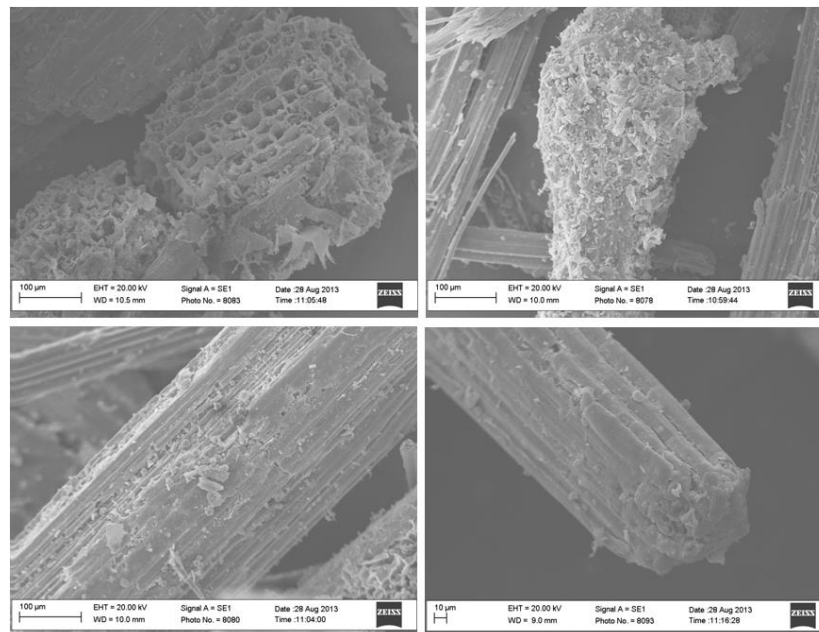


Figura 12 Micrografias dos resíduos de bambu

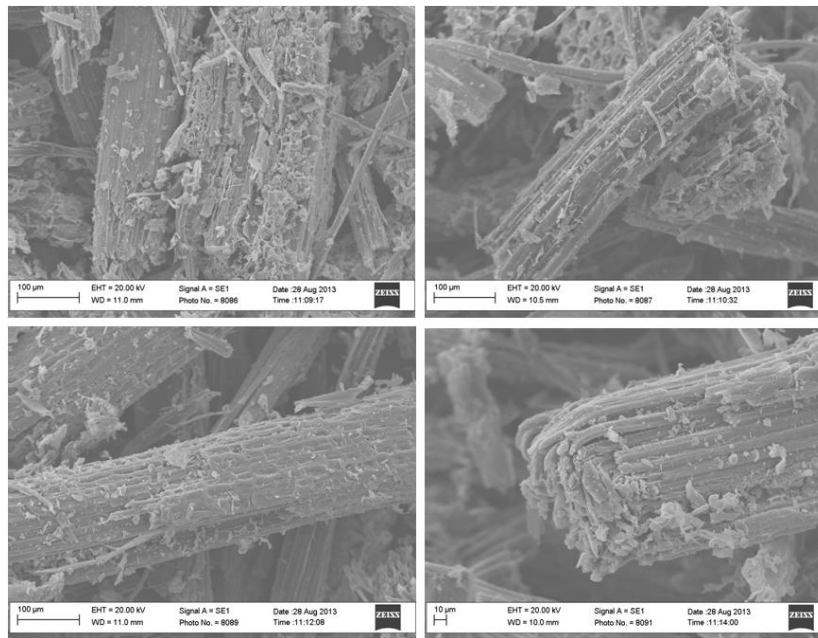
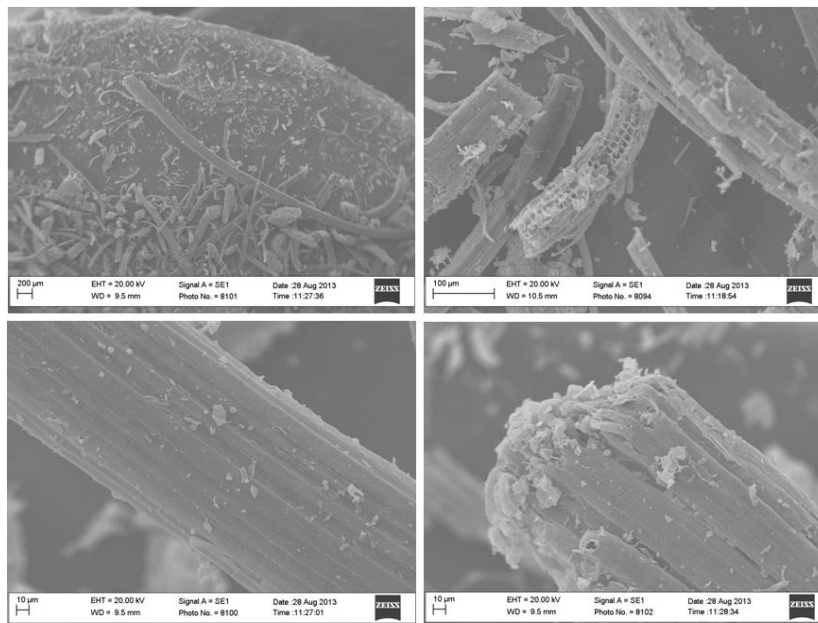


Figura 13 Micrografias do carvão vegetal

Figura 14 Micrografias do CA H<sub>2</sub>O

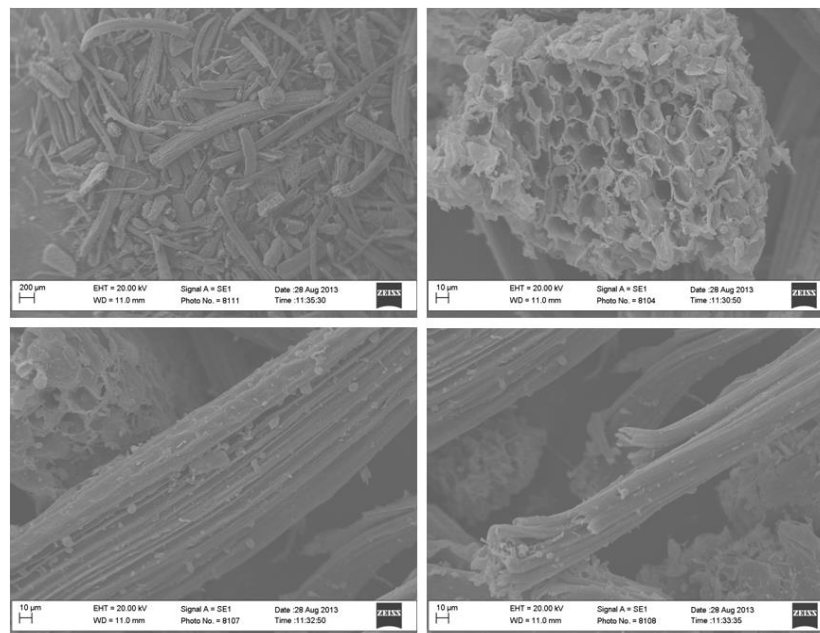
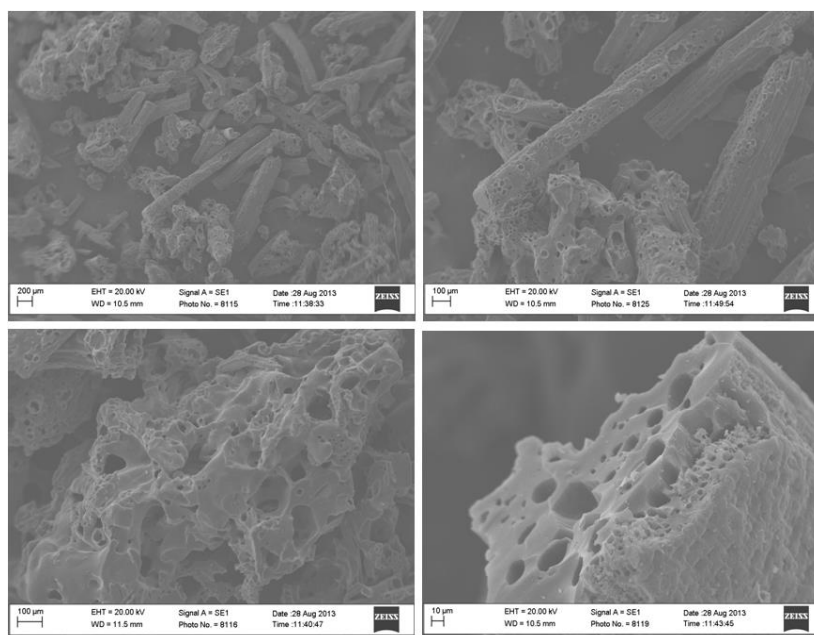
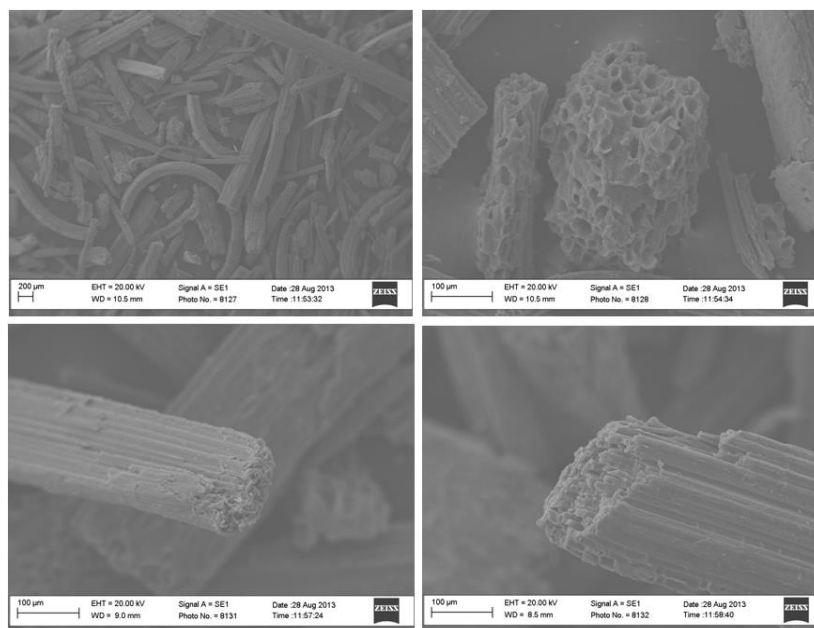


Figura 15 Micrografias do CA CO<sub>2</sub>

Para a ativação química com um sal, o CA ZnCl<sub>2</sub> apresentou morfologia totalmente distinta (Figura 16) quando comparada as morfologias obtidas para os resíduos de bambu (Figura 12) e o carvão vegetal (Figura 13), criando muitos poros em todas as regiões do material. Fernandes (2008) explica que a ativação com ZnCl<sub>2</sub> gera mais espaços entre as camadas de carbono resultando em maior porosidade e que uma das funções do ZnCl<sub>2</sub> é causar a ação eletrolítica chamada dilatação da estrutura molecular da celulose. Para o CA H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, obtido com um ácido, não houve alteração substancial em sua morfologia superficial, no entanto foi o material que apresentou a maior limpeza em sua superfície (Figura 17). Já para o CA NaOH, a impregnação com o hidróxido de sódio promoveu uma mudança da estrutura do material precursor, principalmente células de parênquimas, provocando também o desfibrilamento do material (Figura 18).

Figura 16 Micrografias do CA ZnCl<sub>2</sub>Figura 17 Micrografias do CA H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>

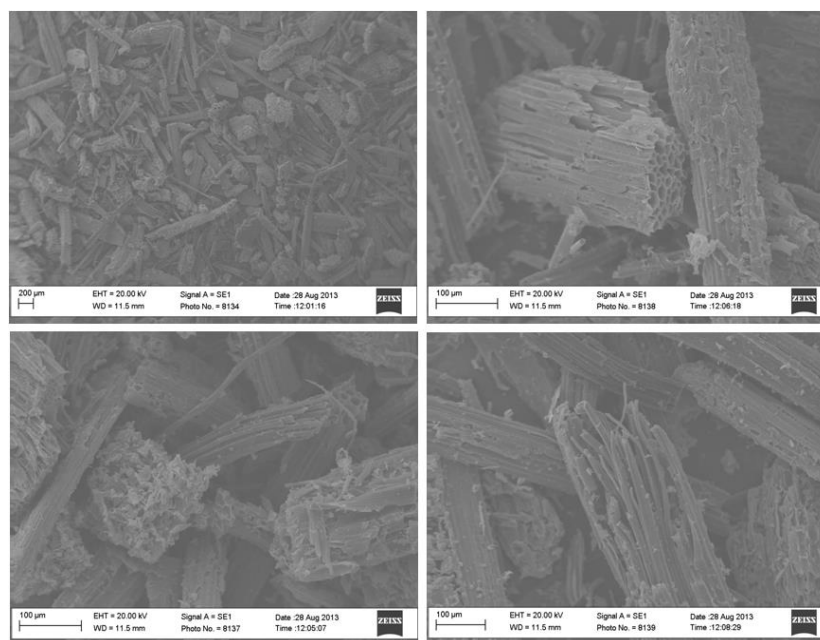


Figura 18 Micrografias do CA NaOH

Para o CA comercial, verifica-se pela morfologia superficial, que os tamanhos das partículas obtidos são bem pequenos e que mesmo em uma escala maior não foi possível observar o desenvolvimento da porosidade (Figura 19). Dessa forma, todos os materiais produzidos (fisicamente ou quimicamente) com bambu apresentaram morfologias diferentes da obtida para o CA comercial.

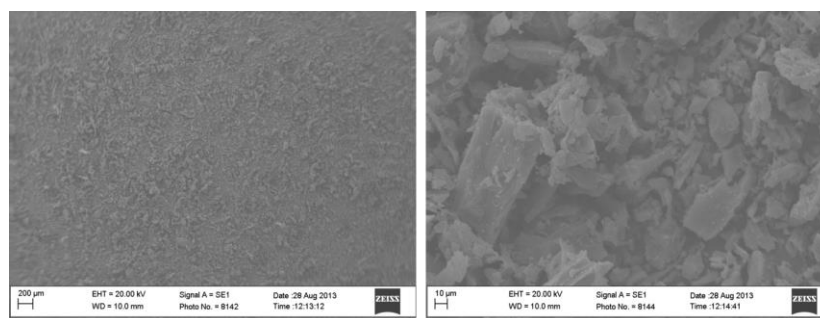


Figura 19 Micrografias do CA comercial



#### 4.2.3 Método titulométrico de Boehm

A química de superfície dos materiais produzidos foi modificada de acordo com as variáveis do processo empregadas e sobretudo o tipo de agente ativante aplicado. Dessa forma, mesmo carvões ativados com áreas superficiais iguais, mas preparados mediante processos diferentes, apresentam características químicas e também adsorventes diferentes (PEREIRA, 2010). Os materiais produzidos por ativação física foram os que apresentaram menor acidez total, sendo de 0,908 mmol g<sup>-1</sup> para o CA H<sub>2</sub>O e de 1,067 mmol g<sup>-1</sup> para o CA CO<sub>2</sub> (Tabela 7), quando comparados com os demais carvões ativados analisados. Os maiores valores de acidez total foram registrados para a ativação química, sendo observado que o aumento na acidez total ocorreu devido ao aumento do número de grupos carboxílicos presentes, com destaque para o CA H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> que apresentou a maior quantidade desses grupos presentes, com 1,470 mmol g<sup>-1</sup>.

Tabela 7 Grupos funcionais ácidos de superfície

<b>Materiais</b>	<b>Acidez total (mmol g<sup>-1</sup>)</b>	<b>Carboxílicos (mmol g<sup>-1</sup>)</b>	<b>Lactonas (mmol g<sup>-1</sup>)</b>	<b>Fenóis (mmol g<sup>-1</sup>)</b>
Resíduos	1,389	0,994	0,095	0,300
Carvão vegetal	0,915	0,842	0,073	0,000
CA H <sub>2</sub> O	0,908	0,801	0,076	0,032
CA CO <sub>2</sub>	1,067	0,926	0,060	0,081
CA ZnCl <sub>2</sub>	1,256	1,055	0,024	0,177
CA H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	1,506	1,470	0,00	0,036
CA NaOH	1,313	1,041	0,060	0,212
CA comercial	1,236	0,836	0,110	0,290

A acidez elevada apresentada pelos resíduos de bambu está associada à relação da acidez com a maior quantidade de oxigênio presente no material

precursor (FERNANDES, 2008). Ademais, pelos resultados obtidos, verificou-se que os carvões ativados produzidos quimicamente apresentaram acidez total similar a acidez total atingida para o CA comercial igual a 1,236 mmol g<sup>-1</sup>.

#### 4.2.4 Área superficial por azul de metileno

Os materiais apresentaram áreas superficiais por azul de metileno ( $S_{AM}$ ) relativamente altas quando comparadas às áreas obtidas para os resíduos de bambu (265,45 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>), carvão vegetal (369,73 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>) e CA comercial (728,88 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>). Destaca-se, outra vez, que o azul de metileno é adsorvido na região de mesoporos e microporos maiores dos materiais (uma vez que sua molécula possui diâmetro mínimo, aproximado, de 0,8 nm). O CA ZnCl<sub>2</sub>, CA H<sub>2</sub>O, CA H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> e o CA CO<sub>2</sub> foram os materiais que apresentaram os maiores valores de  $S_{AM}$  iguais a 1319,16 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>, 732,15 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>, 639,37 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> e 576,72 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>, respectivamente, enquanto que o CA NaOH o menor valor de  $S_{AM}$  igual a 357,59 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>, similar ao carvão vegetal (Tabela 8). A ativação com NaOH, apesar de brusca, como mostrado pelo MEV, não aumentou a  $S_{AM}$ .

Tabela 8 Áreas superficiais por azul de metileno ( $S_{AM}$ )

<b>Materiais</b>	<b>Processo</b>	<b>Temperatura de residência (°C)</b>	<b>Tempo de residência (h)</b>	<b><math>S_{AM}</math> (m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>)</b>
Resíduos	-	-	-	265,45
C. vegetal	-	500	1	369,73
CA H <sub>2</sub> O	Vapor	800	1	732,15
CA CO <sub>2</sub>	Gás	850	1	576,72
CA ZnCl <sub>2</sub>	Sal	500	3	1319,16
CA H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Ácido	500	3	693,37
CA NaOH	Base	500	3	357,59
CA comercial	-	-	-	728,88

### 4.3 Aplicações para adsorção do azul de metileno

Os materiais produzidos e/ou analisados foram avaliados quanto a sua aplicação para adsorção do azul de metileno (corante da indústria têxtil), por meios de estudos de cinética e isotermas de adsorção, usando também os modelos de Langmuir e Freundlich para entender o processo, sendo os parâmetros obtidos, mediante as isotermas, calculados e os resultados discutidos.

#### 4.3.1 Cinética de adsorção

Pelo estudo de cinética de adsorção, para os diferentes tempos de contato adsorvato/adsorvente, observou-se que os CA H<sub>2</sub>O e CA CO<sub>2</sub>, carvões ativados fisicamente, apresentaram remoção inicial rápida para o corante azul de metileno, visto que em uma hora já haviam sido adsorvidos cerca de 50% do corante, havendo o preenchimento dos sítios ativos de forma rápida (Tabela 9).

Tabela 9 Cinética de adsorção para o corante azul de metileno (10 mg de carvão ativado; 10 mL de solução com C<sub>0</sub> de 50 mg L<sup>-1</sup>; pH = 6,0; agitação mecânica de 100 rpm; temperatura ambiente)

Materiais	Remoção (%)						
	0,5 h	1 h	2 h	3 h	6 h	12 h	24 h
CA H <sub>2</sub> O	51,56	52,72	59,91	63,47	66,47	88,82	94,93
CA CO <sub>2</sub>	29,96	49,63	53,65	69,30	83,31	96,72	96,72
CA ZnCl <sub>2</sub>	30,70	37,56	52,61	60,80	61,20	94,04	96,57
CA H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	5,66	11,92	23,70	29,21	75,56	77,65	84,50
CA NaOH	0,30	7,60	11,62	15,31	23,73	41,62	44,71
CA comercial	20,76	39,12	57,51	61,55	81,07	96,27	96,57

Os carvões ativados quimicamente apresentaram remoção mais lenta, requisitando, todavia, de mais tempo para a mesma adsorção, como pode ser verificado para o CA  $ZnCl_2$  que obteve a remoção de 53,61% atingida com 2 h de reação e para o CA  $H_3PO_4$  que obteve a remoção de 75,56% após somente 6 h de reação. O CA NaOH apresentou a mais baixa remoção, quando considerada a quantidade adsorvida de corante na medida em que se aumentou o tempo de contato adsorvato (corante) / adsorvente (CAs), o que está relacionada com a menor  $S_{AM}$  obtida e menor quantidade de poros revelada pela análise de MEV.

Os CA  $CO_2$  e CA  $ZnCl_2$  apresentaram porcentagem de remoção para o corante azul de metileno semelhante a obtida pelo carvão ativado comercial, sendo removidos, com 24 h de reação, 96,72% e 96,57% de corante, respectivamente. Verificou-se também que a porcentagem de corante azul de metileno removida foi aumentada de acordo com o tempo de contato adsorvato/adsorvente, sendo que, com 24 h de reação, a maioria dos sistemas já estavam saturados, sendo este tempo o de equilíbrio e o definido para os testes de adsorção e aplicações dos modelos de isothermas de Langmuir e Freundlich.

#### **4.3.2 Isothermas de adsorção e parâmetros de Langmuir e Freundlich**

As isothermas de adsorção tratam-se, especificamente, da relação entre a quantidade de adsorvato adsorvida por unidade de massa do adsorvente -  $q_{eq}$  e a concentração de adsorvato no equilíbrio de adsorção -  $C_{eq}$  (COUTO, 2009).

As isothermas de adsorção para o corante azul de metileno estão mostradas na Figura 20 e os parâmetros de Langmuir e Freundlich na Tabela 10. Verificou-se que os CA  $ZnCl_2$  e CA  $H_2O$  foram os materiais que apresentaram melhores desempenhos de adsorção, atingindo elevada capacidade máxima de adsorção ( $q_m$ ), respectivamente iguais a 683,50  $mg\ g^{-1}$  e 379,35  $mg\ g^{-1}$ , sendo estes valores superiores ao alcançado para o CA comercial igual a 377,66  $mg\ g^{-1}$ .

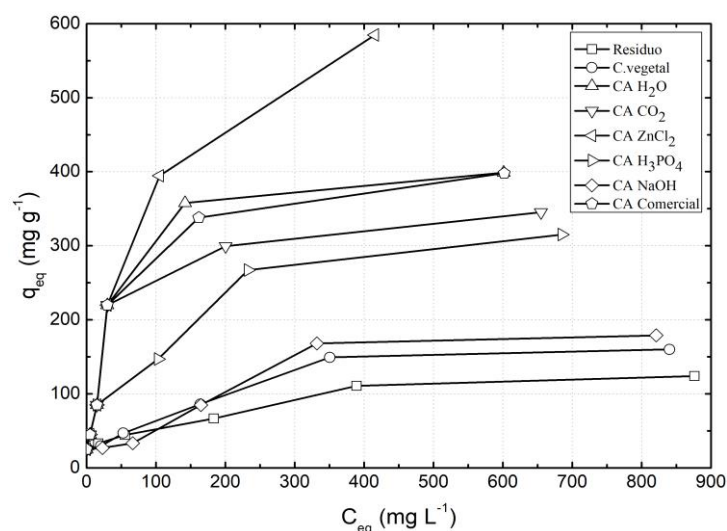


Figura 20 Isotermas de adsorção para o corante azul de metileno (10 mg de carvão ativado; 10 mL de solução com  $C_0$  de  $50 \text{ mg L}^{-1}$ ; pH = 6,0; agitação mecânica de 100 rpm; temperatura ambiente)

Tabela 10 Parâmetros de Langmuir e Freundlich para o corante azul de metileno

Adsorvente	Parâmetros de Langmuir			Parâmetros de Freundlich		
	$q_m$	$k_L$	$R^2$	$K_F$	$1/n$	$R^2$
Resíduos	137,54	0,008	0,884	11,33	0,36	0,964
Carvão vegetal	191,57	0,005	0,941	10,98	0,41	0,935
CA H <sub>2</sub> O	379,35	0,024	0,923	61,22	0,31	0,874
CA CO <sub>2</sub>	298,82	0,027	0,876	58,95	0,28	0,881
CA ZnCl <sub>2</sub>	683,50	0,013	0,993	42,88	0,44	0,960
CA H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	359,26	0,010	0,949	32,29	0,36	0,961
CA NaOH	185,28	0,008	0,890	7,23	0,49	0,896
CA comercial	377,66	0,023	0,933	57,17	0,31	0,901

$q_m$  = quantidade máxima de adsorção ( $\text{mg g}^{-1}$ );  $K_L$  = constante de Langmuir ( $\text{L mg}^{-1}$ );  $R^2$  = coeficiente de determinação;  $K_F$  = constante de Freundlich ( $\text{mg g}^{-1}$ ) ( $\text{L g}^{-1}$ )<sup>1/n</sup>;  $1/n$  = parâmetro de Freundlich.

Quando comparados os valores de  $R^2$  obtidos conforme os parâmetros obtidos pelos modelos de isotermas de Langmuir e de Freundlich, verifica-se que o carvão vegetal, CA  $H_2O$ , CA  $ZnCl_2$  e CA comercial apresentaram melhores ajustes para o modelo de Langmuir, enquanto que os resíduos, CA  $CO_2$ , CA  $H_3PO_4$  e CA  $NaOH$  tiveram melhores ajustes para o de Freundlich. O modelo de Langmuir é baseado na formação de uma monocamada de adsorvato sobre o adsorvente e o de Freundlich na formação de várias camadas.

#### **4.4 Aplicações para adsorção do fenol**

Os materiais produzidos e/ou analisados foram avaliados também quanto a sua aplicação para a adsorção do fenol (resíduo da indústria siderúrgica, petroquímica e de papel e celulose).

##### **4.4.1 Cinética de adsorção**

Para a cinética de adsorção do fenol, nos diferentes tempos de contato adsorvato/adsorvente, verifica-se que, a princípio, a remoção deste composto é rápida, tornando-se aos poucos menor até que o equilíbrio seja atingido. Os CA  $H_2O$ , CA  $CO_2$  e CA  $ZnCl_2$  apresentaram remoção inicial para o fenol superior a 50% com apenas 30 minutos de reação adsorvato/adsorvente, ocorrendo o preenchimento dos sítios ativos do adsorvente de forma rápida (Tabela 11). Este mesmo desempenho foi continuado ao longo de toda a reação. Já os CA  $H_3PO_4$ , CA  $NaOH$  e CA comercial apresentaram baixo desempenho, visto que, em 24 h de reação, só haviam atingido remoção para o fenol de 75,65%, 61,15% e 49,05%, respectivamente. Além disso, todos os materiais produzidos apresentaram uma maior cinética para o fenol que o CA comercial.

Tabela 11 Cinética de adsorção para o fenol (10 mg de carvão ativado; 10 mL de solução com  $C_0$  de 50 mg L<sup>-1</sup>; pH = 6,8; agitação mecânica de 100 rpm; temperatura ambiente)

Materiais	Remoção (%)						
	0,5 h	1 h	2 h	3 h	6 h	12 h	24 h
CA H <sub>2</sub> O	55,24	65,24	69,88	81,84	84,10	91,41	93,10
CA CO <sub>2</sub>	64,25	73,96	92,12	92,54	92,65	95,78	96,76
CA ZnCl <sub>2</sub>	55,10	58,48	70,30	77,90	78,17	88,27	88,60
CA H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	37,37	37,78	46,38	52,43	53,36	75,12	75,65
CA NaOH	20,76	24,14	34,27	43,42	47,64	60,71	61,15
CA comercial	24,14	24,38	30,05	30,25	31,88	39,76	49,05

#### 4.4.2 Isotermas de adsorção e parâmetros de Langmuir e Freundlich

As isotermas de adsorção para o fenol estão apresentadas na Figura 21 e os parâmetros de Langmuir e Freundlich descritos na Tabela 12. Verificou-se que os CA ZnCl<sub>2</sub>, CA CO<sub>2</sub>, CA H<sub>2</sub>O e o CA H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> foram os materiais que apresentaram melhores desempenhos de adsorção, alcançando elevada capacidade máxima de adsorção ( $q_m$ ) respectivamente iguais a 584,64 mg g<sup>-1</sup>, 558,29 mg g<sup>-1</sup>, 509,83 mg g<sup>-1</sup> e 428,34 mg g<sup>-1</sup>, sendo estes valores maiores que os obtidos para o carvão ativado comercial que foi igual a 404,08 mg g<sup>-1</sup>. A maior capacidade de adsorção para o CA ZnCl<sub>2</sub> está associada a maior quantidade de poros presentes no material (relevada pela análise de MEV) e maior área  $S_{AM}$ . Quando comparados os valores de  $R^2$  obtidos conforme os modelos de Langmuir e de Freundlich, verifica-se que todos os materiais produzidos foram melhores ajustados em relação ao modelo de Freundlich.

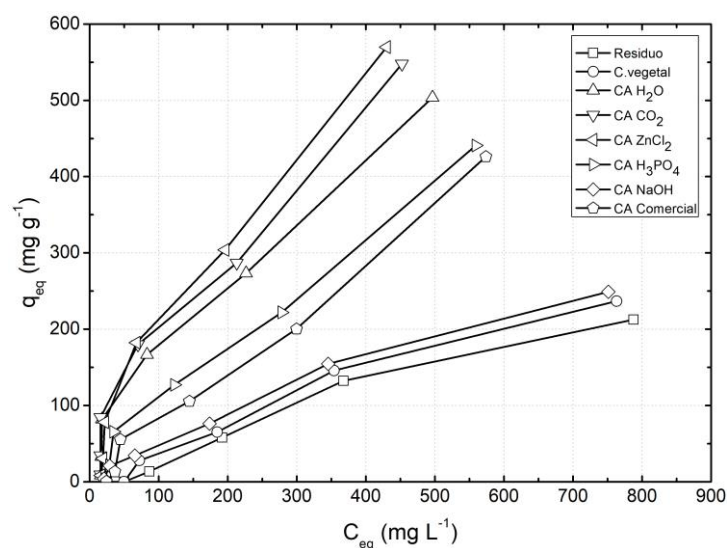


Figura 21 Isotermas de adsorção para o fenol (10 mg de carvão ativado; 10 mL de solução com  $C_0$  de  $50 \text{ mg L}^{-1}$ ; pH = 6,8; agitação mecânica de 100 rpm; temperatura ambiente)

Tabela 12 Parâmetros de Langmuir e Freundlich para o fenol

Adsorvente	Parâmetros de Langmuir			Parâmetros de Freundlich		
	$q_m$	$k_L$	$R^2$	$K_F$	$1/n$	$R^2$
Resíduos	199,97	0,004	0,831	0,43	0,93	0,973
Carvão vegetal	224,32	0,004	0,845	0,64	0,89	0,978
CA H <sub>2</sub> O	509,83	0,008	0,916	6,40	0,70	0,983
CA CO <sub>2</sub>	558,29	0,008	0,913	6,84	0,71	0,978
CA ZnCl <sub>2</sub>	584,64	0,008	0,915	5,95	0,75	0,984
CA H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	428,34	0,006	0,865	1,66	0,88	0,989
CA NaOH	239,65	0,006	0,883	1,49	0,78	0,992
CA comercial	404,08	0,005	0,823	0,50	1,06	0,992

$q_m$  = quantidade máxima de adsorção ( $\text{mg g}^{-1}$ );  $K_L$  = constante de Langmuir ( $\text{L mg}^{-1}$ );  $R^2$  = coeficiente de determinação;  $K_F$  = constante de Freundlich ( $\text{mg g}^{-1}$ ) ( $\text{L g}^{-1}$ )<sup>1/n</sup>;  $1/n$  = parâmetro de Freundlich.



#### 4.5 Aplicações para adsorção do cromo hexavalente

Os materiais produzidos e/ou analisados foram também avaliados quanto a aplicação para adsorção do íon  $\text{Cr}^{+6}$  (metal com efeito bioacumulante).

##### 4.5.1 Cinética de adsorção

Para a cinética de adsorção do cromo hexavalente, nos diferentes tempos de contato adsorvato/adsorvente, verifica-se que apenas os carvões ativados quimicamente (CA  $\text{ZnCl}_2$  e CA  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) e o CA comercial adsorveram este metal (Tabela 13). Observou-se ainda que para os CA  $\text{ZnCl}_2$  e CA  $\text{H}_3\text{PO}_4$  a adsorção começa já nos primeiros 30 minutos, ocorrendo o preenchimento dos sítios ativos dos materiais, com remoção iguais a 45,95% e 29,73%, respectivamente. A adsorção tornou-se gradativamente menor até que o equilíbrio fosse atingido. Já para o CA comercial a adsorção ocorreu apenas após 6 h de reação. Com 24 h de reação, nenhum dos materiais havia removido ainda todo o metal da solução.

Tabela 13 Cinética de adsorção para o cromo hexavalente (10 mg de carvão ativado; 10 mL de solução com  $C_0$  de 50 mg  $\text{L}^{-1}$ ; pH = 5,0; agitação mecânica de 100 rpm; temperatura ambiente)

Materiais	Remoção (%)						
	0,5 h	1 h	2 h	3 h	6 h	12 h	24 h
CA $\text{ZnCl}_2$	45,95	43,24	46,63	46,94	46,63	55,41	62,16
CA $\text{H}_3\text{PO}_4$	29,73	29,73	35,14	35,15	51,35	54,05	64,86
CA comercial	0,00	0,00	0,00	0,00	17,57	17,57	43,24

#### 4.5.2 Isotermas de adsorção e parâmetros de Langmuir e Freundlich

Isotermas de adsorção para o cromo hexavalente estão apresentadas na Figura 22 e os parâmetros de Langmuir e de Freundlich descritos na Tabela 14.

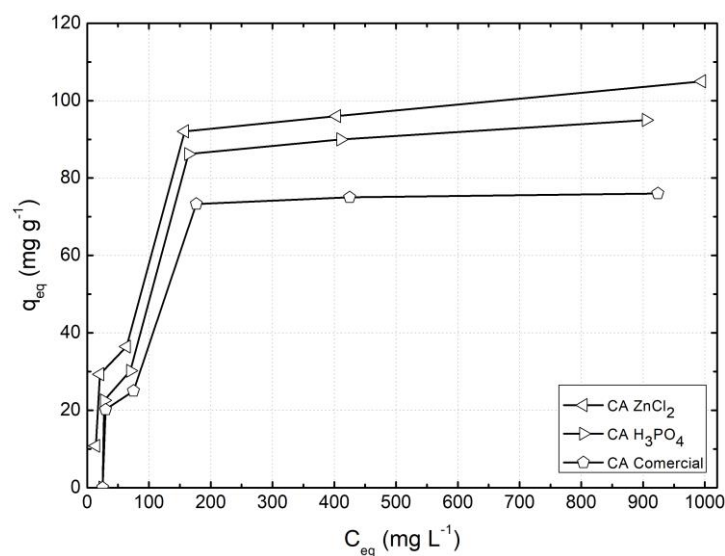


Figura 22 Isotermas de adsorção para o cromo hexavalente (10 mg de carvão ativado; 10 mL de solução com  $C_0$  de 50 mg L<sup>-1</sup>; pH = 5,0; agitação mecânica de 100 rpm; temperatura ambiente)

Tabela 14 Parâmetros de Langmuir e Freundlich para o cromo hexavalente

Adsorvente	Parâmetros de Langmuir			Parâmetros de Freundlich		
	$q_m$	$k_L$	$R^2$	$K_F$	$1/n$	$R^2$
CA ZnCl <sub>2</sub>	117,35	0,012	0,947	11,97	0,33	0,851
CA H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	118,41	0,006	0,891	7,08	0,40	0,800
CA comercial	96,29	0,006	0,877	6,10	0,39	0,778

$q_m$  = quantidade máxima de adsorção (mg g<sup>-1</sup>);  $K_L$  = constante de Langmuir (L mg<sup>-1</sup>);  $R^2$  = coeficiente de correlação;  $K_F$  = constante de Freundlich (mg g<sup>-1</sup>) (L g<sup>-1</sup>)<sup>1/n</sup>;  $1/n$  = parâmetro de Freundlich.

Verificou-se, assim como nos estudos de cinética de adsorção, que o apenas os CA  $ZnCl_2$ , CA  $H_3PO_4$  e o CA comercial adsorveram o cromo hexavalente, atingindo uma capacidade máxima de adsorção ( $q_m$ ), respectivamente, iguais a  $117,35 \text{ mg g}^{-1}$ ,  $118,41 \text{ mg g}^{-1}$  e  $96,29 \text{ mg g}^{-1}$ . Quando comparados os valores de  $R^2$  obtidos conforme ajustes em relação aos modelos de isotermas de Langmuir e de Freundlich, verifica-se que os materiais foram melhores ajustados ao modelo de Langmuir, com a adsorção em monocamadas.

## 5 CONCLUSÃO

Dos resultados pode-se concluir que:

- ✓ Os materiais produzidos apresentaram resultados, na maioria das vezes, de produção, caracterização e aplicações para adsorção dos três contaminantes analisados, superiores aos valores obtidos para o carvão ativado comercial.
- ✓ Em geral, os carvões ativados quimicamente apresentaram rendimento gravimétrico em carvão ativado superior aos carvões ativados fisicamente, com os melhores resultados apresentados pelos CA  $H_3PO_4$  e CA  $CO_2$ .
- ✓ Há aumento no teor de carbono dos materiais em decorrência da ativação e diminuição nos teores de oxigênio e hidrogênio. Verifica-se também aumento nos valores da relação C/H e diminuição de O/C. Os CA  $CO_2$  e CA  $ZnCl_2$  apresentaram teor de carbono superior ao CA comercial.
- ✓ As micrografias revelaram a superfície porosa dos carvões ativados. Verificou-se ainda que a morfologia superficial do material precursor foi modificada após o processo de carbonização e ativação. E que a presença de muitos poros, decorrentes do processo de ativação, permite a difusão rápida dos contaminantes até as regiões mais internas dos carvões ativados.
- ✓ A química de superfície foi modificada de acordo com as variáveis empregadas do processo e sobretudo o tipo de agente ativante aplicado. Os maiores valores de acidez total foram encontrados na ativação química, sendo este aumento associado sobretudo aos grupos carboxílicos presentes.
- ✓ Em geral, os carvões ativados produzidos apresentaram áreas superficiais por azul de metileno relativamente altas quando comparadas às áreas superficiais obtidas dos resíduos de bambu, carvão vegetal e CA comercial.
- ✓ Os carvões ativados produzidos apresentaram rápida remoção inicial dos contaminantes, preenchendo os sítios ativos de forma rápida. Os CA  $CO_2$

e CA ZnCl<sub>2</sub> foram mais rápidos na adsorção do azul de metileno. Já os CA H<sub>2</sub>O, CA CO<sub>2</sub> e CA ZnCl<sub>2</sub> foram mais eficientes na adsorção do fenol. E apenas os CA ZnCl<sub>2</sub> e CA H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> adsorveram o cromo hexavalente.

- ✓ Apresentaram os materiais também uma excelente capacidade máxima de adsorção para o azul de metileno, fenol e cromo hexavalente. Os CA ZnCl<sub>2</sub> e CA H<sub>2</sub>O foram os materiais que apresentaram os melhores desempenhos para adsorção do azul de metileno. Os CA ZnCl<sub>2</sub>, CA CO<sub>2</sub>, CA H<sub>2</sub>O e o CA H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> foram os melhores adsorventes para o fenol, enquanto apenas os CA ZnCl<sub>2</sub>, CA H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> e CA comercial adsorveram o cromo hexavalente.
- ✓ Os resíduos de *Bambusa vulgaris*, provenientes de uma indústria de papel e celulose, se apresentaram como um excelente precursor para a produção de diferentes tipos de carvões ativados (fisicamente e quimicamente), que podem ser aplicados para a adsorção do azul de metileno, fenol e o cromo.

## 6 RECOMENDAÇÃO

- ✓ Estudos mais aprofundados com os carvões ativados fisicamente preparados a partir de resíduos de *Bambusa vulgaris* são necessários devidos os mesmos terem apresentados resultados semelhantes aos carvões ativados quimicamente e ao CA comercial usado como comparativo neste trabalho.
- ✓ Estudo de diferentes proporções de resíduos / agente ativante químico e também melhorias no processo de ativação devem ser realizadas, a fim de viabilizar economicamente a produção dos carvões ativados quimicamente.
- ✓ Por fim, pesquisas complementares devem ser realizadas para aperfeiçoar, ainda mais, a qualidade dos carvões ativado produzidos. Assim como estudos da viabilidade técnica-econômica dos carvões ativados a partir de resíduos de *Bambusa vulgaris* necessitam serem desenvolvidos visando a sua implementação e máxima eficiência de utilização pela indústria.

## REFERÊNCIAS

AHMAD, M.; KAMKE, F.A. Analysis of Calcutta bamboo for structural composite materials: physical and mechanical properties. **Wood Science and Technology**, New York, v. 39, p. 448–459, 2005.

ALBUQUERQUE, E. R.; SILVA NETO, E. B.; GUTIÉRREZ-CÉSPEDES, G. M. Viabilidade do emprego do resíduo industrial lama de cal como uma alternativa para a produção do bambu da espécie *Bambusa vulgaris* Schrad. In: SEMINÁRIO NACIONAL DO BAMBU: CONSOLIDAÇÃO DA REDE BRASILEIRA DO BAMBU, 2., 2010, Rio Branco. **Anais...** Rio Branco: [s. n.], 2010. 314 p.

AMAYA, A. et al. Activated carbon briquettes from biomass materials. **Bioresource Technology**, Essex, v. 98, n. 8, p. 1635–1641, 2006.

APUAMA. Disponível em: <<http://www.apuama.org/bambu/especimes/>>. Acesso em: 2 fev. 2014.

AVELAR, F. F. **Utilização de fibras de Piaçava (*Attalea funifera*) na Preparação de carvões ativados**. 2008. 72 p. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

BANSAL, R. C.; GOYAL, M. **Activated Carbon Adsorption**. New York: CRC press, 2005. 470p.

BERALDO, A.L.; AZZINI, A. **Bambu: Características e Aplicações**. Guaíba: Livraria Editora Agropecuária, 2004, p. 37-55.

BERALDO, A. L. et al. Estudo preliminar do uso de bambu como elemento estrutural em pavimentação com concreto. **Cerne**, Lavras, v. 16, p. 125-132, jul. 2010.

BOEHM, H. P. Some aspects of the surface chemistry of carbon blacks and other carbons. **Carbon**, [s.l.], v. 32, n. 5, p. 759-769, 1994.

BORGES, F. M. et al. Desenvolvimento e criação de uma unidade produtiva de carvão ativado. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 23., 2003, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: UFOP, 2003. 1 CD ROM.

BORGES, O.; GUTIÉRREZ-CÉSPEDES, G.H. Os benefícios das florestas de bambu (*Bambusa vulgaris*), no nordeste do Brasil. In: SEMINÁRIO NACIONAL DO BAMBU - ESTRUTURAÇÃO DA REDE DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO, 2006, Brasília. **Anais...** Brasília: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, 2006. p. 86-90.

BRAND, M. A. et al. Caracterização do rendimento e quantificação dos resíduos gerados em serraria através do balanço de materiais. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 32, p. 247-259, 2002.

BRASIL. Câmara dos Deputados. **Lei nº 12.484, de 8 de Setembro de 2011.** Dispõe sobre a política nacional de incentivo ao manejo sustentado e ao cultivo do bambu e dá outras providências. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2011/lei-12484-8-setembro-2011-611401-norma-pl.html>>. Acesso em: 23 jan. 2013.

BRUM, S. S. **Caracterização e modificação química de resíduos sólidos do beneficiamento do café para produção de novos materiais.** 2007. 138 p. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.

CALEGARI, L. et al. Desempenho físico-mecânico de painéis fabricados com Bambu (*Bambusa vulgaris* Schr.) em combinação com madeira. **Cerne**, Lavras, v. 13, n. 1, p. 57-63, jan./mar. 2007.

CAPRA, F. **A teia da vida:** uma nova compreensão científica dos sistemas vivos. São Paulo: Cultrix, 1996.



CHEN, L. J.; XING, L.; HAN, L. Renewable energy from agro-residues in China: solid biofuels and biomass briquetting technology. **Renewable e Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 13, n. 9, p. 2689-2695, Dec. 2009.

CHUNG, M. J.; CHENG, S. S.; CHANG, S. T. Environmentally benign methods for producing green culms of ma bamboo (*Dendrocalamus latiflorus*) and moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*). **Journal of Wood Science**, Cham, v. 55, p. 197–202, 2009.

COLLA, W. A.; BERALDO, A. L.; BRITO, J. O. Effects of thermal treatment on the physicochemical characteristics of giant Bamboo. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 3, p. 361-367, jul./set. 2011.

COSTA, T. M. S. **Estudo da viabilidade técnica do emprego do bambu da espécie *Bambusa vulgaris* Schard., como carvão vegetal**. 2004. 62 p. Dissertação (Mestrado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear – Materiais) - Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

COUTO, G. M. **Utilização da serragem de *Eucalyptus* sp. na preparação de carvões ativados**. 2009. 89 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

FEBRIANTO, F. et al. Properties of oriented strand board made from Betung bamboo (*Dendrocalamus asper* (Schultes.f) Backer ex Heyne). **Wood Science and Technology**, New York, v. 46, p. 53–62, 2010.

FELFLI, F. F. et al. Biomass briquetting and its perspectives in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 35, n. 1, p. 236-242, 2011.

FERNANDES, F. L. **Carvão de endocarpo de coco da baía ativado quimicamente com  $ZnCl_2$  e fisicamente com vapor d'água: produção, caracterização, modificações químicas e aplicação na adsorção de íon cloreto**. 2008. 92 p. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2008.

- FERNÁNDEZ, M. A. V. **Avaliação dos processos de polpação soda-antraquinona e bissulfito-base magnésio para bambu**. 2010. 90 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2010.
- HIDALGO LOPEZ, O. **Bamboo-The gift of the gods**. Bogotá: O. H. Lopez, 2003. 553 p.
- IOANNIDOU, O.; ZABANIOTOU, A. Agricultural residues as precursors for activated carbon production - A review. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 11, n. 9, p. 1966-2005, 2007.
- KLEINLEIN, W. A. et al. Caracterização energética de bambu. In: SEMINÁRIO NACIONAL DO BAMBU: CONSOLIDAÇÃO DA REDE BRASILEIRA DO BAMBU, 2., 2010, Rio Branco. **Anais...** Rio Branco: [s. n.], 2010. 314 p.
- MARINHO, N. P. et al. Análise química do bambu-gigante (*Dendrocalamus giganteus* Wall. ex Munro) em diferentes idades. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 2, p. 413-418, abr./jun. 2012.
- MORIN, E. **A cabeça bem-feita: repensar a reforma, reformar o pensamento**. 9. ed. Rio de Janeiro: B. Brasil, 2003.
- MORIN, E. **O Método I - A natureza da natureza**. 2. ed. Lisboa: Europa-América, 1977.
- OHMAE, Y.; NAKANO, T. Water adsorption properties of bamboo in the longitudinal direction. **Wood Science and Technology**, New York, v. 43, p. 415–422, 2008.
- OSTAPIV, F. **Análise e melhoria do processo produtivo de tábuas de bambu (*Phyllostachys pubescens*) com foco em pisos**. 2007. 112 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

OSTAPIV, F.; GONÇALVES, M. T. T. Avaliação da estrutura de um bambuzal de Mossô (*Phyllostachys pubescens*) no município de Fazenda Rio Grande – Paraná. In: SEMINÁRIO NACIONAL DO BAMBU: CONSOLIDAÇÃO DA REDE BRASILEIRA DO BAMBU, 2., Rio Branco. **Anais...** Rio Branco: [s. n.], 2010. 314 p.

PAES, J. B. et al. Caracterização físico-mecânica do laminado colado de bambu (*Dendrocalamus giganteus*). **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 1, p. 41-51, jan./mar. 2009.

PAULA, L. E. R. **Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos**. 2010. 72 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

PEREIRA, E. I. **Produção de carvão ativado a partir de diferentes precursores utilizando FeCl<sub>3</sub> como agente ativante**. 2010. 72 p. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

PEREIRA, M. A. R.; BERALDO, A. L. **Bambu de corpo e alma**. Bauru: Canal 6, 2008.

PRASAD, B. E.; PANDEY, K. K. Microwave drying of bamboo. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 70, p. 353–355, 2010.

QUIRINO, W. F. **Utilização energética de resíduos vegetais**. Brasília: LPF/IBAMA, 2003. 14 p.

REDE BRASILEIRA DO BAMBU. Disponível em: <<http://www.redebrasileira.dobambu.com.br>>. Acesso em: 12 set. 2013.

SERVIÇO BRASILEIRO DE RESPOSTAS TÉCNICAS. **Dossiê técnico:** bambu. Curitiba: Instituto de tecnologia do Paraná, 2007.

SILVA, R. M. C. O bambu no Brasil e no mundo. In: ENCONTRO DA ESCOLA DE AGRONOMIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS, 2006, 1., 2006, Goiânia. **Anais...** Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2006. 45 p.

STAVROPOULOS, G. G.; ZABANIOTOU, A. A. Production and characterization of activated carbons from olive-seed waste residue. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 82, n. 1, p. 79-85, 2005.

SUHARTINI, S.; HIDAYAT, N.; WIJAYA, S. Physical properties characterization of fuel briquette made from spent bleaching earth. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 35, n. 10, p. 4209 - 4214, 2011.

UTRILLA, J. R. et al. Activated carbon modifications to enhance its water treatment applications. An overview. **Journal of Hazardous Materials**, v. 187, p. 1-23, 2011.

VASCONCELLOS, G. F.; VIDAL, J. W. B. **Poder dos Trópicos:** meditação sobre a alienação energética na cultura brasileira. [s. l]: Casa Amarela, 1998. 304p.

YEH, M. C.; LIN, Y. L. Finger joint performance of structural laminated bamboo member. **Journal of Wood Science**, Cham, v. 58, p. 120–127, 2011.

YU, Y. et al. Surface functionalization of bamboo with nanostructured ZnO. **Wood Science and Technology**, New York, v. 46, p. 781–790, 2011.