
OBTENÇÃO DE CARVÃO ATIVADO PROVENIENTE DO COCO VERDE APLICADO NO TRATAMENTO DE EFLUENTES TÊXTEIS – ENGENHARIA QUÍMICA – UNISOCIESC/ CAMPUS JOINVILLE

OLIVEIRA, Bianca Cristina de ¹
SILVA, Gabriela Goetsch da ²
ARAÚJO, Dr. Rogério Gomes ³

RESUMO

O carvão ativado é um material adsorvente amplamente utilizado para realizar a purificação da água e diversos componentes de forma eficaz, sua porosidade possui excelentes características de adsorção, entretanto, seu custo comercial ainda é de alto valor estimado. No Brasil, grande parte do carvão utilizado é importado. O coco verde é uma fruta com alto teor de carbono, e cerca de 80% de seu fruto é destinado ao lixo, apenas a minoria de seu material é reaproveitado e o restante é descartado, muitas vezes de forma inadequada causando poluição e superlotação em aterros sanitários. Através deste trabalho, espera-se obter um carvão ativado a partir dos resíduos fibrosos do coco verde, que possua propriedades iguais ou superiores ao CA comercial, além disso, visa-se reduzir de forma significativa o impacto ambiental. No procedimento experimental apresentado foram realizadas diversas etapas de preparação do material, incluindo a ativação química do coco para maior aderência nos poros, seguida da etapa de carbonização com três temperaturas distintas, foram utilizadas as temperaturas de 350°C, 400°C e 550°C, o carvão comercial foi utilizado como comparativo aos carvões produzidos. Foram realizadas análises para caracterização do carvão, tais como, distribuição granulométrica, análise de isoterma de BET, Langmuir, Freundlich, e análise cinética. De acordo com os estudos realizados, foi possível concluir que o material com melhor caráter de adsorção foi produzido na pirólise a 550°C, obteve uma remoção de 90% do azul de metileno e maior poder adsorativo em relação ao carvão comercial, que removeu 87% do corante em solução.

Palavras-chave: Adsorção; Azul de Metileno; Carvão Ativado; Coco Verde; Pirólise.

1 INTRODUÇÃO

O coco é uma matéria prima brasileira com abundância no país. Através dele é possível gerar diversos subprodutos, com diversas aplicações na indústria de alimentos e cosméticos, entretanto apenas 20% de seu material é aproveitado, e o restante é descartado muitas vezes de forma inadequada. Mesmo se tratando de um composto biodegradável, o descarte inconsciente gera o acúmulo de resíduos contribuindo com o desenvolvimento de fungos e bactérias, além de possuir odor

¹Graduanda do Curso de Engenharia Química do Centro Universitário UNISOCIESC, bianca.c_oliveira@hotmail.com; ²Graduanda do Curso de Engenharia Química do Centro Universitário UNISOCIESC, gabrielaagoetsch@gmail.com; ³Professor orientador: Dr. Rogério Gomes Araújo, Centro Universitário UNISOCIESC, araujo@unisociesc.com.br;

desagradável e causar contaminação do solo, pois mesmo que a decomposição aconteça de forma natural, a casca do coco assim como toda matéria orgânica exposta em condições anaeróbicas, é capaz de produzir e liberar metano, que é um dos gases causadores do efeito estufa. Seu tempo de decomposição pode levar até 10 anos. Todavia, essa matéria prima exhibe potencial para grandes aplicações no mercado, por se tratar de um composto com elevado teor de carbono, quando pirolisado pode-se obter carvão ativado e agindo como agente adsorvente para diversas aplicações.

Através deste trabalho, espera-se contribuir com novos estudos utilizando não somente as fibras de coco verde, mas também outras fontes de resíduos orgânicos como matéria prima, adaptando as melhores condições e processos para produção, no intuito de contribuir com o meio ambiente, reduzir o impacto ambiental, e viabilidade econômica.

Este projeto tem como principal objetivo, a produção de carvão ativado a partir da casca do coco verde e a comprovação da sua eficiência na remoção do corante azul de metileno proveniente de processos têxteis. O mesmo está dividido em duas etapas, sendo a primeira a obtenção do CA e a segunda etapa, análises para caracterização do carvão e comprovação da eficiência.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para construção deste referencial teórico, baseou-se em pesquisas bibliográficas sobre o coco, processo de carbonização e a operação unitária de adsorção. Também foi comentado sobre o desenvolvimento prático através da construção deste artigo.

2.1 *COCOS NUCIFERA LINN*

Entre as palmeiras tropicais existentes no mundo, uma das mais difundidas é o coqueiro (*Cocos nucifera L.*), originária da Índia e pertencente à família Palmae, uma das mais importantes da classe *Monocotyledoneae* (GOMES, 2003).

O fruto do coqueiro (coco) possui em seu interior oco, o chamado albúmen líquido (água), que com o tempo vai se transformando em albúmen sólido e pode ser comestível. Este é envolvido pelo endocarpo, que é a parte mais dura e de coloração

marrom, chamada também de camada pétreo. O que sucede é o mesocarpo, parte fibrosa e de espessura entre 3 a 5 cm que compõe a maior parte da fruta. E por fim o exocarpo, uma fina camada de cor geralmente verde, amarela ou marrom (ARAGÃO, 2002).

Segundo Martins e Jesus Jr. (2014), o coqueiro é considerado uma planta de múltiplas funcionalidades pelos inúmeros produtos que podem ser obtidos através do fruto, que foi considerado mundialmente como um recurso essencial para toda a humanidade. Sua extensão comercial se dá por aproximadamente 90 países, onde se encontram as melhores condições de plantio, em regiões arenosas com alta radiação solar, umidade adequada, e uma precipitação bem distribuída.

2.2 CONSUMO E DESCARTE

Brainer e Ximenes (2020, p. 1), afirmam que “a produção mundial de coco, estimada para 63,6 milhões de toneladas em 2020, continua bastante concentrada em três Países, Indonésia (30,1%), Filipinas (24,7%) e Índia (19,0%)”. Atualmente o Brasil ocupa a quinta posição entre os maiores produtores mundiais.

Devido ao crescente consumo do coco no ambiente urbano, houve um aumento significativo na geração de subprodutos provenientes do fruto, gerando um grande volume de resíduos que são destinados a descarte em aterros sanitários (ROSA et al., 2001). Visto que devido a lenta degradação, a decomposição da casca do coco pode demorar cerca de 8 á 10 anos (CARIJO *et al.*, 2002).

Em geral, as fibras naturais são fonte de energia, podendo ser utilizadas na queima para produção de carvão, carvão desodorizante e carvão ativado, mas também na fabricação de outros artigos proveniente da fibra como tapetes, cordas marítimas, escovas, pincéis (MARTINS *et al.*, 2013) .

2.3 CARVÃO ATIVADO E A CARBONIZAÇÃO DO ADSORVENTE

O carvão ativado é normalmente produzido através da decomposição térmica de substâncias com elevadas quantidades de carbono, pela ativação com vapor d'água ou dióxido de carbono sob altas temperaturas (ALVES, 2005).

O CA possui grande porosidade e forma microcristalina, não grafitica, que sofre processamento para aumentar a porosidade interna (CLAUDINO, 2003). Alves (2005),

ainda afirma que a superfície do carvão é totalmente apolar, embora uma leve polaridade possa surgir quando houver oxidação da superfície. Como resultado, os adsorventes provenientes do CA tendem a ser hidrofóbicos e organofílicos.

Segundo Nogueira *et al.* (2000), o poder calorífico superior da fibra de coco é em torno de 5.447,38 kcal/kg, sua composição elementar possui 48,23% de carbono; 5,23% de hidrogênio; 33,19% de oxigênio; 2,98% de nitrogênio; 0,12% de enxofre e 10,25% de outros elementos.

Dentro da estrutura de componentes que caracterizam a fibra de coco, a celulose e a lignina são os principais, sendo a lignina a principal responsável para parte carbonácea do carvão ativado. (ANDRADE, 2004; CABRAL *et al.* 2017).

Existem duas formas de ativar o carvão, uma térmica e outra química, através da ativação química é possível obter uma área de contato maior e poros desenvolvidos, que auxiliam na adsorção (SILVA *et al.* 2007). A produção do carvão ativado envolve duas etapas principais: pirólise e ativação (ANDRADE, *et al.* 2004; AWOYEMI, 2011).

2.3.1 Pirólise

De acordo com McMahon (2020) a pirólise se trata de uma decomposição que ocorre quando o corpo é submetido a alta temperatura, após o tratamento ele atinge a forma de carvão. É necessário utilizar a menor quantidade possível de oxigênio para que a oxidação não interfira no processo.

Esta é a primeira etapa da ativação do carvão, nesta etapa o precursor é submetido em tratamento térmico onde é removido componentes voláteis e gases leves, para desta forma obter uma massa de carbono fixo (CLAUDINO, 2013). Essas condições permitem com que o material se torne cada vez mais poroso, desta forma facilitando a aderência e provocando um maior teor adsorvente (RAMOS, 2009; VASQUES, 2008).

2.3.2 Ativação

O processo de ativação é subsequente ao processo da pirólise, nesta etapa, visa-se a obtenção de um material com alta porosidade e desobstrução dos poros do carvão, para gerar a maior aderência possível objetivando o aumento da área

superficial. A ativação pode ser química ou física (BOLIGON, 2015 *apud* BANSAL; DONNET; STOECKLI, 1988; MARSH; RODRÍGUEZ-REINOSO, 2006; AWOYEMI, 2011). Neste processo, o material é submetido a temperaturas inferiores às da pirólise em conjunto de fluxo de gases, baixa oxigenação e vapores de água, esse processo aumenta a superfície de contato e a capacidade de adsorção (AMARAL, 2003). O agente ativante utilizado também influencia no resultado final do carvão.

2.4 ADSORÇÃO

Para Tadini *et al.* (2019, p. 399), “A adsorção está associada ao enriquecimento de um ou mais componentes em uma região interfacial”. Os componentes que se unem à superfície são chamados adsorvatos, enquanto que a fase sólida que retém o adsorvato é chamada adsorvente.

“Como o adsorvato concentra-se na superfície do adsorvente, quanto maior for a área superficial, maior será a eficiência da adsorção. Por isso geralmente os adsorventes são sólidos com partículas porosas.” (BORBA, 2006 *apud* BONATTO, 2013).

Como explica Gouvea (2018) a adsorção é baseada em um fenômeno superficial, onde algumas moléculas ficam aderidas à superfície de materiais sólidos, isso ocorre por conta da diferença de carga eletrostática. Na mesma linha, o autor ainda pontua que a indústria química e de alimentos faz o uso da adsorção em remoção de cor, odor e outros compostos.

“A adsorção ocorre quando moléculas, ao difundirem em uma fase fluida, são capturadas em certo período de tempo por forças atrativas de uma superfície sólida adjacente. A superfície apresenta descontinuidades na estrutura do sólido e, em adição, regiões nessa superfície disponibilizam energias residuais que não são contrabalançadas pela vizinhança presente no corpo da estrutura. As forças residuais superficiais mencionadas, comuns a todas às superfícies, nada mais são que as interações de Van der Waals.” (TADINI 2019).

Processos de adsorção são utilizados no tratamento de água, pois removem produtos químicos através do tratamento. De acordo com Letterman (1999), as moléculas que sofrem adsorção podem ser representadas de acordo com a equação 1.

$$A + B = A \cdot BA + B = A \cdot B \quad (1)$$

Na equação temos que A é o adsorbato, B o adsorvente e A.B o composto adsorvido.

A adsorção física é um processo rápido e não seletivo, envolvendo forças de Van der Waals, também é conhecida como fisissorção (BRUNCH, 1997). De acordo com Schettino Junior (2009) “A adsorção e dessorção física ocorrem em qualquer sistema sólido-gás à mesma temperatura e são comparáveis ao efeito de liquefação e condensação dos gases.”

A adsorção química envolve reações químicas entre o adsorvente e o adsorbato através da transferência de elétrons. Na adsorção química, também conhecida como quimissorção (BRUNCH, 1997), há uma ligação química presente entre o adsorbato e a superfície do sólido adsorvente, isso depende da afinidade entre os elementos para formar a ligação (SCHETTINO JUNIOR, 2009; VASQUES, 2008). Na Tabela 1 é possível observar as diferenças entre a adsorção química e física.

Tabela 1 - Diferenças entre adsorção química e física

Adsorção Química	Adsorção Física
Fenômeno caracterizado por especificidade química;	Fenômeno genérico e ocorre em qualquer sistema sólido/fluido;
Há alterações de natureza química por dissociação ou reação, de modo que na dessorção não há recuperação do adsorvente (não é reversível);	São mínimos os efeitos no estado eletrônico do adsorvente e adsorbato. A natureza do adsorvente não é alterada (permite adsorção e dessorção);
Envolve energia de ativação;	Não envolve energia de ativação;
Forças comparáveis a ligações químicas;	Forças de Van der Waals;
Adsorção em monocamada.	Adsorção em multicamadas.

Fonte: BOLIGON, 2015; *apud* BURWELL JUNIOR, 1976

2.4.1 Isoterma de Adsorção

O modelo de Langmuir é uma das equações mais comuns e utilizadas para representar um processo de adsorção. Segundo NASCIMENTO *et al.* 2014, o modelo propõe que a adsorção ocorre em monocamada (comportamento esperado para quimissorção), superfície homogênea e tem um número de sítios bem definidos.

Outro modelo de isoterma frequentemente utilizada é o modelo de Freundlich, que propõe a adsorção em multicamadas, em superfície heterogênea e vários tipos de sítios de adsorção. (NASCIMENTO *et al.* 2014).

A teoria de Brunauer, Emmett e Teller é considerada uma extensão da isoterma de Langmuir. Conforme o autor, a adsorção em monocamada pode ser calculada, mas se estende e pode formar multicamadas sobre a superfície do adsorvente. O modelo ainda permite que seja determinada a área superficial e a estrutura porosa do material (NASCIMENTO *et al.* 2014).

2.5 ESTADO DA ARTE

É possível verificar em diversos trabalhos a aplicação de resíduos orgânicos para produção ativa do carvão.

De acordo com Gardini e Polese (2019) chegou-se a conclusão que para a carbonização da fibra do coco verde, temperaturas na faixa de 350 °C são as mais adequadas, onde foi obtida excelente remoção do corante azul de metileno.

Morais (2014) defende que os resultados de carvão obtidos sem controle da atmosfera podem ser uma alternativa satisfatória quando se busca um baixo custo.

Cortes *et al.* (2010) produziu carvão ativado a partir da casca do coco verde, onde conduziu o experimento em um forno pequeno de baixa capacidade, a uma temperatura de 350°C. O mesmo afirmou que em termos qualitativos, que o carvão apresentou boa viabilidade para uso energético.

O carvão de fibra de juta obtido a partir da extração do caule da planta mostrou-se eficiente na remoção do corante azul de metileno em soluções aquosa, segundo estudos (STAVROPOULOS *et al.*, 2005 *apud* WERLANG *et al.*, 2013).

Foi produzido carvão ativado tratado quimicamente com ZnCl₂, a partir de resíduos do beneficiamento do café. Os estudos apontaram alta capacidade de adsorção em testes realizados no tratamento de corante azul de metileno, onde pode ser comparável ao carvão ativado comercial (BRUM *et al.*, 2008).

Os resultados obtidos pelas pesquisas citadas, comprovam que existem diversas fontes de resíduos carbonáceos para obtenção do carvão e que as mesmas mostraram-se eficazes quando utilizadas como adsorvente.

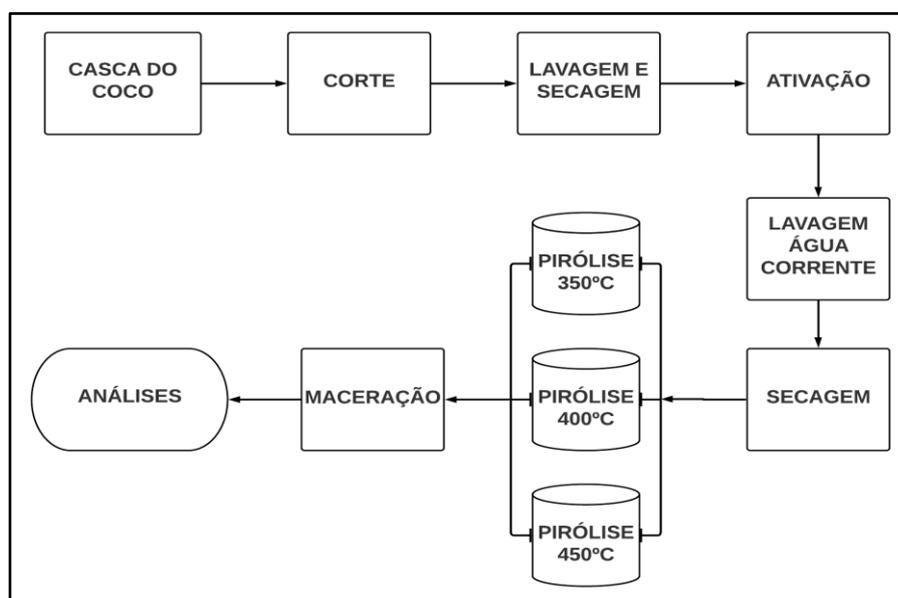
3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho foi baseada em estudos de Gardini e Polese (2019) e Nunes e Silva (2019). Primeiramente foi produzido o carvão ativado a partir das fibras da casca do coco verde. Após a produção, foram realizadas análises para caracterização do carvão e comprovação da sua eficiência na remoção de cor por adsorção de uma solução aquosa de azul de metileno, que foi utilizado como adsorvato.

3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A Figura 1 apresenta o fluxograma com as etapas do processo para a produção e caracterização do carvão ativado. O procedimento experimental foi de acordo com trabalhos publicados até o momento. Foram ressalvas algumas melhorias de acordo com o que já havia sido proposto em periódicos anteriores.

Figura 1 - Fluxograma com etapas do procedimento experimental



Fonte: As autoras (2021)

3.1.1 Preparação da Matéria Prima

Para a realização do experimento, inicialmente foi realizada a coleta de 6 unidades de coco verde. Os frutos foram abertos para retirada da água e do endocarpo e levados para o laboratório da Unisociesc.

Após esse procedimento, as amostras foram cortadas e picadas em cubos de aproximadamente 3 cm com o auxílio de uma faca. Em seguida a amostra foi higienizada com água fervente e posteriormente, foi pesada e levada para uma estufa para secagem onde foi mantida em temperatura de 80° C por 24 horas.

3.1.2 Ativação e carbonização do coco

Após a secagem, a amostra foi pesada novamente e passou pelo processo de ativação química. Foi preparado uma solução ativante de NaOH (hidróxido de sódio) com concentração de 100 g/L, essa amostra ficou submersa por um período de 6 horas. Após esse tempo a amostra foi lavada em água corrente para retirada do excesso de NaOH e foi submetida a secagem em estufa a 80°C por 24 horas.

Depois do processo de secagem, pesou-se novamente e iniciou-se a etapa de carbonização. Para cada condição estabelecida utilizou-se 268,4 g de coco já seco e ativado, foram utilizados cadinhos de porcelana para poder suportar as altas temperaturas. As três amostras foram carbonizadas em um forno mufla pré-aquecido, onde foram empregadas as temperaturas de 350°C, 400°C e 550°C para cada amostra, por 20 minutos.

Por fim, as amostras foram pesadas e maceradas até chegar a um estado de pequenos grânulos. A partir desta etapa, foram realizadas as análises para avaliar a eficiência do carvão como adsorvente.

3.2 ANÁLISES DE CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO

Após a caracterização do adsorvente, foram realizadas análises para verificar a eficiência do material, como distribuição granulométrica para classificar o tamanho das partículas, ensaio cinético com a finalidade de verificar a adsorção do azul de metileno ao longo do tempo, e isotermas de Langmuir, Freundlich e BET, para identificar o modelo que melhor se adequa ao processo. Através da análise de BET também foi possível averiguar a área superficial das amostras.

3.2.1 Análise de Distribuição Granulométrica

Posicionou-se o jogo de peneiras no agitador, com tamanhos de 3,35 mm; 2,36 mm; 2 mm; 1,4 mm e 0,5 mm que foram sobrepostas em ordem decrescente de abertura de malha. Colocou-se a amostra, em seguida a tampa e fixou-se o conjunto. O agitador foi regulado para um tempo de 15 minutos em uma rotação média de 90 MHz. Após o tempo decorrido, foi realizada a pesagem do material retido em diferentes tamanhos de peneira.

3.2.3 Análise de Isoterma de Langmuir, Freundlich e BET

Para a determinação dos parâmetros de isotermas de Langmuir e Freundlich, os ensaios foram realizados em temperatura ambiente. As amostras dos carvões produzidos a 350°C, 400°C e 550°C foram analisadas em triplicatas. Para esta análise, também foi utilizado carvão comercial para efeito comparativo com os carvões produzidos.

Amostras com massas (0,5; 1,0 e 1,5 g) foram adicionadas respectivamente em três béqueres, cada recipiente contendo 100 ml de uma solução do corante azul de metileno com concentração 5 mg/L, totalizando 12 amostras. Em seguida, as mesmas foram disponibilizadas sob agitação constante em um shaker com rotação regulada de 100 RPM por 150 minutos, conforme a figura 2.

Figura 2 – Amostragem dos carvões a) 350°C e 400° respectivamente; b) 550°C e comercial respectivamente



Fonte: As autoras (2021)

Foi realizada a medição de absorvância no espectrofotômetro de UV-visível e comprimento de onda 665 nm, no tempo zero e após o tempo final determinado de

150 minutos. Através da curva de calibração, os valores de absorvância foram convertidos em concentrações.

A partir da banda de adsorção associada à concentração do azul de metileno na solução, foi possível determinar os parâmetros das isotermas e a capacidade de adsorção dos carvões obtidos em diferentes temperaturas de queima, utilizando as equações.

A teoria de Langmuir está representada pela Equação 2:

$$\frac{q_e}{q_m} = \frac{b \cdot C_e}{1 + b \cdot C_e} \quad (2)$$

Em que: q_e = quantidade de sólidos adsorvidos por unidade de massa adsorvente (mg.g^{-1}); q_m = concentração máxima de sólido adsorvidos (mg.g^{-1}); b = constante de equilíbrio de adsorção de Lagmuir (L.mg^{-1}) e C_e = concentração na fase líquida (mg.L^{-1}).

Linearizando a equação 2 para obter com maior facilidade os parâmetros q_m e b que serão utilizados para obter o fator (R_L) conforme equação 3:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{b \cdot q_m} + \frac{C_e}{q_m} \quad (3)$$

O fator de separação (R_L) conforme apresentado na equação 4, é a equação que indica se a adsorção é favorável. Se $R_L > 1$ a isoterma é desfavorável. Se $R_L = 1$ a isoterma é linear. Se $0 < R_L < 1$ a isoterma é favorável e se $R_L = 0$ a isoterma é irreversível.

$$R_L = \frac{1}{1 + b \cdot C_0} \quad (4)$$

Onde: R_L = Fator de separação (adimensional); C_0 = Concentração inicial do soluto (mg.L^{-1}).

A isoterma de Freundlich segue conforme equação 5:

$$q_e = kC_e^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

Onde q_e é a quantidade adsorvida por unidade de massa do carvão; C_e é a concentração em equilíbrio; k é a constante da capacidade de adsorção e n é a constante de intensidade de adsorção.

Linearizando, os parâmetros de Freundlich podem ser determinados pelo coeficiente angular e linear, conforme a equação 6:

$$\log q_e = \log K_F + (1/n) \cdot \log C_e \quad (6)$$

Para a determinação das isotermas de BET, as amostras foram levadas até a empresa FGM dental *group* onde foram analisadas. O equipamento *Quantachrome NovaWin* ©1994-2013, *Quantachrome Instruments* v11.03 utilizado, é capaz de fornecer os valores de adsorção e dessorção de N₂ no material para construção de isotermas e determinação da área superficial do poro.

A teoria de BET pode ser expressa pela equação 7.

$$V_A = \frac{V_m C_t P}{P_0 - P \left[1 + \frac{(C_t - 1)P}{P_0} \right]} \quad (7)$$

Em que: C_t = cte relacionada com o tamanho do poro; P = pressão; P_0 = pressão de saturação do gás; V_a = quantidade de gás adsorvido em mL e V_m = capacidade de adsorção na monocamada.

3.2.4 Ensaio Cinético

A eficiência de adsorção do carvão ativado em relação ao tempo é verificada através da análise de adsorção do azul de metileno.

Primeiramente, construiu-se a curva de calibração a partir de amostras de azul de metileno nas concentrações de 40; 20; 10; 5; 2,5; 1,25 e 0,625 mg/L. Posteriormente, as amostras dos carvões produzidos a 350°C, 400°C e 550°C foram analisadas em triplicatas. Para esta análise, também foi utilizado carvão comercial para efeito comparativo com os carvões produzidos.

As amostras com massas (0,5; 1,0 e 1,5 g), foram adicionadas em béqueres contendo uma solução de 100 ml do corante azul de metileno com concentração 5 mg/L e disponibilizadas em shaker, onde permaneceram sob com agitação constante com rotação regulada de 100 RPM, por um período de 150 minutos.

Alíquotas foram coletadas com auxílio de uma conta gotas, colocadas em cubeta e analisadas em espectrofotômetro UV-Visível no comprimento de onda 665 nm para verificar a absorbância. Nos primeiros 80 min de experimento, as amostras foram coletadas de 20 em 20 minutos e posteriormente foram retiradas de 30 em 30 minutos até completar o tempo proposto.

As equações cinéticas foram avaliadas com base nos resultados obtidos na análise cinética, usando equações pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem, conforme as equações 8 e 9 respectivamente.

$$\log (q_e - q) = \log(q_e) - k/2,3t \quad (8)$$

$$t/q = t/q_e + 1/kq_e^2 \quad (9)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo será discutido e apresentado os resultados provenientes das análises realizadas para caracterização e obtenção do carvão.

4.1 Preparação do carvão ativado

Inicialmente foi produzida uma primeira remessa de carvão ativado, que não obteve as características físico-químicas esperadas.

Houve dificuldade em se trabalhar com a matéria prima desde o início do processo, pois o material aparentemente estava muito seco e altamente rígido. A amostra foi preparada e carbonizada normalmente conforme o roteiro. Porém, devido à

impossibilidade de uso do laboratório, foi dada sequência no experimento somente 10 semanas após a produção, onde o carvão foi lavado para retirada de NaOH. Mesmo após a secagem a amostra apresentou umidade quando submetido a agitação no shaker, uma pigmentação escura proveniente do carvão se diluiu na solução interferindo na leitura de absorvância referente ao azul de metileno. Conforme estudos apresentados por Fernandes em 2014, a capacidade de adsorção depende do prazo em que foi produzido, podendo haver a diminuição gradual da quantidade adsorvida com o tempo. Sendo assim, foi realizada uma nova produção de carvão em busca de melhores resultados. Este passou por algumas adaptações no processo, como a lavagem do ativante químico antes carbonização, por um período de tempo menor. O material obtido foi utilizado e submetido a análises de caracterização. Todos os dados necessários para os cálculos foram obtidos através de um único ensaio em batelada.

4.2 Rendimento gravimétrico

Para verificar o rendimento gravimétrico da amostra, foram realizadas diversas pesagens ao longo do processo, como pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 – Rendimento Gravimétrico ao longo do processo

Descrição	Peso	Unidade
Amostra antes da 1ª secagem (úmido)	7,459	kg
1ª secagem (antes da ativação química)	859,00	g
2ª secagem (após ativação química)	806,40	g
Cada amostra antes da carbonização	268,40	g
Carvão de 350°C	123,90	g
Carvão de 400°C	119,09	g
Carvão de 550°C	95,52	g

Fonte: As autoras (2021)

Durante a pirólise do material carbonáceo, ocorre uma elevada perda de massa em virtude das reações de decomposição da matéria orgânica com geração de compostos.

Foi determinado o rendimento gravimétrico através da razão da massa do carvão (g) em relação à massa do coco seco (g), conforme Equação 10.

$$RGC = \left(\frac{P_{\text{carvão}}}{P_{\text{coco seco}}} \right) \times 100 \quad (10)$$

Resultando em um rendimento de aproximadamente 43,22 %, 41,54 % e 33,32 % para os carvões de 350°C, 400°C e 550°C respectivamente.

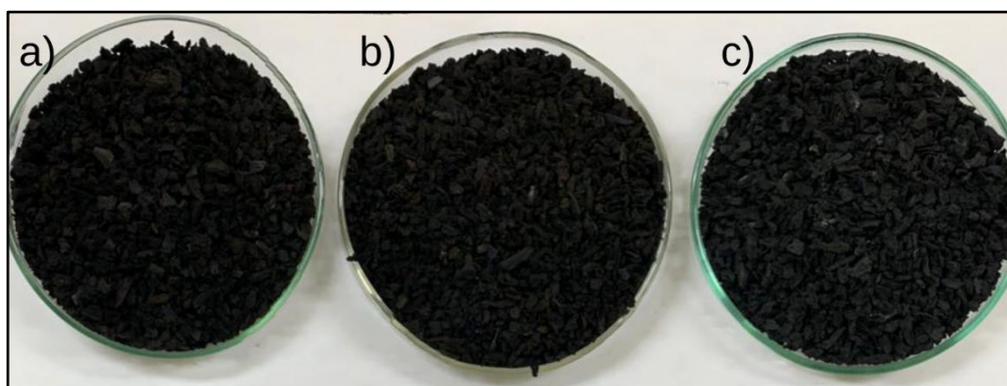
Houve perda de carvão durante o processo de carbonização a 550° C devido a problemas técnicos com a mufla. A grande instabilidade e oscilação de temperatura (que ultrapassou 600° C), fez com que a amostra se transformasse em cinzas.

4.1 Ensaio granulométrica

Os carvões produzidos apresentados na Figura 3 foram macerados e posteriormente realizou-se o ensaio granulométrico. O mesmo foi realizado para que se pudesse obter um padrão de grãos, para que não houvesse variações nas análises de cinética e isoterma.

Apenas partículas retidas nas peneiras com diâmetro entre 2,00mm e 2,36 mm foram utilizadas para as análises, devido a maior facilidade em se trabalhar com partículas maiores durante a coleta das alíquotas.

Figura 3 - Amostras dos carvões às temperaturas de a) 350°C; b) 400°C; c) 550°C

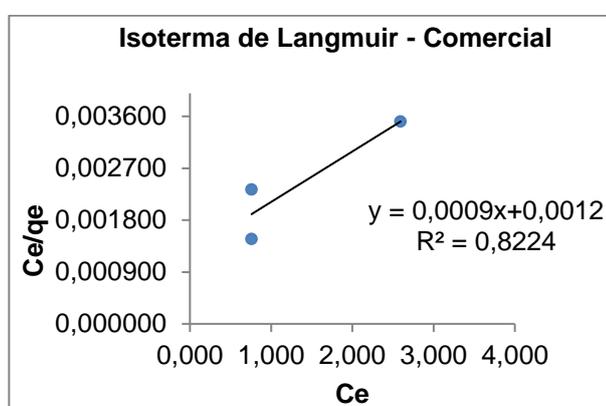


Fonte: As autoras (2021)

4.3 Análise Isoterma de Adsorção

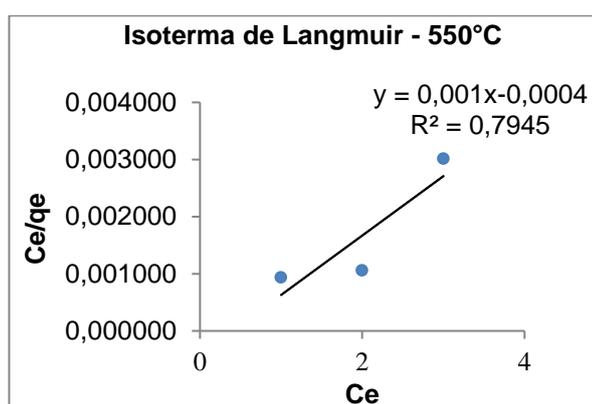
A partir do experimento realizado para análise das isotermas de Langmuir e Freundlich, foi possível identificar qual modelo se adequa melhor ao processo. Conforme apresentado nos gráficos 1 e 2, a isoterma de Langmuir possui um ajuste mais satisfatório em relação a isoterma de Freundlich (gráficos 3 e 4), visto que $0 < R_L < 1$ obtido para a isoterma de Langmuir indica que o adsorvato prefere a fase sólida à líquida e a adsorção é dita favorável. Concluiu-se que a adsorção acontece em monocamada e segue conforme o modelo de Langmuir.

Gráfico 1 – Isoterma de Langmuir no carvão comercial



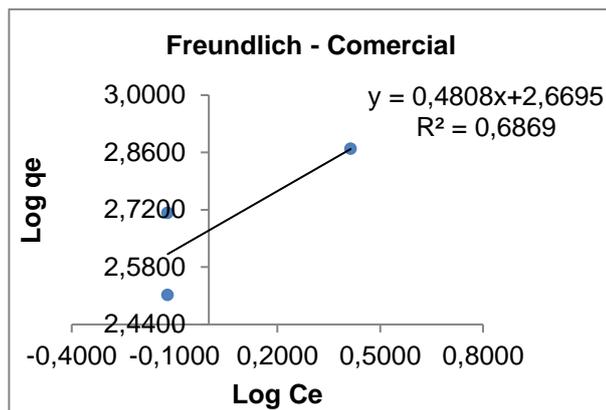
Fonte: As autoras (2021)

Gráfico 2 – Isoterma de Langmuir no carvão de 550°C



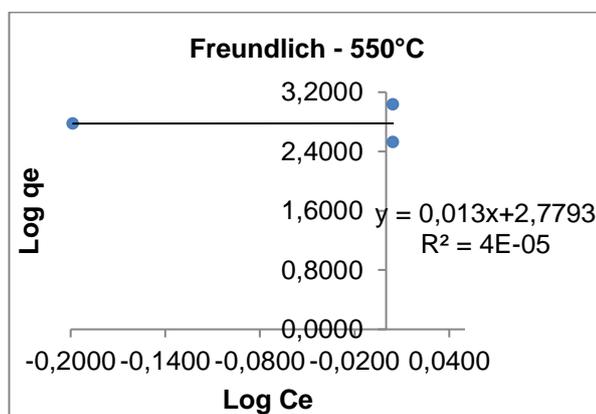
Fonte: As autoras (2021)

Gráfico 3 – Isoterma de Freundlich no carvão comercial



Fonte: As autoras (2021)

Gráfico 4 – Isoterma de Freundlich no carvão de 550°C



Fonte: As autoras (2021)

Os carvões produzidos a 350°C e 400°C não foram utilizados nos cálculos. Ao fim do experimento, o pigmento escuro proveniente do carvão interferiu na leitura de absorvância e conseqüentemente na concentração, conforme apresentados nas tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Dados obtidos referente ao carvão de 350°C

CARVÃO - 350° C				
t (min)	Amostra (g)	Absorbância (nm)	Ce (mg/mL)	qe (mg/g)
0	0,5	0,152	4,452	0,000
150	0,5	0,542	14,251	-1959,799
0	1	0,221	6,186	0,000
150	1	1,193	30,608	-2442,211

0	1,5	0,316	8,573	0,000
150	1,5	1,599	40,809	-2149,079

Fonte: As autoras (2021)

Tabela 4 – Dados obtidos referente ao carvão de 400°C

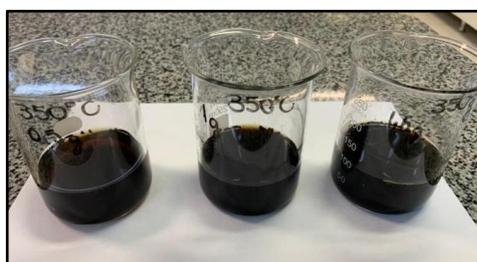
CARVÃO - 400° C				
t (min)	Amostra (g)	Absorbância (nm)	Ce (mg/mL)	qe (mg/g)
0	0,5	0,159	4,628	0,000
150	0,5	0,402	10,734	-1221,106
0	1	0,152	4,452	0,000
150	1	0,767	19,905	-1545,226
0	1,5	0,204	5,759	0,000
150	1,5	1,338	34,251	-1899,497

Fonte: As autoras (2021)

4.4 Análise Cinética

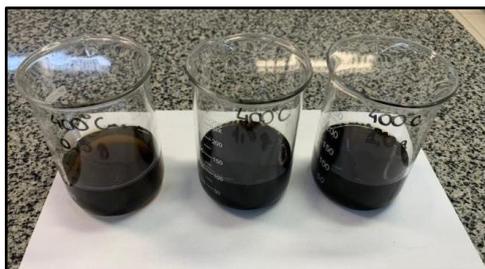
A partir da análise experimental, foram obtidos os valores de absorbância. Para os cálculos, não foram utilizados os carvões de 350°C e 400°C apresentados nas figuras 4 e 5. Quando as amostras foram disponibilizadas sob agitação em shaker, uma pigmentação escura proveniente do carvão se diluiu em solução.

Figura 4 – Amostras do carvão de 350°C após 150 minutos



Fonte: As autoras (2021)

Figura 5 – Amostras do carvão de 400°C após 150 minutos



Fonte: As autoras (2021)

Isso fez com que a absorvância no espectrofotômetro aumentasse com o tempo, interferindo no cálculo de concentração do adsorvato, conforme apresentado nas tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Dados obtidos referente a absorvância

ABSORBANCIA 665 (mm)												
T (min)	350°C			400°C			550°C			COMERCIAL		
	0,5 g	1,0 g	1,5 g	0,5 g	1,0 g	1,5 g	0,5 g	1,0 g	1,5 g	0,5 g	1,0 g	1,5 g
0	0,152	0,221	0,316	0,159	0,152	0,204	0,230	0,238	0,215	0,225	0,210	0,199
10	0,587	1,230	1,339	0,280	0,442	0,840	0,129	0,121	0,095	0,175	0,166	0,139
20	0,838	0,970	1,264	0,553	0,507	0,918	0,101	0,070	0,050	0,173	0,155	0,127
30	0,401	1,262	1,635	0,323	0,580	0,927	0,106	0,050	0,045	0,158	0,130	0,108
40	0,434	1,131	1,475	0,331	0,613	1,029	0,063	0,032	0,058	0,156	0,107	0,091
50	0,419	1,058	1,300	0,325	0,645	1,103	0,039	0,023	0,073	0,151	0,091	0,074
60	0,450	1,058	1,521	0,352	0,680	1,114	0,036	0,016	0,067	0,143	0,074	0,057
70	0,454	1,247	1,495	0,333	0,675	1,154	0,036	0,019	0,060	0,129	0,071	0,048
80	0,465	1,107	1,550	0,321	0,665	1,125	0,019	0,021	0,059	0,125	0,062	0,039
100	0,505	1,220	1,432	0,349	0,656	0,143	0,017	0,009	0,056	0,115	0,037	0,021
120	0,526	1,350	1,140	0,431	0,728	0,14	0,016	0,004	0,041	0,094	0,028	0,006
150	0,542	1,193	1,599	0,402	0,767	1,338	0,015	0,000	0,015	0,078	0,005	0,005

Fonte: As autoras (2021)

Tabela 6 – Dados obtidos referente a concentração em relação ao tempo

CONCENTRAÇÕES												
T (min)	350°C			400°C			550°C			COMERCIAL		
	0,5 g	1,0 g	1,5 g	0,5 g	1,0 g	1,5 g	0,5 g	1,0 g	1,5 g	0,5 g	1,0 g	1,5 g
0	4,452	6,186	8,573	4,628	4,452	5,759	6,412	6,613	6,035	6,286	5,910	5,633
10	15,382	31,538	34,276	7,668	11,739	21,739	3,874	3,673	3,020	5,030	4,804	4,126
20	21,688	25,005	32,392	14,528	13,372	23,698	3,171	2,392	1,889	4,980	4,528	3,824
30	10,709	32,342	41,714	8,749	15,206	23,925	3,296	1,889	1,764	4,603	3,899	3,347
40	11,538	29,050	37,693	8,950	16,035	26,487	2,216	1,437	2,090	4,553	3,322	2,920
50	11,161	27,216	33,296	8,799	16,839	28,347	1,613	1,211	2,467	4,427	2,920	2,492
60	11,940	27,216	38,849	9,477	17,719	28,623	1,538	1,035	2,317	4,226	2,492	2,065
70	12,040	31,965	38,196	9,000	17,593	29,628	1,538	1,111	2,141	3,874	2,417	1,839
80	12,317	28,447	39,578	8,698	17,342	28,899	1,111	1,161	2,116	3,774	2,191	1,613
100	13,322	31,286	36,613	9,402	17,116	4,226	1,060	0,859	2,040	3,523	1,563	1,161
120	13,849	34,553	29,276	11,462	18,925	4,151	1,035	0,734	1,663	2,995	1,337	0,784
150	14,251	30,608	40,809	10,734	19,905	34,251	1,010	0,633	1,010	2,593	0,759	0,759

Fonte: As autoras (2021)

Para transformar os resultados de absorvância em concentração, plotou-se o gráfico da curva de calibração para o corante azul de metileno, cujo a equação da reta obtida foi $y=0,0398x-0,0252$ e $R^2 = 0,9984$. Com os resultados da Tabela 5 e a equação da reta, foi possível realizar os cálculos com o auxílio do excel.

O carvão de comercial apresentou remoção máxima de 87,16%, já o carvão de 550°C apresentou uma remoção superior de 90,42%, mostrados nas tabelas 7 e 8.

Tabela 7 – Dados obtidos referente ao carvão comercial

CARVÃO COMERCIAL					
Amostra(g)	Absorbância	Ce (mg/mL)	Conc. adsorvido (mg/mL)	q (mg/g)	Remoção (%)
0,5	0,078	2,593	3,693	738,693	58,753
1,0	0,005	0,759	5,151	515,075	87,160
1,5	0,005	0,759	4,874	324,958	86,530

Fonte: As autoras (2021)

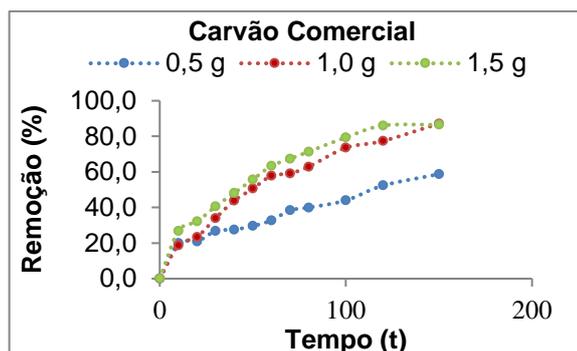
Tabela 8– Dados obtidos referente ao carvão comercial

CARVÃO - 550°C					
Amostra (g)	Absorbância	Ce (mg/mL)	Conc. adsorvido (mg/mL)	q (mg/g)	Remoção (%)
0,5	0,015	1,010	5,402	1080,402	84,248
1,0	0,000	0,633	5,980	597,990	90,426
1,5	0,015	1,010	5,025	335,008	83,264

Fonte: As autoras (2021)

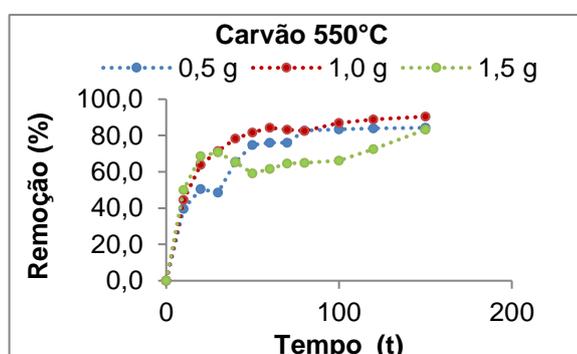
Nos gráficos 5 e 6 percebe-se que o tempo de contato aumenta ao longo do tempo.

Gráfico 5 – Remoção em relação ao tempo do carvão comercial



Fonte: As autoras (2021)

Gráfico 6 – Remoção em relação ao tempo do carvão de 550°C



Fonte: As autoras (2021)

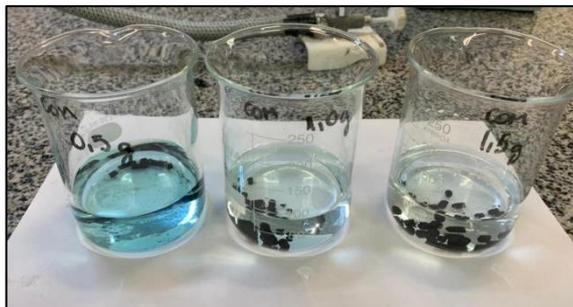
Concluiu-se que o carvão de 550°C produzido a partir da casca de coco verde é eficaz como adsorvente, quando comparado ao carvão comercial (Figura 6 e Figura 7).

Figura 6 – Amostras do carvão de 550° após 150 minutos



Fonte: As autoras (2021)

Figura 7 – Amostras do carvão comercial após 150 minutos

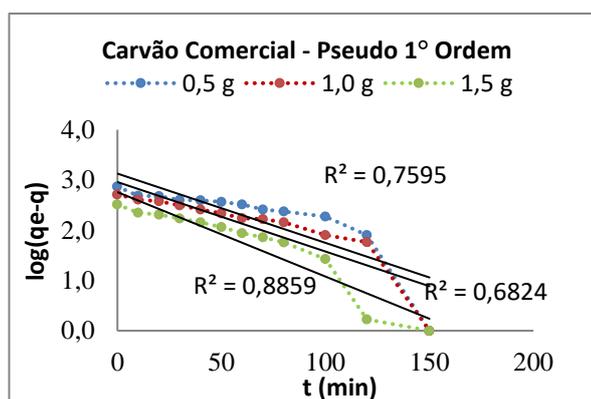


Fonte: As autoras (2021)

4.4.1 Cinética de pseudo-primeira e segunda ordem

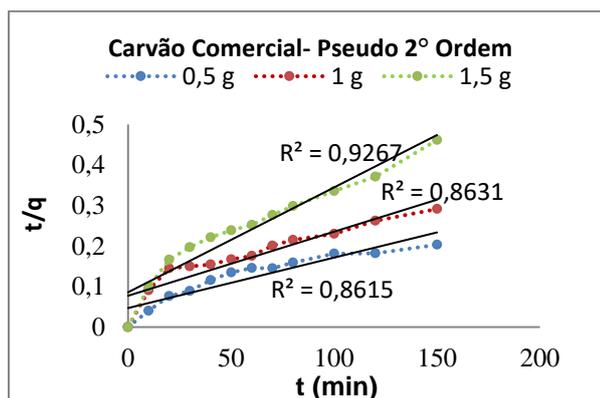
Fez-se a linearização das equações de cinética de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem a fim de obter os valores da constante de equilíbrio (k). Para isso, foi necessário plotar primeiramente o gráfico de pseudo-segunda ordem para encontrar Q_e e com esse valor, plotar o gráfico de pseudo-primeira ordem.

Gráfico 7 – Pseudo- primeira do carvão Comercial após 150 minutos



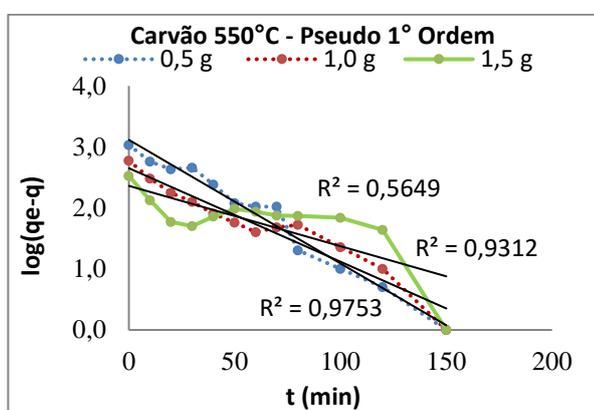
Fonte: As autoras (2021)

Gráfico 8 – Pseudo- segunda ordem do carvão Comercial após 150 minutos



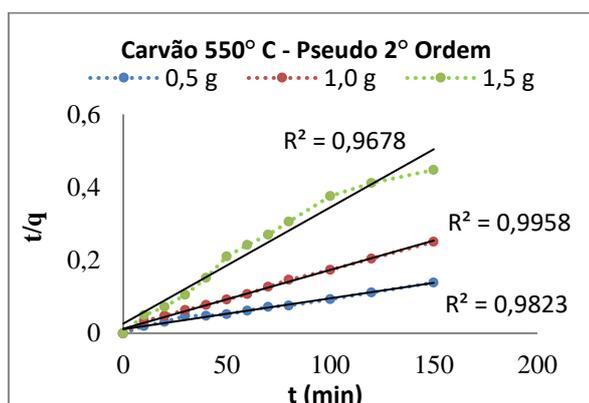
Fonte: As autoras (2021)

Gráfico 9 – Pseudo- primeira ordem do carvão de 550°C após 150 minutos



Fonte: As autoras (2021)

Gráfico 10 – Pseudo- segunda ordem do carvão de 550°C após 150 minutos



Fonte: As autoras (2021)

Comparando os valores de R^2 apresentados nos gráficos 7, 8, 9 e 10 a cinética que melhor se adequou ao processo foi pseudo de segunda ordem.

4.5 Isoterma de BET

Através da análise de adsorção dos gases realizada pela empresa FGM, foi possível obter o tamanho dos poros em cada amostra produzida. De acordo com Tabela 9, observa-se uma variação relevante em relação ao carvão comercial.

Tabela 9 – Dados obtidos referente a área superficial das amostras

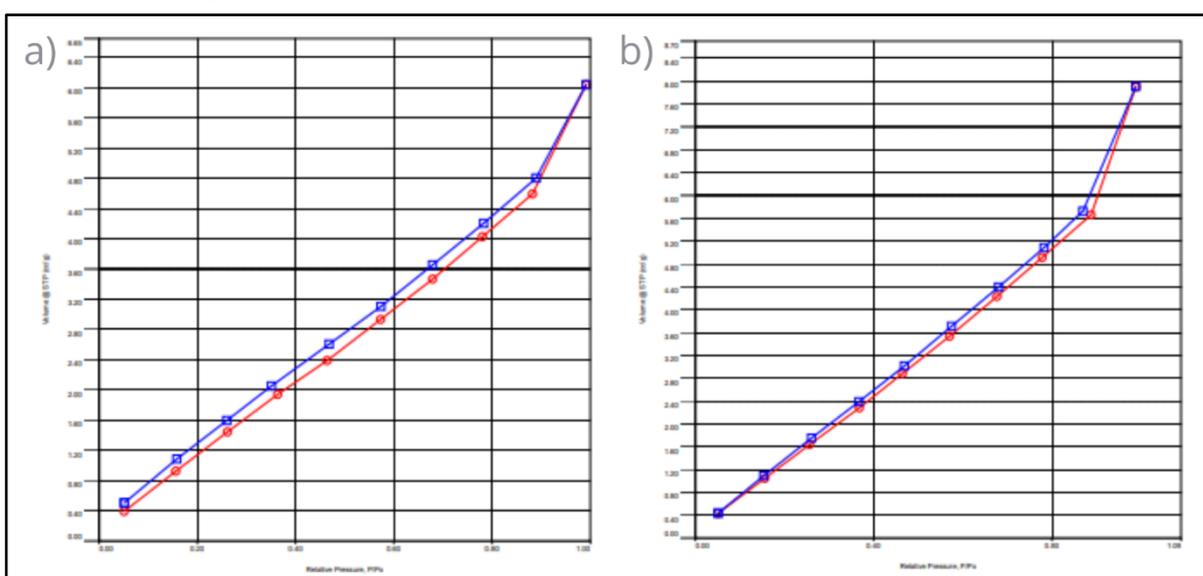
Amostra	350 °C	400°C	550°C	Comercial
Área Superficial	0.581 m ² /g	0.985 m ² /g	0.522 m ² /g	42.792 m ² /g

Fonte: FGM Group dental (2021)

Conforme descrito em literatura, esse tipo de isoterma é obtido por adsorção não específica do nitrogênio, cujo objetivo é demonstrar a quantidade adsorvida pelo seu volume em condições de padrões de temperatura e pressão (NASCIMENTO *et al.* 2014).

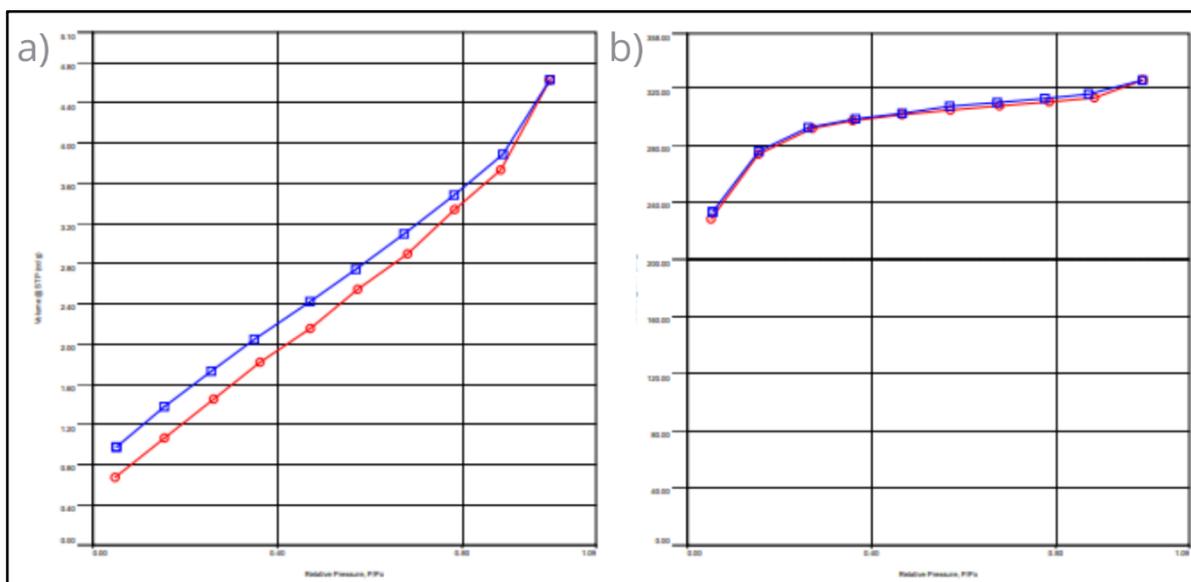
As figuras 8 e 9 apresentam os dados gráficos referente a isoterma de adsorção-dessorção (vermelho-azul) de N₂ a 77 K dos carvões.

Figura 8 – Isoterma adsorção-dessorção carvões a) 350°C; b) 400°C



Fonte: FGM Group dental (2021)

Figura 9 – Isoterma adsorção-dessorção carvões a) 550°C; b) Comercial



Fonte: FGM Group dental (2021)

De acordo com Nascimento *et al.* 2014 a IUPAC classifica as isotermas em 6 tipos. Os carvões de 350°C, 400°C e 550°C se enquadram no tipo II, típica de sólidos não porosos. O carvão comercial está entre o tipo I e II. O tipo I é característico de sólidos com microporosidade.

Com os dados apresentados por esta análise de BET, concluiu-se que o carvão produzido não é um bom adsorvente, visto que a porosidade é quase 80 vezes menor comparado ao comercial e que se enquadram na isoterma tipo II, de sólidos não porosos. Estes resultados discordam daqueles obtidos no ensaio de adsorção de azul de metileno, que apontaram desempenho favorável do carvão obtido com a pirólise a 550°C. O estudo requer novas análises, porém as análises atuais indicam que mesmo apresentando uma área superficial inferior à do carvão comercial, o carvão obtido com casca de coco mostrou uma boa capacidade de adsorção.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa, entendeu-se que o melhor carvão foi produzido na pirólise a 550°C, mostrando-se altamente eficaz como adsorvente, visto que apresentou 90% em remoção de azul de metileno, superior ao carvão comercial que foi de 87%.

Através dos dados coletados, foi possível identificar que o modelo que melhor se adequa a análise de cinética e isoterma foi o de Langmuir para o carvão de 550°C e compará-lo ao comercial.

Os carvões produzidos a 350°C e 400°C apresentaram desempenho inadequado no ensaio de adsorção de azul de metileno devido à pigmentação escura proveniente do carvão presente em solução, que fez com que a absorvância aumentasse com o tempo interferindo nos cálculos de concentração, a pirólise incompleta do material pode ser responsável.

No ensaio de BET, os carvões produzidos apresentaram área superficial pequena quando comparadas ao comercial. O carvão de 550°C apresentou a menor área superficial e a isoterma se apresentou desfavorável para os carvões produzidos, visto que as curvas obtidas indicam uma estrutura de sólido não poroso. Teoricamente por ter menor área superficial, o carvão de 550°C deveria ser a amostra com a menor potencial adsortivo, porém conforme os resultados da análise de adsorção de azul de metileno, esse carvão apresentou uma boa capacidade de adsorção, apesar da reduzida área superficial.

Durante o processo produtivo houve dificuldade em se trabalhar com a mufla, a mesma apresentou problemas técnicos, o que dificultou o controle de temperatura causando grande oscilação. Em alguns momentos a mufla não passou de 320°C e em outro ultrapassou 600°C, o que fez com que tivéssemos que trabalhar com a mufla aberta para baixar a temperatura.

Para trabalhos posteriores é interessante realizar ensaios em paralelo do carvão com e sem ativação química, bem como o tratamento químico após a carbonização do material.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Azarias Machado de; PASSOS, Paulo Roberto de Assis; MARQUES, Luiz Guilherme da Costa; OLIVEIRA, Luciano Basto; VIDAURRE, Graziela Baptista; ROCHA, José das Dores de Sá. Pirólise de resíduos do coco-da-baía (*Cocos nucifera* Linn) e análise do carvão vegetal. **Revista Árvore**, [S.L.], v. 28, n. 5, p. 707-714, out. 2004.

BONATTO, Isabela da Cruz. **REMOÇÃO DE H₂S ATRAVÉS DE ADSORÇÃO POR CARVÃO ATIVADO**. 2012. 165 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

BRAINER, Maria Simone de Castro Pereira; XIMENES, Luciano F.. PRODUÇÃO DE COCO: soerguimento das áreas tradicionais do nordeste. **Caderno Setorial Etene**, Fortaleza, v. 127, n. 5, p. 1-15, ago. 2020. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/>. Acesso em: 25 out. 2020.

BRUM, S. S. et al. **Preparação e caracterização de carvão ativado produzido a partir de resíduos do beneficiamento do café**, Revista Química Nova, v. 31, p. 1048-1052, 2008.

CABRAL, Mirelle Márcio Santos *et al.* Composição da fibra da casca de coco verde in natura e após pré-tratamentos químicos. **Engevista**, Alagoas, v. 19, p. 99-108, jan. 2017.

CHRISTOFOLETTI, S. R.; MORENO, M. M. T.. Granulometria por difração a laser e sua relação com a faciologia das rochas argilosas da Formação Corumbataí-SP. **Cerâmica**, [S.L.], v. 63, n. 367, p. 303-310, set. 2017.

CORRADINI, Elisângela; ROSA, Morsyleide de Freitas; MACEDO, Bruno Pereira de; PALADIN, Priscila Danielle; MATTOSO, Luiz Henrique Capparelli. Composição química, propriedades mecânicas e térmicas da fibra de frutos de cultivares de coco verde. **Revista Brasileira de Fruticultura**, [S.L.], v. 31, n. 3, p. 837-846, set. 2009.

FIGUEIREDO, Aneliése Lunguinho. Pirólise termoquímica de pós da fibra de coco seco em um reator de cilindro rotativo para produção de bio-óleo. 2011. 127 f. Dissertação (Mestrado em Pesquisa e Desenvolvimento em Ciência e Engenharia de Petróleo) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

GARDINI, Lilian; POLESE, Maísa. **Caracterização e eficiência de carvão ativado produzido a partir da casca do coco verde**. Orientador: Janaina Karine Andrezza. 2019. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Química) - UNISOCIESC, [S. /], 2019.

GOUVÊA, Carlos Alberto Klimeck. TCC e projeto integrador para cursos na área da química. Campinas: Átomo, 2019.

INOVATIVA. **Carvão Ativado**: INT desenvolve alternativas para obtenção e uso. Revista eletrônica do Instituto Nacional de Tecnologia, [s. l.], 2017.

MARTINS, Carlos Roberto. **Produção e comercialização de coco no Brasil frente ao comércio internacional**: panorama 2014 / Carlos Roberto Martins – Aracaju : Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2013. Disponível em <http://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/>. Acesso em: 20 out 2020

MORAIS, Everaldo Dantas de. Produção do carvão ativado a partir do mesocarpo do coco-da-baía (cocosnuciferalinn) utilizando H₃PO₄, CH₃COONa e KOH como ativantes. 2014. 68f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

PINTO, Marcos Vinícios de Souza; SILVA, Denilson Luz da; SARAIVA, Augusto César Fonseca. Obtenção e caracterização de carvão ativado de caroço de buriti (*Mauritia flexuosa* L. f.) para a avaliação do processo de adsorção de cobre (II). **Acta Amazonica**, [S.L.], v. 43, n. 1, p. 73-80, mar. 2013

ROCHA, Otidene Rossiter Sá da; NASCIMENTO, Grazielle Elisandra do; CAMPOS, Natália Ferreira; SILVA, Valdinete Lins da; DUARTE, Marta Maria Menezes Bezerra. Avaliação do processo adsorptivo utilizando mesocarpo de coco verde para remoção do corante cinza reativo BF-2R. **Química Nova**, [S.L.], v. 35, n. 7, p. 1369-1374, 2012.

RODRIGUEZ, A.L. *et al.* Produção de carvão ativado: a partir de resíduos vegetais. **Revista Jovens Pesquisadores**, Santa Cruz do Sul, v. 3, ed. 156-167, 2013.

SALES, Priscila F. de; BERTOLI, Alexandre C.; PINTO, Felipe M.; MAGRIOTIS, Zuy Maria. Production, Characterization and Application of Activated Carbon Obtained from the Corncob: the search for the reuse of an agroindustrial waste. **Revista Virtual de Química**, [S.L.], v. 7, n. 4, p. 1174-1188, 2015. Sociedade Brasileira de Química (SBQ).

SILVA, Alessandro Costa da. REAPROVEITAMENTO DA CASCA DE COCO VERDE. **Revista Monografias Ambientais**, [S.L.], v. 13, n. 5, p. 4078-4086, 18 dez. 2014. Universidad Federal de Santa Maria.

SILVA, F. A. B.; NUNES, Taise. **Produção de carvão ativado a partir do caroço da manga**. Orientador: Janaina Karine Andrezza. 2019. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Química) - UNISOCIESC, [S. /], 2019.

STOPPE, A.C.R.; *et al.* REMOÇÃO DO CORANTE AZUL DE METILENO NO TRATAMENTO DE EFLUENTES POR ADSORÇÃO EM CARVÃO DE COCO VERDE E CARVÃO ATIVADO: **XXXIX CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS ENEMP 2019**, Belém. Disponível em: <<https://proceedings.science/enemp-2019/papers/remocao-do-corante-azul-de-metileno-no-tratamento-de-efluentes-por-adsorcao-em-carvao-de-coco-verde-e-carvao-ativado>> Acesso em: 21 out. 2020.

TADINI, Carmen Cecília *et al.* **Operações unitárias**: na indústria de alimentos. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019. v. 2.