



Uso de carvão ativado na remoção de CO₂

Use of activated carbon in the removal of CO₂

P. C. C. Araújo^{1*}; D. R. Gonçalves Júnior¹; L. Cardozo-Filho³; J. J. Marques²; E. J. Santos¹

¹ Departamento de Engenharia Química, Laboratório de Química Industrial, Universidade Federal de Sergipe, 491000-000, São Cristóvão-SE, Brasil

² Departamento de Engenharia Ambiental, Laboratório de Controle da Poluição Ambiental, Universidade Federal de Sergipe, 491000-000, São Cristóvão-SE, Brasil

³ Departamento de Engenharia Química, Laboratório de Nanotecnologia e Tecnologia Supercrítica, Universidade Estadual de Maringá, 87020-900, Maringá-PR, Brasil

paulo.cardozo.qi@hotmail.com.br

(Recebido em 07 de fevereiro de 2018; aceito em 18 de maio de 2018)

No presente trabalho, foram estudadas as isotermas de adsorção do CO₂ sobre carvão ativado produzido a partir de endocarpo de coco (*Cocos nucifera* L.) que constitui um resíduo gerado em diversos processos agroindustriais. O carvão sintetizado foi caracterizado por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), fluorescência de raios X (FRX) e quantificação de grupos ácidos e básicos via método de Boehm. Na obtenção das isotermas de adsorção do CO₂ foi utilizada a técnica volumétrica estática em uma coluna de leito fixo de 2 cm de diâmetro interno, 25 cm de altura e volume interno de 138,55 cm³, sob temperatura constante de 24 °C. Os resultados mostraram que a superfície do adsorvente apresentou grupos ácidos, fenólicos, lactonas e básicos. A isoterma de equilíbrio obtida seguiu o comportamento do tipo I da classificação da IUPAC. A capacidade máxima de adsorção de CO₂ foi de 64,196 mg.g⁻¹, sob pressão inicial de 3,4 bar e temperatura de 24°C.

Palavras-chave: adsorção física, carvão ativado, sequestro de dióxido de carbono

In the present work, the adsorption isotherms of CO₂ on activated carbon produced from the coconut endocarp (*Cocos nucifera* L.), which is a residue generated in several agroindustrial processes, were studied. The synthesized carbon was characterized by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), X-ray fluorescence (XRF) and quantification of acidic and basic groups by the Boehm method. In order to obtain the adsorption isotherms of CO₂, the static volumetric technique was used in a fixed bed column of 2 cm internal diameter, 25 cm high and internal volume of 138,55 cm³, under a constant temperature of 24°C. The results showed that the surface of the adsorbent presented acidic, phenolic, lactone and basic groups. The obtained equilibrium isotherm followed the type I behavior of the IUPAC classification. The maximum adsorption capacity of CO₂ was 64,196 mg.g⁻¹, under initial pressure of 3.4 bar and temperature of 24 °C.

Keywords: physical adsorption, activated carbon, carbon dioxide sequestration

1. INTRODUÇÃO

Há um consenso mundial de que as crescentes emissões de gases de efeito estufa, em especial o dióxido de carbono, originado majoritariamente nas atividades industriais e na queima de combustíveis fósseis para geração de energia, de modo a atender às necessidades de uma crescente demanda da população mundial [1], são responsáveis por uma das maiores problemáticas ambientais da atualidade, a qual vem chamando bastante a atenção de pesquisadores e governos: o aumento da temperatura global ou intensificação do efeito estufa, com consequente alteração climática em escala planetária e seus efeitos que colocam em risco o futuro da humanidade.

O lançamento de CO₂ na atmosfera já era preocupante no século passado, quando foi registrado o aumento recorde de 21% entre os anos de 1980 e 1998, o que motivou a conferência das Nações Unidas que instituiu o Protocolo de Quioto, assinado por representantes de 192 países, cujo principal objetivo foi a viabilização de mecanismos e incentivos para proporcionar a diminuição das emissões de dióxido de carbono pelas nações industrializadas em 50% até o ano de 2050 [2].

Dentre os métodos existentes para promover a redução das emissões de dióxido de carbono, as tecnologias de captura e sequestro de CO₂ (CCS) vêm ganhando bastante destaque, uma vez que se apresentam como as soluções mais eficazes a curto e médio prazos para diminuir as emissões descontroladas de dióxido de carbono na atmosfera, bem como promover o sequestro desse gás já lançado na atmosfera [3].

O processo de captura e sequestro de CO₂ pode ser realizado por diversas técnicas, porém uma das que mais se destacam do ponto de vista da eficiência/viabilidade econômica é o processo de adsorção. O princípio da captura do dióxido de carbono por adsorção baseia-se na acomodação preferencial desse gás sobre a superfície porosa do adsorvente. Por se tratar de um processo que acontece na interface sólida, a escolha do adsorvente adequado, consiste em um dos principais fatores para se obter uma boa remoção [4].

Por outro lado, o Brasil se destaca mundialmente no contexto agroindustrial pela sua vasta extensão de terras agricultáveis e pela consequente e elevada produção de biomassa, porém uma parte significativa dessa biomassa se perde como resíduos e requer maior atenção visando ao seu reaproveitamento [5].

Focalizando-se na cultura do coco da Bahia (*Cocos nucifera L.*), segundo dados da FAO (2016) [6], o Brasil, em conjunto com a Indonésia, as Filipinas, a Índia e o Sri Lanka, em 2015, são os maiores produtores de coco do mundo. No Brasil, de acordo com o IBGE (2015) [7], os dois principais estados produtores foram a Bahia (32,8%) e Sergipe (13,5%), correspondendo, em termos absolutos, a cerca de 800 milhões de frutos produzidos na safra de 2015. Somente na forma de cascas de coco, segundo Martins e Jesus Júnior (2011) [8], são descartadas cerca de 7 milhões de toneladas por ano, ocasionando problemas ambientais nas cidades e desperdiçando um recurso natural que poderia ser aproveitado.

A carbonização de uma tonelada de cascas de coco produz em torno de 300 kg de biocarvão (*biochar*), que podem ser convertidos em 120 kg de carvão ativado [9]. Portanto, a produção de carvão a partir da casca de coco é bastante promissora em termos mercadológicos, uma vez que tanto o *biochar* quanto o carvão ativado são produtos de valor econômico, utilizados como fonte de energia renovável ou em aplicações mais nobres como no tratamento de água e efluentes líquidos [10].

A produção de carvão ativado pode ser conduzida pelas rotas de ativação física ou química, sendo que, no primeiro caso, o material é carbonizado sob atmosfera inerte e depois é ativado a altas temperaturas (acima de 700°C), utilizando-se geralmente vapor d'água ou dióxido de carbono, enquanto que, na ativação química, o material precursor é tratado com produtos químicos, a exemplo de ZnCl₂, H₃PO₄, H₂SO₄, NaOH, KOH, K₂CO₃, entre outros, sob temperaturas mais baixas (450 – 600°C), uma vez que há certo efeito catalítico na conversão da biomassa em presença de tais substâncias. A ativação química é comumente usada na produção de carvão a partir da biomassa, principalmente porque se alcança maior rendimento e maiores áreas superficiais [11].

O endocarpo produz um carvão rígido e granulado, com uma grande área superficial, bastante adequado para a adsorção de corantes, metais pesados, compostos orgânicos e inorgânicos, e gases ácidos como o CO₂ e H₂S, aliados a um baixo custo de produção [12].

Em suma, o presente trabalho trata do uso do endocarpo do coco (*Cocos nucifera L.*), como precursor na produção de carvão ativado para remoção de CO₂ presente em correntes gasosas, pela técnica da adsorção em leito fixo, visando sua potencial aplicação industrial no futuro.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Síntese do carvão ativado

O adsorvente foi sintetizado a partir do endocarpo do coco (*Cocos Nucifera L.*). Este resíduo foi obtido no comércio local (lanchonetes, padarias e indústrias de processamento de coco) do estado de Sergipe. O resíduo passou por uma limpeza para retirada de restos de polpa, posteriormente, foi lavado, triturado e seco em estufa a 80°C por 1 hora. Após, o resíduo de endocarpo do coco passou pelo processo de ativação com ácido fosfórico a 85%, na proporção mássica de 1:3 [200 g de endocarpo para 300 mL de ácido fosfórico (600 g)], proporção suficiente para que toda a massa de endocarpo ficasse imersa. Em seguida, a mistura foi aquecida à temperatura de 80°C durante 1

hora, sob agitação, a fim de promover maior ação do agente ativante sobre a superfície das cascas. Por fim, a massa de endocarpo impregnada foi filtrada e seca em estufa à 80°C durante o período de 24 horas. Após o aquecimento, as amostras foram pirolisadas à 700°C, durante 1 hora, com taxa de aquecimento de 25°C/min e fluxo de nitrogênio de 1 L/min. O carvão ativado obtido, foi então, resfriado, lavado e seco a 80°C durante 24 h.

2.2 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A análise do carvão ativado por FTIR foi realizada utilizando-se um espectrômetro de marca Thermo Scientific, modelo Nicolet IS10. Foi utilizada a técnica da pastilha de KBr, confeccionada com a adição de cerca de 0,1 g do carvão em grau pulverulento a 1 g de KBr, prensando-se em seguida a mistura, até um acentuado grau de compactação. Os espectros foram medidos em uma faixa de 400 a 4000 cm⁻¹, com resolução de 8 cm⁻¹ e 64 varreduras (*scans*).

2.3 Fluorescência de raios X

A análise do carvão ativado por fluorescência de raios X (FRX) foi executada no espectrômetro de fluorescência de raios X de marca Bruker S8, modelo Tiger 4 kW. Foi preparada uma pastilha utilizando o ácido bórico (H₃BO₃) como agente inerte para promover a compactação. Foram pesados cerca de 1 g do carvão em grau pulverulento e misturados com 20 g de ácido bórico, devidamente homogeneizados em almofariz de ágata, de cuja mistura foram retirados cerca de 7 g para prensagem, até a formação de uma pastilha firme, a qual foi levada ao equipamento para análise.

2.4 Determinação de grupos ácidos e básicos

Em 4 erlenmeyers de 250 mL foram postas 0,25 g de cavão ativado. Em seguida, no primeiro, segundo, terceiro e quarto erlenmeyer foram adicionados 50 mL da solução de NaOH (0,1 N), NaHCO₃ (0,1 N), Na₂CO₃ (0,1 N) e HCl (0,1 N), respectivamente. Após, os erlenmeyers foram fechados com papel alumínio e colocados sobre agitação por 24 horas. Passado este período, foi retirada uma alíquota de 10 mL do ernlemeyer 4, contendo HCl, sendo titulada com solução padrão de NaOH (0,1 N) e indicador fenolftaleína, para determinação dos grupos básicos. Para obtenção dos grupos ácidos, foram retiradas alíquotas de 10 mL dos erlenmeyers contendo as soluções de NaOH, Na₂CO₃ e NaHCO₃, adicionando-se, respectivamente, 10 mL, 15 mL e 20 mL de HCl, onde foram, aquecidas, resfriadas e retrotituladas com solução de NaOH (0,1N) e indicador fenolftaleína. Para cada amostra foi realizado também o respectivo ensaio em branco.

A quantidade de grupos ácidos e básicos foi calculada, fazendo-se o uso da Equação:

$$m_{\text{eq}} = V_t \frac{N_b (V_{\text{am}} - V_b)}{V_{\text{al}}} \times \frac{1}{m_{\text{carvão}}} \quad (1)$$

Sendo: m_{eq} = quantidade de grupos básicos, carboxílicos, lactonados e fenólicos (meq g⁻¹); V_t = volume total da solução (mL); N_b = concentração inicial de NaOH (N); $V_{\text{am}}-V_b$ = diferença dos volumes gastos de NaOH na titulação da amostra e do branco (mL); V_{al} = volume da alíquota (mL).

2.5 Obtenção das Isotermas

As isotermas de equilíbrio de adsorção consistem em funções que podem apresentar caráter linear ou curvilíneo, traçadas a partir da quantidade de material adsorvida pelo adsorvente no equilíbrio (q_e) em função da pressão de equilíbrio (P_e), sob temperatura constante. A isoterma foi obtida utilizando o método volumétrico estático, que consistiu em pressurizar uma coluna de leito fixo contendo 2 g de carvão ativado em contato com uma quantidade inicial de CO₂ determinada a partir da pressão inicial. Nos experimentos foram utilizadas as pressões 1,4; 1,8; 2,2; 2,6; 3,0; 3,4 bar e temperatura constante de 24°C, com triplicata em cada condição experimental. Por este foi

possível avaliar a dinâmica da queda da pressão inicial aplicada no sistema até a pressão de equilíbrio, o que indicou a adsorção do gás pela massa de adsorvente, até a sua saturação [13].

A pressão de equilíbrio (P_e) foi determinada a partir da aquisição *online* do sistema de adsorção, e a quantidade máxima de CO_2 adsorvida pelo carvão ativado (q_e) foi obtida através da razão entre a variação do número de mols de CO_2 livre entre o início do processo e o equilíbrio e a massa de adsorvente utilizada. O volume ocupado pelo CO_2 livre dentro da coluna foi determinado por meio da Eq. 2.

$$V_d = V_t - V_s \quad (2)$$

Sendo: V_d = volume ocupado pelo CO_2 na coluna; V_t = volume total da coluna; V_s = volume ocupado pelo adsorvente.

Calculado através da Eq. 3.

$$V_s = \frac{m_{\text{ads}}}{\rho_{\text{ads}}} \quad (3)$$

Sendo: V_s = volume ocupado pelo adsorvente; m_{ads} = massa de adsorvente; ρ_{ads} = massa específica real do adsorvente.

Para o cálculo do número de mols no início do processo e no equilíbrio, foram utilizadas as Eq. 4 e 5.

$$n_{\text{inicial}} = \frac{V_d}{(V_m)_{\text{inicial}}} \quad (4)$$

$$n_{\text{eq}} = \frac{V_d}{(V_m)_{\text{eq}}} \quad (5)$$

Sendo: n_{inicial} = número de mols de CO_2 no início do processo; n_{eq} = número de mols de CO_2 no equilíbrio; V_d = volume ocupado pelo CO_2 na coluna; $(V_m)_{\text{inicial}}$ = volume específico do CO_2 no início do processo; $(V_m)_{\text{eq}}$ = volume específico de CO_2 no equilíbrio.

O volume específico do CO_2 , tanto no início do processo como no equilíbrio, foi determinado pela equação de estado do Virial adaptada com as correlações de Pitzer para o segundo coeficiente, em função das pequenas/moderadas faixas de pressão que o sistema atua (1 a 6 bar), além do elevado grau de pureza do dióxido de carbono utilizado [14].

As referidas correlações são apresentadas por meio das Equações:

$$B^0 = 0,083 - \frac{0,422}{T_r^{1,6}} \quad (6)$$

$$B^1 = 0,139 \cdot \frac{0,172}{T_r^{4,2}} \quad (7)$$

$$B = \frac{RT_c}{P_c} \cdot (B^0 + \omega B^1) \quad (8)$$

$$Z = 1 + \frac{BP}{RT} \quad (9)$$

$$V_m = \frac{ZRT}{P} \quad (10)$$

Sendo: T_r = temperatura reduzida; T_c = temperatura crítica; R = constante universal dos gases; P_c = pressão crítica; P = pressão inicial ou no equilíbrio; ω = fator acêntrico para o CO_2 ; Z = fator de compressibilidade; V_m = volume específico do CO_2 inicial ou no equilíbrio.

Logo, a quantidade máxima de adsorção de CO_2 pelo carvão ativado foi obtida, fazendo-se o uso da Equação:

$$q_e = \frac{m_{\text{CO}_2\text{ads}}}{m_{\text{ads}}} \quad (11)$$

Sendo: q_e = quantidade máxima adsorvida (mg g^{-1}); $m_{\text{CO}_2\text{ads}}$ = massa de CO_2 adsorvida; m_{ads} = massa de adsorvente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização química do carvão ativado produzido

Na Figura 1 é apresentado o espectro de FTIR do carvão ativado. A banda em 3420 cm^{-1} está relacionada com o estiramento do grupo -OH. Os espectros de intensidade entre 2920 e 2851 cm^{-1} representam as bandas correspondentes as das ligações C-H de hidrocarbonetos. As absorções na região de 1551 a 1460 cm^{-1} implicam normalmente na ligação dupla (C=C) de compostos aromáticos. Já a banda de 1145 cm^{-1} está relacionada com a ligação (C-O) presente de compostos orgânicos [15]. A banda em 870 cm^{-1} decorre de ligação provavelmente de ligação (C-N).

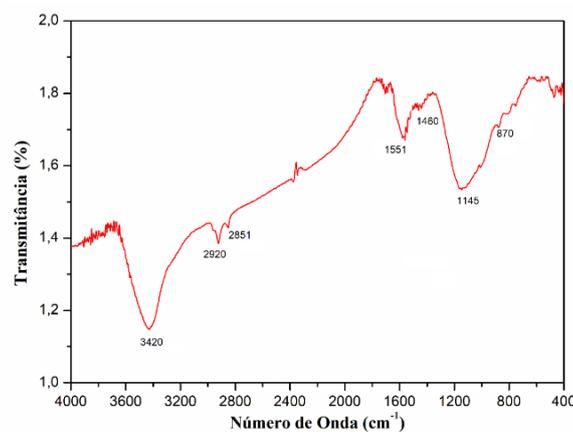


Figura 1-Espectros de FTIR do carvão ativado produzido.

Na Tabela 1 são apresentados os percentuais mássicos dos elementos presentes no carvão ativado obtidos por meio da espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX).

Tabela 1-Composição química do carvão ativado produzido.

Elemento ou composto químico	Concentração (%)
CH₂	96,90 ± 0,26
P	2,88 ± 2,34
Si	0,06 ± 1,49
K	0,04 ± 9,73
Na	0,03 ± 4,31
Al	0,03 ± 8,70
Mg	0,01 ± 7,03

Percebe-se na Tabela 1 que o carvão ativado apresentou composição elementar formada principalmente por C e H. Ribeiro (2012) [16] relata que esse alto conteúdo das espécies orgânicas se deve à própria composição da biomassa *in natura* que, ao perder oxigênio durante a pirólise, deixa um resíduo sólido rico em carbono fixo ou carbono/hidrogênio que constitui o carvão ativado. A presença do elemento fósforo (P) decorre agente ativante utilizado que foi o ácido fosfórico (H₃PO₄). Além destes elementos, o carvão ativado também apresentou alguns elementos inorgânicos, como Si, K, Na, Al e Mg.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos da quantificação dos grupos ácidos e básicos presentes na superfície do carvão ativado.

Tabela 2- Grupos químicos presentes na superfície do carvão ativado produzido.

Grupo químico	Valor obtido (meq g ⁻¹)
Carboxílicos	0,3848
Lactonas	0,2886
Fenólicos	0,4008
Básicos	0,1603

Percebe-se que, no carvão ativado, houve o predomínio de grupos ácidos (carboxílicos, lactonas e fenólicos), totalizando 1,0742 meq g⁻¹, valor superior ao dos grupos básicos com 0,1603 meq g⁻¹. Liu et al. (2007) [17] estudando carvão ativado comercial produzido de endocarpo de coco encontraram grupos químicos na superfície do carvão similares ao deste trabalho. Este resultado foi coerente com o trabalho apresentado por Lopes et al. (2013) [18], que mostrou que a casca do coco *in natura* já apresenta uma maior quantidade de grupos ácidos frente aos básicos, e que, certamente, são ampliados após o processo de funcionalização ou ativação com espécies ácidas.

3.2 Isoterma de equilíbrio de adsorção

A isoterma de equilíbrio de adsorção do dióxido de carbono pelo carvão ativado (Figura 2) mostra que a quantidade de CO₂ (qe) que é adsorvido aumenta rapidamente com o aumento da pressão de equilíbrio nas menores faixas de pressão, tendendo-se ao equilíbrio à proporção que aumenta-se a pressão inicial do sistema, corroborado pelo trabalho de Calvo-Muñoz et al. (2016) [19]. Os valores da quantidade adsorvida de CO₂ (qe) foram calculados usando a Equação 11.

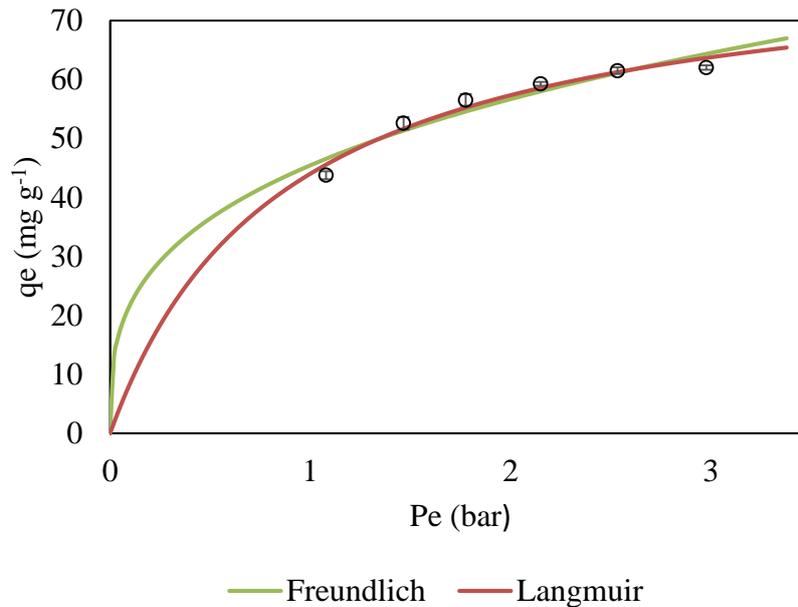


Figura 2-Isoterma de equilíbrio de adsorção do CO_2 no carvão ativado na temperatura de 24°C .

O comportamento da isoterma de equilíbrio obtida seguiu o do tipo I, segundo a classificação da IUPAC apresentada na Figura 3, revelando que a adsorção do dióxido de carbono ocorre em monocamada sobre a superfície do carvão ativado, favorecida pela presença de grupos orgânicos como: hidroxilas, fenóis, lactonas e aromáticos. O intenso aumento da capacidade de adsorção na faixa de baixas pressões é um aspecto bastante relevante para aplicações industriais e uma importante informação para o processo de otimização das condições operacionais, sobretudo para a definição das pressões de operação e de regeneração [20].

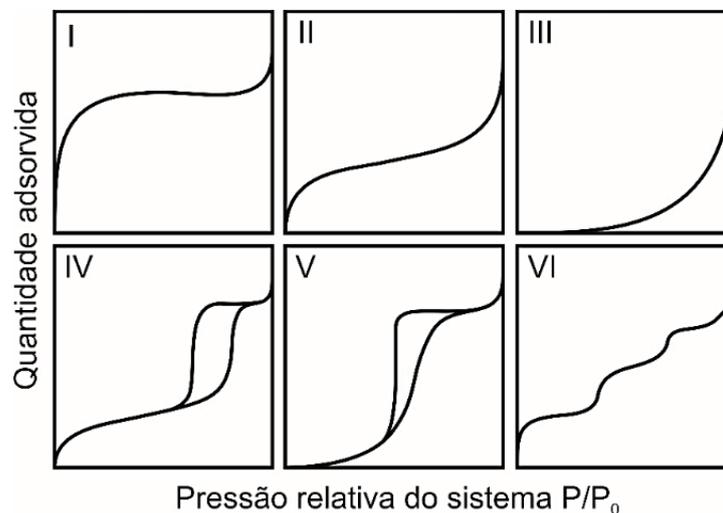


Figura 3- Classificação das isotermas de acordo com a IUPAC.
Fonte: Adaptado de Shcml (2013) [21].

Observa-se na Figura 2 que, para a temperatura de 24°C , a quantidade máxima de CO_2 adsorvida tende a $64,1960 \text{ mg g}^{-1}$, sob pressão da ordem de 3,4 bar mostrando-se similar ao encontrado por Ogungbenro et al. (2017) [22], que em condições similares de ativação e operação deste estudo, encontraram a capacidade máxima de $64,96 \text{ mg g}^{-1}$ para o carvão ativado produzido a partir de resíduos agroindustriais.

Na Tabela 2 são apresentados respectivamente os parâmetros dos modelos de Langmuir e Freundlich. Em ambos os modelos foi possível observar que todos os parâmetros foram significativos para o nível de confiança adotado de 95%, em função do baixo valor dos erros dos

parâmetros frente aos valores destes, e por conseguinte, apresentando um bom ajuste tanto para o modelo de isoterma de Langmuir como para o de Freundlich nas condições operacionais adotadas.

Tabela 2- Parâmetros dos modelos de isotermas de Langmuir e Freundlich para temperatura de 24°C.

T(°C)	Langmuir $\left(q_e = \frac{q_{\max} \cdot K_{eq} \cdot P_e}{1 + K_{eq} \cdot P_e} \right)$			Freundlich $\left(q_e = K_{eq} \cdot P_e^n \right)$		
	qmax (mg g ⁻¹)	K _{eq} (bar ⁻¹)	R ²	K _{eq} [(mg.g ⁻¹) (bar) ⁻ⁿ]	n	R ²
24	82,1861 ±3,9709	1,1529 ±0,1796	0,9984	45,4363 ±1,6181	3,1397 ±0,4532	0,9965

4. CONCLUSÃO

Neste estudo foi realizado teste de remoção do dióxido de carbono utilizando o carvão ativado sintetizado a partir do endocarpo do coco (*Cocos Nucifera L.*) como adsorvente. Através das caracterizações por espectroscopia de infravermelho por transformada de fourier, fluorescência de raios X e determinação de grupos ácidos e básicos, tornou-se possível avaliar as características químicas de grupos orgânicos e inorgânicos da superfície, sendo possível observar e inferir sobre o favorecimento destes no processo de interação entre o dióxido de carbono e o carvão ativado. A isoterma evidenciou que a capacidade adsorptiva do carvão ativado aumenta progressivamente com o aumento da pressão inicial, sendo a capacidade máxima de 64,196 mg.g⁻¹ na condição de 24 °C e 3,4 bar, apresentando bom ajuste tanto modelo de Langmuir como ao de Freundlich. Sendo assim, tornou-se possível evidenciar que o adsorvente produzido neste estudo apresenta-se promissor para adsorção de dióxido de carbono, podendo ser utilizado em sistemas de captura de CO₂.

5. AGRADECIMENTOS

Aos departamentos de Engenharia Química da Universidade Federal de Sergipe e da Universidade Estadual de Maringá e à CAPES.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Energy technology perspectives 2006: scenarios & strategies to 2050. Paris: Stedi Media, 2006.
2. IPCC – Climate Change 2014: Synthesis Report. Cambridge University Press, 2014.
3. IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE: special report on carbon dioxide capture and storage. Cambridge University Press, Cambridge, 2005.
4. Nascimento FR, Lima ARA, Vidal CB, Melo DQ, Raulino GSC. Adsorção: Aspectos Teóricos e Aplicações Ambientais. 1. ed. Fortaleza: Imprensa Universitária; 2014.
5. Bergmann J. Biodiesel production in Brazil and alternative biomass feedstocks. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013 May;21:411-420, doi:10.1016/j.rses.2012.12.058
6. FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture (SOFIA): Contributing to food security and nutrition for all, Rome: Food and Agriculture Organization; 2016. 200 p.
7. IBGE. Levantamento sistemático da produção agrícola - pesquisa mensal de previsão e acompanhamento das safras agrícolas no ano civil, 2015 Out, 10, 1-79.
8. Martins CR, Jesus Júnior LA. Evolução da produção de coco no Brasil e o comércio internacional: panorama 2010. Embrapa Tabuleiros Costeiros. 2011 Jun;1:1-30.
9. Van Dam JEG. Coir processing technologies - improvement of drying, softening, bleaching and dyeing coir fibre/yarn and printing coir floor coverings. [Technical Paper], Wageningen (NLD): Department of Fibres and Cellulose Agrotechnological Research Institute (ATO bv); 2002. 51 p.

10. Mohan D, Sarswat A, Sikok Y, Pittman CUJ. Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent – a critical review. *Bioresource Technology*. 2014 May;160:191-202, doi:10.1016/j.biortech.2014.01.120
11. Yahya MA, Al-Qodah Z, Zanariah Ngah CW. Agricultural bio-waste materials as potential sustainable precursors used for activated carbon production: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015 Jun; 46,218-235, doi:10.1016/j.rser.2015.02.051
12. Hauchhum L, Mahanta P. Kinetic, Thermodynamic and Regeneration Studies for CO₂ Adsorption onto Activated Carbon. *International Journal of Advanced Mechanical Engineering*. 2014 Jun;4:27-32.
13. Sarker MAI. Equilibrium and mass transfer behaviour of CO₂ adsorption on zeolites, carbon molecular sieve, and activated carbons. [Dissertação], Saskatchewan (SK): Universidade de Regina; 2012. 106 p.
14. Smith JM, Van Ness HC, Abbott MM. Introdução à termodinâmica da engenharia química. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC; 2007.
15. Pavia DL, Lampman GM, Kriz GS, Vyvyan JR. Introdução à Espectroscopia. 4. ed. São Paulo: Cengage Learning; 2010.
16. Ribeiro RF. Avaliação de tortas de oleaginosas com potencial para produção de biodiesel na obtenção de materiais adsorventes para remoção de metais em meio aquoso. [Tese], Minas-Gerais (MG): Universidade Federal de Minas Gerais; 2012. 182 p.
17. Liu SX, Chen X, Chen XY, Liu ZF, Wang HL. Activated carbon with excellent chromium(VI) adsorption performance prepared by acid-base surface modification. *Journal of Hazard Mater*. 2007 Mar;1:315-319, doi:10.1016/j.jhazmat.2006.07.006
18. Lopes CW, Bertella F, Pergher SBC, Finger PH, Dallago RM, Penha FG. Síntese e caracterização de carvões ativados derivados do sabugo de milho. *Perspectiva Erechim*. 2013 Set;37:27-35
19. Calvo-Muñoz EL, Garcia-Mateos FJ, Rosas JM, Rodriguez-Mirasol J, Cordero T. Biomass Waste Carbon Materials as Adsorbents for CO₂ Capture and Post-Combustion Conditions. *Original Research*. 2016 May;3:1-14, doi:10.3389/fmats.2016.00023
20. Singh VK, Kumar EA. Comparative Studies on CO₂ Adsorption Kinetics by Solid Adsorbents. *Energy Procedia*. 2016 Dec;90:316-325, doi:10.1016/j.egypro.2016.11.199
21. Schmal M. Cinética e Reatores: Aplicação na Engenharia Química, teoria e exercícios. 2. ed. Rio de Janeiro: Synergia; 2013.
22. Ogungbenro AE, Quang DV, Al-Ali K, Abu-Zahra MRM. Activated Carbon from Date Seeds for CO₂ Capture Applications. *Energy Procedia*. 2017 Nov;114:2313-2321, doi:10.1016/j.egypro.2017.03.1370.