



OBTENÇÃO DE *BIOCHAR* ATIVADO A PARTIR DA PIRÓLISE CATALÍTICA DO RESÍDUO LIGNOCELULÓSICO DO ETANOL 2G

VENANCIO V. L. DA S. BEZERRA^{1*}, LARYSSA P. G. VASCONCELOS¹, SANDRA H. V. DE CARVALHO¹, JOÃO I. SOLETTI¹, CARMEM LUCIA DE P. S. ZANTA¹, MOZART D. BISPO¹

¹Universidade Federal de Alagoas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química Faculdade de Engenharia Química

*e-mail: venancio_vitor@hotmail.com

RESUMO - O etanol de segunda geração (Etanol 2G) é uma das principais inovações tecnológicas atuantes no setor sucroalcooleiro. O uso das pontas e palhas da cana-de-açúcar para ampliação da produção de álcool é cercado de vantagens econômicas. Apesar das grandes vantagens e benefícios, a produção do Etanol 2G apresenta como problemática a geração do resíduo lignocelulósico (RLC), que é aplicado à queima para geração de energia elétrica da unidade, porém, ele apresenta uma estrutura química interessante com vasta aplicabilidade industrial e econômica. Em função dessas características, decidiu-se avaliar a possibilidade de transformação desses resíduos em materiais adsorventes. Para isso submeteu-se o RLC ao processo de Pirólise com a adição de NaOH, o qual atua como catalisador. Buscando avaliar a eficiência adsorviva do *biochar* para tratamento de efluentes, decidiu-se estudar a adsorção do *biochar* na remoção de corantes, empregando Azul de Metileno como poluente modelo. O *biochar* que apresentou melhor rendimento no processo de pirólise foram usados para os estudos adsorvivos de Cinética. Os resultados mostraram que a adição de catalisador no RLC reduziu a quantidade de massa degradada, sendo o *biochar* gerado de uma biomassa aquecida a 500°C, com adição de NaOH equivalente a 100,0% de RLC, com diâmetro de 300µm o mais adequando em termos quantitativos. As análises espectroscópicas comprovaram a eficiência da degradação, bem como a determinação do perfil ativador do *biochar* devido à quantidade de poros existentes.

INTRODUÇÃO

A indústria sucroalcooleira é um dos setores mais produtivos do estado de Alagoas, a qual é uma das principais referências socioeconômicas da região. Como todo processo químico, a fabricação de açúcar e álcool também gera resíduos que muitas vezes são descartados. Contudo, as técnicas de reaproveitamento dão ao setor o recurso de gerarem novos produtos a partir de suas sobras, a exemplo, mais especificamente das pontas e palhas com a geração do Álcool de Segunda Geração (Etanol 2G) (Brasil, 2021) (Macedo, 1992) (Dias, et al., 2012).

Apesar de se tratar de um produto inovador com direta aplicação no mercado, a linha de processo do Etanol 2G também gera seus resíduos. Trata-se de um composto rico em lignina, chamado de Resíduo Lignocelulósico (RLC), que atualmente é direcionado à geração de energia a partir da queima. O material contém altas taxas de carbono (Cao, et al., 2018) (Arabiourrutia, et al., 2020), o qual é designado para um processo de briquetagem para aumento de sua massa específica, e em seguida designado às caldeiras para geração de energia elétrica. Devido aos problemas ambientais causados pela emissão de gases proveniente da queima de derivados de

carbono, e pelas políticas internacionais voltadas às ameaças do efeito estufa, toma-se por missão o tratamento alternativo para o resíduo.

Em virtude dessas características, estima-se que o RLC pode ser usado como matéria-prima para produção de carvão (chamado de *biochar*). Para isso, utiliza-se a técnica de degradação da matéria orgânica por aquecimento controlado a vácuo, a Pirólise. Para maior rendimento na produção de *biochar*, utiliza-se a adição de componente ácido, básico ou zeólita que atuam como catalisador, chamando, assim o processo de Pirólise Catalítica (Arabiourrutia, et al., 2020) (Wu, et al., 2020) (Cao, et al., 2018). Nesse estudo, avaliou-se a eficiência do processo de pirólise catalítica utilizando NaOH como catalisador, na produção de *biochar* gerado a partir da decomposição de RLC gerado por uma indústria local, tomando também como efeito de avaliação a influência do diâmetro da partícula sobre o processo (Demirbas, 2004).

Para avaliação da degradação da biomassa em função da mistura RLC/NaOH, utilizou-se a técnica de Termogravimetria (TGA) para referenciar os valores de temperatura utilizados no processo (Yang, et al., 2018) (Greenhalf, et al., 2012) (Sandes, et al., 2021).

Além do perfil catalítico, definiu-se que o NaOH também apresenta a função ativadora (Schettino Jr., et al., 2007) (Morais, 2014) (Figueiredo, et al., 1998). Diferente de outros trabalhos, os quais a ativação é realizada após a formação de *biochar*, a introdução de NaOH com RLC ao reator pirolítico tem como finalidade gerar uma ativação direta da soda, a qual pode ser comprovada pelas análises físico-químicas atribuídas ao carvão produzido.

Nesse estudo para caracterização e quantificação dos compostos orgânicos e inorgânicos presentes no RLC e no *biochar*, foram utilizadas as técnicas de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) (Pavia, et al., 2009) (Basal, et al., 2005).

A avaliação microscópica dos *biochars* produzidos é necessária para comprovar a formação de poros e avaliar o efeito das variáveis estudadas na morfologia do composto adsorvente. Nesse estudo, as análises morfológicas realizadas foram as técnicas de

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) (Bogner, et al., 2007).

Dentre as aplicações até hoje dadas ao carvão ativado, a adsorção é um dos principais processos de aplicação (Brandão, 2006) (Han, et al., 2013), sendo a sua maior utilização no tratamento de efluentes, devido a elevada eficiência e baixo custo.

A avaliação da eficiência do processo adsorptivo é realizada através dos estudos de cinética de adsorção para determinação da taxa adsorptiva do *biochar* para determinado adsorvato, e o mecanismo do processo de adsorção através de levantamento de isoterma de adsorção de um determinado adsorvato (Da Silva, et al., 2018) (Malik, 2002).

Visando validar a eficiência do *biochar* gerado para o tratamento de efluentes, foram realizados testes de adsorção utilizando Azul de Metileno como poluente modelo (Almeida, 2011) (Dwivedi, et al., 2010) (Lehmann, et al., 2009), uma vez que tal substância é um corante catiônico com ampla utilização na indústria de papel, tingimento de algodões e madeira, colorações biológicas, indicação redox, detecção de detergentes aniônicos em águas, análise quantitativa de sulfetos, entre outros (Bonetto, 2016), além de apresentar boa interação com adsorventes sólidos.

METODOLOGIA

O RLC usado no presente estudo foi fornecido pela BioFlex Agroindustrial, localizada no município de São Miguel dos Campos - AL. O NaOH da marca Neon foi utilizado como obtido comercialmente. A técnica de MEV foi realizada no Instituto Federal de Alagoas (IFAL). As etapas de Pirólise Catalítica, Isoterma de Adsorção e Cinética de Adsorção foram realizadas no Laboratório de Sistemas de Separação e Otimização de Processos (LASSOP). A técnica de TGA foi realizada pelo Grupo de Catálise e Reatividade Química (GCaR), e a análise de FTIR pelo Laboratório de Caracterização de Microscopia de Materiais (LCMMat), todos pertencentes à Universidade Federal de Alagoas (UFAL).

Análise Termogravimétrica (TG) e Termogravimetria Derivada (DTG)

A análise termogravimétrica do RLC foi realizada num equipamento Shimadzu, DTG-60H. Para analisar o efeito do NaOH na degradação da biomassa, o mesmo foi adicionado ao RLC em quantidades relativas de 0,25, 0,63 e 1,00 à massa do resíduo (Wu, et al., 2020) (Peng, et al., 2014). A degradação da biomassa foi avaliada à medida que a mesma era aquecida até 800°C numa taxa de aquecimento de 10°C/min, em atmosfera inerte (gás Nitrogênio) (Sandes, et al., 2021) (Yang, et al., 2018) (Stefanidis, et al., 2014).

Pré-Tratamento do resíduo lignocelulósico do etanol 2G

Para análise do diâmetro de partícula (D_p), uma quantidade indeterminada de RLC bruto foi triturada e separada por peneiras granulométricas nas faixas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Faixa Granulométrica de RLC

Faixa (mesh)	D_p (mm)
115-200	100,0
60-100	200,0
42-60	300,0

O material triturado foi aquecido a 100°C durante 7 dias, para que não houvesse interferências da umidade nos experimentos. Em seguida, 50,0g de RLC seco foram misturados com NaOH em quantidades relativas de 0,25, 0,63 e 1,00 em relação à massa de resíduo (Wu, et al., 2020). O processo de mistura aconteceu de forma manual após a pesagem do catalisador, antes da amostra ser inserida no reator.

Pirólise

O processo de pirólise ocorreu em um forno tubular, modelo JUNG de 1KW (LT6 2010), aquecidos por uma resistência elétrica, Figura 1.

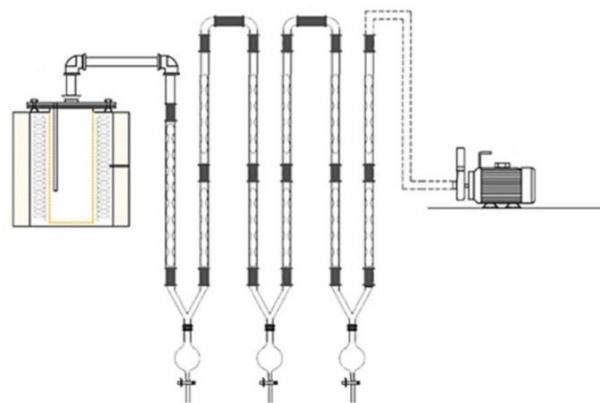


Figura 1: Sistema de pirólise contendo: reator, controlador de temperatura, condensadores e bomba de vácuo.

Um controlador de temperatura foi conectado ao forno para manter o experimento nas temperaturas planejadas, sob uma taxa de aquecimento de 50 °C/min. O sistema também é composto por condensadores conectados a dois balões de fundo de redondo e três bicos, os quais são responsáveis pela condensação dos vapores. Os mesmos condensadores são conectados a um banho termostático Tecnal TE-184, que transporta água a 4,0°C para resfriamento dos produtos. O vácuo foi realizado por uma bomba Faren 089, o qual manteve o sistema sob pressão negativa de 20,0kPa. Os experimentos tiveram um tempo de residência de 90 minutos. A massa dos *biochars* produzidos foram medidas, determinando assim os valores de p_{NaOH} a partir da Equação 1 (Sandes, et al., 2021) (Wu, et al., 2020) (Oliveira, et al., 2021). Os *biochars* que apresentaram maiores rendimentos foram selecionados para os testes de adsorptivos.

$$\%_{Biochar} = \frac{m_{Biochar} - m_{NaOH}}{m_t} \times 100\% \quad (1)$$

Sendo, $m_{Biochar}$, a massa do carvão obtido na pirólise; m_t , a massa inicial do resíduo lignocelulósico; e $\%_{Biochar}$, o rendimento de sólidos.

Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier - FTIR

A varredura abrangeu um intervalo de 400 cm^{-1} a 4000 cm^{-1} , por Transformada de Fourier, utilizando o sensor ATR (Rodrigues, et al., 2020).

Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV

A Microscopia Eletrônica de Varredura foi realizada no equipamento TecScan, modelo Vega 3, com o metalizador Sanyu Electron Quick Coater SC-701. O processo de metalização durou 6 minutos com alvo de ouro em corrente elétrica de 10,0 mA (Cabrera-Codony, et al., 2020).

Pré-Tratamento do Biochar

A fim de remover todo o NaOH residual do *biochar*, as amostras foram misturadas com água destilada e agitadas por 30 minutos, sendo em seguida determinado o pH da solução. Foi também realizado esse procedimento com uma amostra de carvão que foi preparado sem o catalisador, e o pH da amostra de carvão que não apresentava fração de NaOH foi tomado como referência para o processo de ajuste das amostras fracionadas. Após a agitação, as amostras que não tiveram seu pH equivalente à não fracionada foram novamente misturadas com água destilada até seu ajuste (Nascimento, et al., 2014) (Ahmed, et al., 2016) (Jimenez, et al., 2004). Para reduzir a perda de massa no processo, ao fim da agitação a mistura foi filtrada e o conteúdo presente no filtro foi adicionado ao recipiente para nova lavagem. Ao chegar no pH apropriado, o *biochar* passou por um processo de secagem e em seguida foram realizados os experimentos de Cinética de Adsorção e Cinética de Adsorção.

Cinética de Adsorção

Foram adicionados respectivos 50,0 mg de carvão em 13 erlenmeyers, os quais foram adicionados 100,0 mL de Azul de Metileno (AM) 15,0 ppm. As amostras foram postas no agitador Shaker SL 222 a 140,0 rpm de rotação, sendo cada erlenmeyer retirado do equipamento após os tempos pré-determinados, e em seguida as amostras foram centrifugadas no equipamento Solab SL-700 a 3000 rpm de rotação, para separação do carvão. Após a separação as amostras tiveram suas absorvâncias lidas pelo espectrofotômetro Phox SP-V3210 e a concentração final de AM

determinada por curva de calibração. A partir dos valores da concentração do AM no referido tempo de amostragem foi calculado q_t de cada amostra, a partir da equação 2, e assim aplicado os modelos matemáticos de pseudo-primeira ordem (3), pseudo-segunda ordem (4) e Weber-Morris (5) (Oliveira, et al., 2021).

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{W} \quad (2)$$

Onde:

C_0 – Concentração inicial de adsorvato;

C_t – Concentração de adsorvato num dado tempo t ;

V – Volume da mistura adsorvente/adsorvato;

W – Massa de adsorvente

$$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t}) \quad (3)$$

Onde:

k_1 – Velocidade específica do processo de adsorção para pseudo-primeira ordem (min^{-1});

q_e – Capacidade adsortiva no equilíbrio;

t – Tempo.

$$q_t = \frac{q_e^2 k_2 t}{1 + k_2 q_e t} \quad (4)$$

Onde:

k_2 – Velocidade específica do processo de adsorção para pseudo-segunda ordem ($\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$).

$$q_t = K_d t^{0,5} + C_d \quad (5)$$

Onde:

K_d – Coeficiente de difusão intrapartícula ($\text{mg g}^{-1} \text{min}^{-0,5}$);

C_d – Constante de resistência difusiva (mg g^{-1}).

RESULTADOS

A análise termogravimétrica mostrou que o RLC permanece com temperatura de degradação por volta dos 360°C (Sandes, et al., 2021) mesmo com a adição de NaOH. A imagem também mostra que em maiores valores de pNaOH a biomassa apresenta maior resistência à degradação, de modo que não haja perdas de massa ao decorrer do aquecimento, quando comparada à amostra sem soda, mostrando que a adição da base tem efeito de conservação no quantitativo de massa, a qual

passando pelo processo de aquecimento acima da sua temperatura de degradação, é convertida em *biochar* (Wu, et al., 2020).

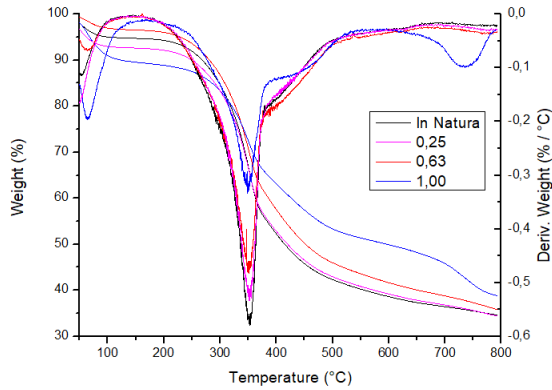


Figura 2: Curvas TG/DTG do RLC

Ao fim do processo de pirólise, o rendimento da produção do *biochar*, produto sólido da pirólise, foi calculado a partir da Equação 1, cujos valores foram utilizados para plotagem das superfícies de resposta nas quais são estudadas as variações de %*Biochar* em função de duas variáveis independentes, com a terceira constante (Sandes, et al., 2021) (Figuras 3, 4 e 5). Ao fim, um modelo matemático para cada superfície de resposta foi gerado (Equações 6, 7 e 8).

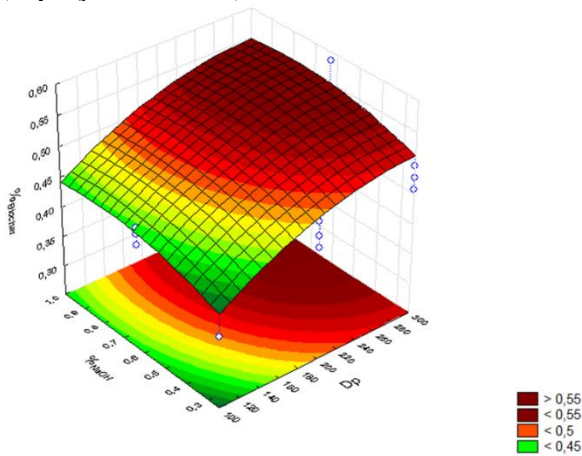


Figura 6: Superfície de resposta do rendimento de *biochar* em função de ($\overline{D_p}$) e p_{NaOH} à temperatura constante de 500°C.

$$\%_{Biochar} = -0,509 + 0,002\overline{D_p} - (2,638 \cdot 10^{-6})\overline{D_p}^2 + 0,221p_{NaOH} - 0,139p_{NaOH}^2 \quad (3)$$

$$\%_{Biochar} = -0,314 + 0,221 - 0,139\overline{D_p}^2 + 3,044 \cdot 10^{-3}T - 3,151T^2 \quad (4)$$

$$\%_{Biochar} = -0,437 + 1,588 \cdot 10^{-3}\%_{NaOH} - 2,638 \cdot 10^{-6}\%_{NaOH}^2 + 3,044 \cdot 10^{-3}T - 3,151 \cdot 10^{-6}T^2 \quad (5)$$

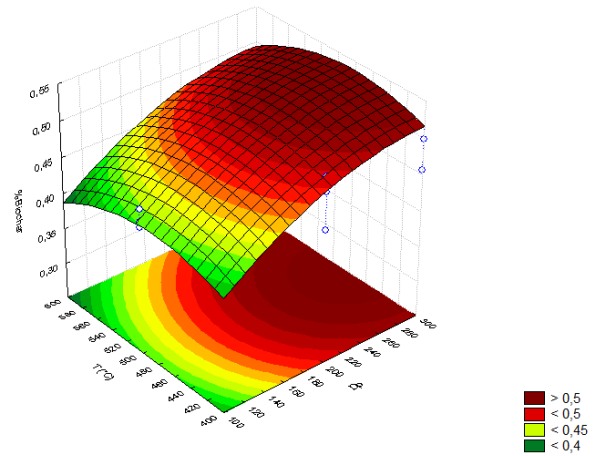


Figura 4: Superfície de resposta do rendimento de *biochar* em função de ($\overline{D_p}$) e T à p_{NaOH} 0,63.

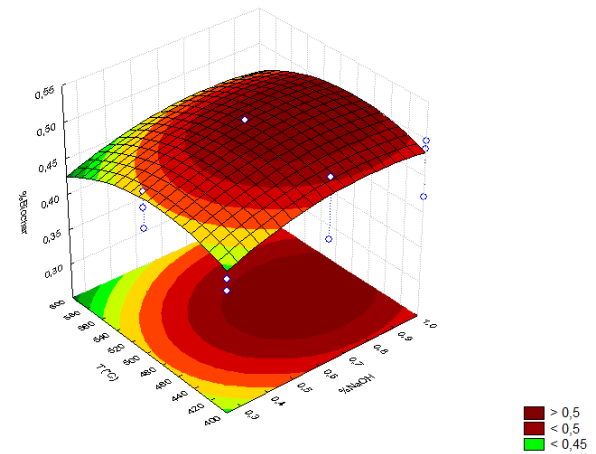


Figura 5: Superfície de resposta do rendimento de *biochar* em função de T e p_{NaOH} num ($\overline{D_p}$) de 200µm

A partir dos valores que geraram a superfície de resposta, toma-se como melhor condição para produção de *biochar*, a Temperatura de 500°C, 300µm de diâmetro de partícula com a adição de NaOH relativa a 1,00 em função da massa de RLC, o qual é chamado de *biochar* 315.

A Figura 6 mostra a representação da gráfica do FTIR do RLC *in natura* e também do *Biochar* 315.

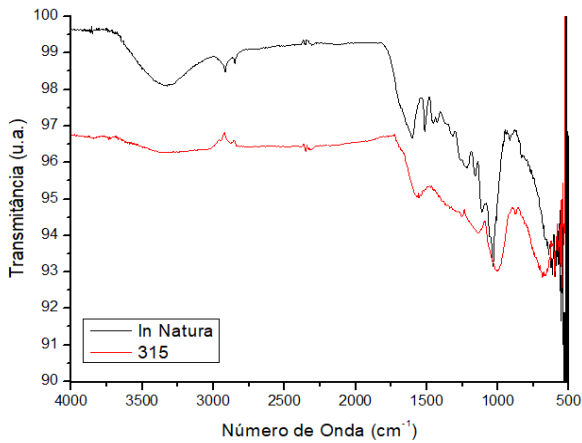


Figura 6: FTIR do RLC *in natura* e do *Biochar* 315

O índice de transmitância gerado pela análise mostra que a biomassa atingiu o nível de degradação esperado. Ao analisar a região do espectro de 3500 a 3250 cm^{-1} , nota-se a presença de estiramento de grupos hidroxílicos (O-H) no RLC, a qual é inexistente no *Biochar* 315 (Pavia, et al., 2009) (Rodrigues, et al., 2020).

O estudo de Sandes e colaboradores (2020) definem que, na faixa proposta existiria o grupamento anteriormente citado para um *biochar* não catalisado, definindo assim que a adição de NaOH contribuiu para quebra dessa função orgânica. Entre os valores de 3000 e 2750 cm^{-1} mostram a presença de estiramentos C-H de cadeia aberta no RLC. Ao analisar o mesmo intervalo para o *Biochar* 315, nota-se que não há picos referentes ao estiramento, comprovando sua quebra. A detecção de C=O na função cetona tanto ocorre no RLC, quanto no *Biochar*. No intervalo de 1350 a 1250 cm^{-1} , o interferograma de RLC mostra a presença de guaiacil, o qual não é vista no *Biochar* 315, comprovando a quebra das estruturas monoméricas da lignina. As ligações C=C e C≡C, tanto no RLC, quanto no *Biochar* 315 são detectadas, devido à existência de picos região de 1500 a 1000 cm^{-1} . Na faixa próxima dos 1000 cm^{-1} , tanto o RLC, quanto o *Biochar* 315 apresentam grupamentos C-O de álcoois secundários e grupo metoxil. As bandas presentes na faixa de 900 a 700 cm^{-1} mostra a existência de ligações C-H de grupamento aromáticos.

Para determinação da morfologia dos *biochars* produzidos, e também para avaliar o efeito do catalisador em aspectos microscópicos, fez-se necessária a realização da

análise de microscopia eletrônica de varredura dos mesmos. A Figura 7 mostra a análise de MEV do *biochar* 315, pois este apresentou maior rendimento.

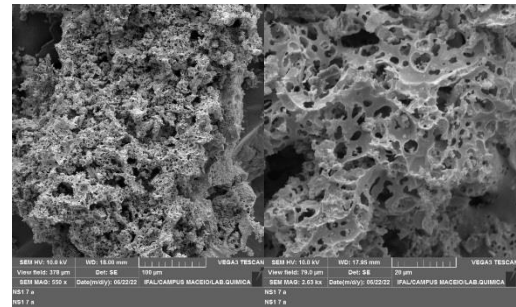


Figura 7: MEV do *Biochar* 315

Ao analisar a textura *biochar* 315 observa-se a existência significativa de poros em toda sua superfície. A escala de 100 μm mostra a presença de microporos (Basal, et al., 2005), o qual o último é mais visualizado na escala de 20 μm . Em virtude dessa característica, determina-se que o referido *biochar* apresenta perfil de carvão adsortivo (Figueiredo, et al., 1998), (Taguchi, et al., 2005), uma vez que a vasta quantidade de poros é fundamental para tal fenômeno (Cabrera-Codony, et al., 2020).

Para melhor avaliação e entendimento do processo adsortivo do *biochar* gerado, foi estudada a cinética de adsorção do corante AM para o *biochar* 315. Tais valores foram plotados num gráfico e os ajustes dos modelos pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem.

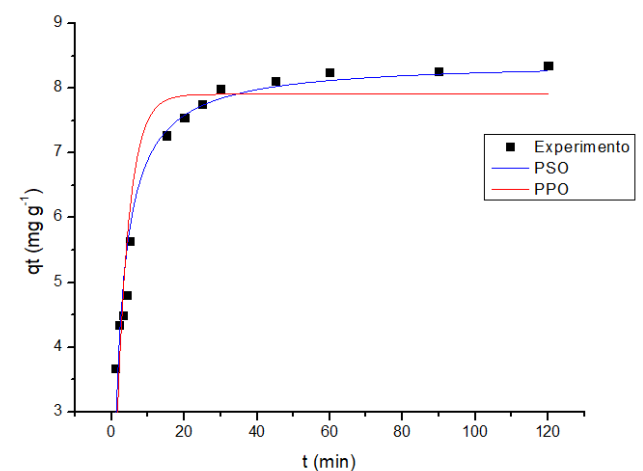


Figura 8: Ajustes de curva de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem para Cinética de Adsorção do *Biochar* 315

A partir dos ajustes de curva propostos, as propriedades específicas da cinética de adsorção foram determinadas. A determinação do ajuste mais próximo foi baseada nos dados estatísticos obtidos (Tabela 2).

Tabela 2: Parâmetros cinéticos e estatísticos da Cinética de adsorção do *biochar* 315

	pseudo-primeira ordem	pseudo-segunda ordem	
k_1 (min^{-1})	0,298	k_2 ($\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$)	0,054
q_e (mg g^{-1})	7,907	q_e (mg g^{-1})	8,417
DPM	0,248	DPM	0,193
R^2	0,860	R^2	0,976
R^2_{ajus}	0,847	R^2_{ajus}	0,961
AIC	-3,053	AIC	-15,509
RSS	5,277	RSS	2,024

A partir do ajuste de curva em função dos modelos cinéticos propostos, toma-se que a taxa de transporte do adsorvato sobre o adsorvente é de ordem 2 em relação à sua capacidade adsorptiva (Nascimento, et al., 2014). Logo, define-se que a quantidade retida no adsorvente e o equilíbrio do processo são as características determinantes para adsorção (Da Silva, et al., 2018), (Ho, et al., 1998).

A partir dos dados obtidos, foi também aplicado o ajuste de curva equivalente ao modelo de Weber-Morris, a fim de avaliar o efeito difusivo sobre à adsorção, conforme apresentado na Figura 9.

Em virtude de o desenvolvimento da curva ocorrer num momento de contínua transferência, os pontos não se mostram plenamente ajustados. Contudo, dados obtidos pelo ajuste de curva mostram a evidência do efeito difusivo intrafilme no fenômeno adsorptivo. No estágio 1, ainda distante do estado estacionário (equilíbrio), a resistência difusiva é relativamente pequena, uma vez que a existência de sítios disponíveis para retenção de adsorvato é maior, fazendo, também, que nesse momento haja uma maior taxa de adsorção, havendo, portanto, um K_d maior. O comportamento linear dos pontos em relação ao ajuste de curva de Weber-Morris mostra a tendência do fenômeno ao equilíbrio. Uma vez que os sítios se encontram parcialmente ocupados pelos adsorvato, a taxa de adsorção

começa a reduzir e a resistência ao fenômeno a aumentar. Em virtude do estágio 3 se encontrar nas regiões do equilíbrio, não haverá uma taxa de adsorção considerada, uma vez que determinada quantidade de adsorvato já se encontra depositado na superfície do adsorvente. Em consequência dessa característica, a resistência contra à adsorção será maior, por isso o valor de C_d maior do que nos estágios anteriores (Nascimento, et al., 2014) (Da Silva, et al., 2018) (Malik, 2002) (Dwivedi, et al., 2010).

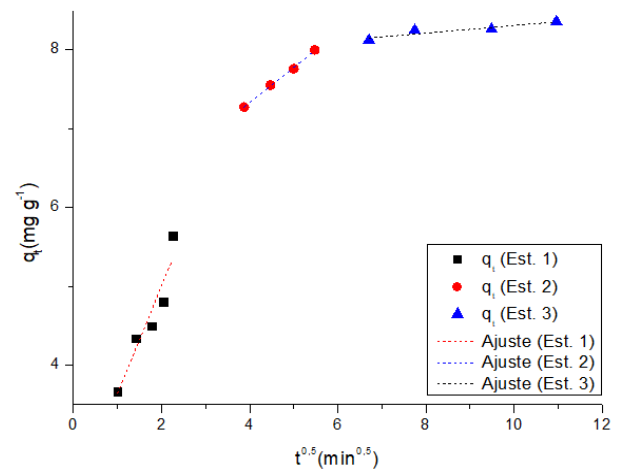


Figura 9: Cinética de Weber-Morris

CONCLUSÃO

Com base nos dados obtidos, foi concluído que a Pirólise Catalítica do Resíduo Lignocelulósico das pontas e palhas do Etanol 2G apresentou um produto de total aplicabilidade para o tratamento de efluentes.

Os resultados referentes à Análise Termogravimétrica definiram que a adição de NaOH ao RLC mantém a temperatura de degradação equivalente a 360°C, tendo como diferencial a menor perda de massa, o qual é convertido em *biochar* em temperaturas maiores.

Ao misturar NaOH, no exercício de catalisador, foi determinado que tal adição contribuiu para formação de *biochar*, sendo o diâmetro da partícula e o percentual máximo de catalisador principais contribuintes para tal processo, sendo a temperatura indicada num valor aceitável de 500°C.

As análises espectroscópicas de FTIR comprovaram a decomposição do RLC,

mostrando que a adição de NaOH favorece a quebra de funções hidroxílicas, além de outras funções orgânicas, gerando um *biochar* rico em carbono.

A microscopia eletrônica de varredura mostrou que o *biochar* gerado apresenta enorme quantidade de poros, os quais são fundamentais para o processo adsorptivo e que a comparação com o *biochar* gerado sem catalisador comprovou que a adição direta de NaOH gera o perfil de carvão ativado para o produto estudado.

A pirólise catalítica também mostrou um perfil ativador para o *biochar*, o qual foi amplamente visível pelos testes adsorptivos aplicados. Nesses testes, foi possível determinar que o fenômeno uma taxa de transporte de segunda ordem, mostrando a dependência do fenômeno com a quantidade de adsorvente retida e o equilíbrio do processo, o que foi comprovado pelas definições difusivas.

Portanto, define-se que o *biochar* proveniente do Resíduo Ligninocelulósico das pontas e palhas do Etanol 2G gerado pela Pirólise catalítica tem total aplicabilidade industrial, podendo assim atribuir às pontas e palhas uma via alternativa que não agrida o meio ambiente.

REFERÊNCIAS

- Ahmed K. [et al.]** Aluminum doped mesoporous silica SBA-15 for the removal of remazol yellow dye from water [Periódico]. - Campinas : Elsevier, 31 de Agosto de 2016. - Vol. 236. - pp. 167-175.
- Almeida C. A. P.** Caracterização do lutito barro branco e alicação da sua capacidade como adsorvente de corantes usando Azul de Metileno como modelo [Relatório] : Tese de Doutorado / Universidade Federal de Santa Catarina. - Florianópolis : [s.n.], 2011. - pp. 8-10.
- Arabiourrutia M. [et al.]** Waste tyre valorization by catalytic pyrolysis - A review [Periódico] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - Bilbao : Elsevier, 24 de Maio de 2020. - Vol. 129. - pp. 1-22.
- Basal R. C. e Goyal M.** Adsorption, Activated Carbon [Livro]. - Maio : Taylor & Francis, 2005. - p. 2.
- Bogner A. [et al.]** A history os scanning electron microscopy developments: Towards "wet-STEM" imaging [Periódico]. - Lyon : Elsevier, 2007. - Vol. 38.
- Brandão P. C.** Avaliação do uso do bagaço de cana como adsorvente para a remoção de contaminantes, derivados do petróleo, de efluentes [Relatório] / Faculdade de Engenharia Química ; Universidade Federal de Uberlândia. - Uberlândia : [s.n.], 2006. - p. 160.
- Brasil Governo Federal do** Empresa de Pesquisas Energéticas [Online] // Empresa de Pesquisas Energéticas / ed. Energia Ministério de Minas e. - Governo Brasileiro, 2021. - 15 de Novembro de 2021. - <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>.
- Cabrera-Codony A. [et al.]** From biocollagenic waste to efficient biogas purification: Applying circular economy in the leather industry [Periódico] // Environmental Technology & Innovation. - Girona : Elsevier, 2020.
- Cao L. [et al.]** Lignin valorization for the production of renewable chemicals: State-of-the-art review and future prospects [Periódico] // Bioresource Technology. - Kowloon : Elsevier Ltd., 14 de Agosto de 2018. - Vol. 269. - pp. 465-475.
- Da Silva J. E. [et al.]** Estudo de Cinética e Equilíbrio de Adsorção empregando a casada do coco modificada quimicamente para a remeção de Pb(II) de Banho Sintético [Periódico] // Revista Virtual de Química. - Quixadá : [s.n.], Outurbo de 2018. - 5 : Vol. 10.
- Demirbas A.** Efeitos da temperatura e tamanho de partícula no rendimento de biocarvão da pirólise de resíduos agrícolas [Periódico] // Journal of Analytical and applied pyrolysis. - Konya : Elsevier, 11 de Setembro de 2004. - Vol. 72. - pp. 243-248.
- Dias J. M. C. S. [et al.]** Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais [Livro]. - Brasília : Embrapa, 2012. - Vol. 13 : pp. 26-30.
- Dwivedi A. D. [et al.]** Strengthening adsorptive amelioration: Isotherm modeling in liquid phase surface complexation of Pb (II) and Cd (II) ions [Periódico]. - Lucknow : Elsevier, 2 de Setembro de 2010. - Vol. 267. - pp. 25-33.
- Figueiredo J. L. [et al.]** Modification of the surface chemistry of activated carbons

[Periódico] // Carbon. - Porto : Pergamon, 18 de Dezembro de 1998. - Vol. 37. - pp. 1379-1389.

Figueiredo J. L. e Pereira M. F. The role of surface chemistry in catalysis with carbons [Periódico] // Catalysis Today. - Porto : Elsevier, 20 de Maio de 2010. - Vol. 150. - pp. 2-7.

Greenhalf C.E. [et al.] Thermochemical characterisation of straws and high yielding perennial grasses [Periódico] // Industrial Crop and Products. - Birmingham : Elsevier, 29 de Novembro de 2012. - Vol. 36. - pp. 449-459.

Han Z. [et al.] Adsorption Kinetics And Thermodynamics of Acid Blue 25 and Methylene Blue dye Solutions on Natural Sepiolite [Periódico] // Synthesis and Reactivity in Inorganic, Metal-Organic, and Nano-Metal Chemistry. - Jiangsu : Taylor and Francis online, 10 de Junho de 2013. - Vol. 43. - pp. 1-25.

Ho Y. S. e McKay G Sorption of dye from aqueous solution by peat [Periódico] // Chemical Engineering Journal / ed. Elsevier. - Hong Kong, China : [s.n.], 2 de Janeiro de 1998. - Vol. 70. - pp. 115-124.

Hong S. [et al.] Adsorption thermodynamics of Methylene Blue onto bentonite [Periódico] // Journal of Hazardous Materials. - Wuhan : Elsevier, 16 de Janeiro de 2009. - Vol. 167. - pp. 630-633.

Jimenez R. S., Bosco S. M. D. e Carvalho W. A. Remoção de metais pesados de efluentes aquosos pela zeólita natural escolecita - influência da temperatura e do pH na adsorção em sistemas monoelementares [Periódico]. - Campinas : Química Nova, 2004. - 5 : Vol. 27.

Lehmann J. e Joseph S. Biochar for Environmental Science and Technology [Livro]. - Londres : Earthscans, 2009. - Vol. I.

Macedo I. C. The sugar cane agro-industry - Its Contribution to reducing CO₂ emissions in Brazil [Periódico]. - São Paulo : Pergamon Press, Junho de 1992. - 2 : Vol. 3. - pp. 77-80.

Malik P. K. Use of activated carbons prepared from sawdust and rice-husk for adsorption of acid dyes: a case study of Acid Yellow 36 [Periódico] // Dyes and Pigments. - Calcutta : Elsevier, 20 de Novembro de 2002. - Vol. 56. - pp. 239-249.

Moldoveanu S. C. Pyrolysis of Organic Molecules [Livro]. - Amsterdã : Elsevier, 2019. - 2 : pp. 1-33.

Morais E. D. Produção de carvão ativado a partir do mesocarpo do coco-da-baía (cocosnuferralinn) utilizando H₃PO₄, CH₃COONa e KOH como ativantes [Relatório] / Centro de Tecnologia ; Universidade Federal do Rio Grande do Norte. - Natal : Biblioteca Setorial Professor Horácio Nicolás Sólino, 2014.

Nascimento R. F. [et al.] Adsorção: Aspectos teóricos e aplicações ambientais [Livro]. - Fortaleza : Imprensa Universária, 2014. - p. 256.

Oliveira E. N. [et al.] Highly effective adsorption of caffeine by a novel activated carbon prepared from coconut leaf [Periódico] // Environmental Science and Pollution Research. - Maceió : [s.n.], Setembro de 2021. - pp. 1-40.

Pavia D. L. [et al.] Introdução à Espectroscopia [Livro]. - Western : [s.n.], 2009. - Vol. I.

Peng C. [et al.] Pyrolysis of lignin for phenols with alkaline additive [Artigo] // Fuel Processing Technology. - Beijing : Elsevier, 27 de Março de 2014. - 124. - pp. 212-221.

Rodrigues J., Faix O. e Pereira H. Determination of Lignin Content of Eucalyptus globulus wood using FTIR Spectroscopy [Periódico] // Holzforschung. - Lisboa : [s.n.], 1998. - 1 : Vol. 52. - pp. 46-50.

Rodrigues J. S. [et al.] Isolamento e Caracterização de Lignina Acetossolve Extraída do Bagaço de Cana-de-Açúcar [Periódico]. - São Carlos : [s.n.], 2020. - 4 : Vol. 12.

SakinOmer O., Hussein M. A. e Hussein B. H. M. Adsorption thermodynamics of cationic dyes (methylene blue and crystal violet) to a natural clay mineral from aqueous solution between 293.15 and 323.15K [Periódico] // Arabian Journal of Chemistry. - Cartum : Elsevier, 26 de Outubro de 2017. - pp. 1-19.

Sandes L. V. O. [et al.] Pyrolysis of Lignocellulosic Waste from Second-Generation Ethanol Industry [Periódico] // Sugar Tech. - Maceió : Springer Link, 23 de Janeiro de 2021. - Vol. 23. - pp. 615-626.

Schettino Jr. M. A. [et al.] Preparação e Caracterização de carvão ativado quimicamente a partir da casca de arroz [Periódico] // Química Nova. - Vitória : [s.n.], 29 de Agosto de 2007. - 7 : Vol. 30. - pp. 1663-1668.

Stefanidis S. D. [et al.] A study of lignocellulosic biomass pyrolysis via the pyrolysis of cellulose, hemicellulose and lignin [Periódico]. - Thessaloniki : Elsevier, 5 de Novembro de 2014. - Vol. 105. - pp. 143-150.

Taguchi A. e Schüth F. Ordered mesoporous materials in catalysis [Periódico] // Microporous and mesoporous materials. - Mülheim an der Ruhr : Elsevier, 4 de Junho de 2005. - Vol. 77. - pp. 1-45.

Wu J. [et al.] Effects of NaOH on the catalytic pyrolysis of lignin/HZSM-5 to prepare [Periódico] // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. - Qingdao : Elsevier Ltd., 14 de Janeiro de 2020. - Vol. 146. - pp. 146-154.

Yang W. [et al.] Valorization of Acid Isolated High Yield Lignin Nanoparticles as Innovative Antioxidant/Antimicrobial Organic Materials [Periódico] // ACS Sustainable. - Viterbo : ACS Publications, 11 de Janeiro de 2018. - Vol. 6. - pp. 3502-3514.