

APLICAÇÃO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA REMOÇÃO DE PETRÓLEO DA ÁGUA PRODUZIDA

Renato da Silva¹

Walquíria Joseane Silva²

Jailma Barros dos Santos³

Vanessa Limeira Azevedo Gomes⁴

Engenharia de Petróleo



ISSN IMPRESSO 1980-1777

ISSN ELETRÔNICO 2316-3135

RESUMO

A água produzida, obtida durante a produção do petróleo, contém metais pesados e contaminantes orgânicos que devem ser removidos, antes de ser descartada ou de ser utilizada como método de recuperação secundária. Para tratá-la, alguns métodos químicos e físicos são aplicados. Dentre eles, a adsorção é uma técnica amplamente utilizada para remoção de metais pesados e teor de óleos e graxas. Neste trabalho, o bagaço de cana-de-açúcar foi caracterizado a fim de verificar o seu potencial como bioadsorvente na remoção dos contaminantes da água produzida. Inicialmente, foi realizado um pré-tratamento da biomassa e uma caracterização físico-química. Em seguida, a biomassa foi ativada por meio de uma solução com $0,1 \text{ mol.L}^{-1}$ NaOH, $0,1 \text{ mol.L}^{-1}$ HCl e $1,2 \text{ mol.L}^{-1}$ Ácido cítrico. Os testes do teor de cinzas, umidade, matéria volátil e carbono fixo para o bagaço de cana, foram iguais a 7,92 %; 2,39 %; 69,85 % e 19,85 %, respectivamente, corroborando com os dados da literatura. A ativação química foi comprovada pelas análises de DRX e FTIR. Por fim, foram realizados estudos de adsorção em uma coluna de leito fixo, utilizando solução sintética de água produzida como corrente de alimentação. Por meio disso, foi possível verificar o percentual de adsorção da biomassa e traçar a curva de ruptura do sistema. Os resultados mostraram uma remoção de 83,4% dos contaminantes da solução sintética, além disso, verificou-se o ponto de ruptura igual a 0,3 e tempo de ruptura em torno de 180 mi-

nutos para os parâmetros da coluna. Assim, pode-se concluir que há possibilidade da aplicação do bagaço de cana-de-açúcar na remoção dos contaminantes da água produzida pelo processo de adsorção.

PALAVRAS-CHAVE

Bioadsorção, Hidrocarbonetos, Contaminantes.

ABSTRACT

The water produced during the production of oil contains heavy metals and organic contaminants that must be removed before being discarded or used as a secondary recovery method. To treat it, some chemical and physical methods are applied. Among them, adsorption is a widely used technique for the removal of heavy metals and the content of oils and greases. In this work, the sugarcane bagasse was characterized in order to verify its potential as a bio adhesive in the removal of contaminants from the water produced. Initially, a biomass pretreatment and a physical-chemical characterization were performed. Then, the biomass was activated through a solution with 0.1 mol.L⁻¹ NaOH, 0.1 mol.L⁻¹ HCl and 1.2 mol.L⁻¹ citric acid. The tests of ash, moisture, volatile matter and fixed carbon content for sugarcane bagasse were equal to 7.92 %, 2.39 %, 69.85 % and 19.85 %, respectively, corroborating with data from the literature. The chemical activation was confirmed by the XRD and FTIR analyzes. Finally, adsorption studies were performed on a fixed bed column using synthetic solution of water produced as feed stream. Through this, it was possible to verify the percentage of adsorption of the biomass and to trace the breakdown curve of the system. The results showed a removal of 83.4% of the contaminants from the synthetic solution, in addition, the breakpoint equal to 0.3 and rupture time of around 180 minutes was found for the column parameters. Thus, it can be concluded that there is possibility of the application of sugarcane bagasse in the removal of contaminants from the water produced by the adsorption process.

KEYWORDS

Bioadsorption, Hydrocarbons, Contaminants.

1 INTRODUÇÃO

Nas atividades de produção e exploração de óleo e gás são gerados resíduos e efluentes, dentre os quais a maior parte é água produzida, que vem junto com o petróleo. A água de produção consiste na água presente da própria formação geológica, e na água de injeção, que é aquela injetada no reservatório para aumento da produção. Geralmente, os campos no início da produção geram pequenas quantidades de

água, que aumentam no decorrer do tempo e atingem valores próximos a 100% ao fim da vida econômica do poço (ARAÚJO et al., 2017; RAY; ENGELHARDT, 1992).

Como a água de produção, além de gotículas de óleo, contém uma série de metais pesados, sólidos em suspensão e produtos químicos adicionados nas fases de exploração e produção, é necessário fazer um tratamento prévio antes de descartá-la. Para isso, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) prevê uma série de parâmetros necessários para que a água de produção seja reutilizada ou descartada, sendo necessário seguir criteriosamente todos os índices indicados.

Com o passar dos anos vários métodos de tratamento foram desenvolvidos, entre os mais utilizados estão: hidrociclones, flotação, coagulação, precipitação química, uso de desmulsificantes, adsorção, tratamento biológico, entre outros. Nesse contexto, o método escolhido é a adsorção.

A adsorção ocorre sempre que uma superfície sólida é exposta a um gás ou um líquido, ou seja, é definida como o enriquecimento de material ou acréscimo da densidade do fluido na vizinhança de uma interface, esse processo se destaca, pois, tem uma alta seletividade molecular, permitindo a separação de vários componentes e um baixo custo energético (FERREIRA Hellen, 2016).

O carvão ativo é um dos adsorventes mais utilizados por apresentar uma elevada capacidade de adsorção, porém, em grandes proporções ele se torna inviável por ter um alto custo, tendo em vista esse fato, há uma demanda de novas pesquisas a procura de novos meios de adsorção, entre os métodos estudados pode-se mencionar a bioadsorção.

A utilização de bioadsorventes tem crescido consideravelmente como alternativa aos métodos convencionais de adsorção, podendo ser empregada no tratamento de água produzida na fase de processamento primário do petróleo, como exemplos de biomassas utilizadas nesse processo é possível citar: bagaço de cana-de-açúcar e serragem (ALBERTINI; CARMO; PRADO, 2007), casca de laranja (SOUZA et al., 2012), bagaço do caju (MOREIRA, 2009), folha de bananeira (BABARINDE et al., 2012), alga marinha (ROMERA et al., 2007), entre outras biomassas.

Neste artigo, a biomassa estudada foi o bagaço de cana-de-açúcar oriundo do Estado de Alagoas, tendo como principal foco verificar as características físico-químicas dessa biomassa e averiguar o potencial de remoção do petróleo na água produzida por meio de testes em coluna de leito fixo, utilizando soluções sintéticas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ÁGUA PRODUZIDA

Durante o processo de Exploração e Produção de petróleo (E&P) onshore e offshore, uma quantidade significativa de água é gerada, principalmente no mar, chamada de água produzida ou água de produção (AP) e possui alta salinidade, partículas de óleo em suspensão, produtos químicos adicionados nos diversos processos de produção, metais pesados, entre uma série de contaminantes (UTVIK, 1999; FARMEN et al., 2010). A disposição desse resíduo representa um desafio, tendo em vista o alto

volume de água envolvido no processo, bem como pela sua composição. A quantidade de água produzida está relacionada ao mecanismo natural ou artificial de produção e do estágio de vida do campo produtor.

Os constituintes da água de produção são uma mistura complexa de compostos químicos orgânicos e inorgânicos naturalmente ocorrentes que foram dissolvidos ou dispersados na forma de particulados de pequeno diâmetro das formações geológicas e rotas de migração, onde esse efluente esteve represado por um longo período de anos (GOMES, 2014; NEFF et al., 2011). Sua composição física e química é bastante variada e complexa, podendo incluir, em sua composição, óleo disperso, hidrocarbonetos dissolvidos, sais inorgânicos dissolvidos, metais pesados, compostos orgânicos e uma parcela de produtos químicos adicionados nas diversas fases de perfuração (FONTES, 2010; JOHNSEN et al., 2004; DURELL et al., 2004; E&P Forum, 1994; STEPHENSON, 1992).

Para que a água produzida tenha uma devida reutilização ou descarte, é necessário que haja um tratamento específico para atender as especificações exigidas segundo a Resolução 430/2011 do CONAMA. Os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente no corpo receptor desde que obedeçam às condições e padrões previstos na Resolução e em normas aplicáveis.

Novas tecnologias têm sido desenvolvidas para remoção de contaminantes, sendo que um dos maiores custos com o tratamento de efluentes é a importação de substâncias químicas. Assim, uma solução é a produção local das substâncias químicas de tratamento (BRANDÃO, 2006).

O tratamento da água produzida pode ser feito por diversas técnicas, dependendo da finalidade desejada, como adsorção, utilizando carvão ativo, biomassas, argila orgânica, copolímeros, zeólitas e resinas; flotação; precipitação química, tratamento biológico, tratamento com membranas, entre outros (FERREIRA, 2016; FAKHRU et al., 2009).

2.2 MECANISMO DE ADSORÇÃO

A adsorção ocorre sempre que uma superfície sólida é exposta a um gás ou um líquido, ou seja, é definida como o enriquecimento de material ou acréscimo da densidade do fluido na vizinhança de uma interface. Esse processo se destaca, pois, tem uma alta seletividade molecular, permitindo a separação de vários componentes e um baixo custo energético (FERREIRA Hellen, 2016). Ainda segundo Hellen Ferreira (2016), existe dois tipos de adsorção:

- **Adsorção Física:** Não há nenhuma troca de elétrons; em vez disso, atrações intermoleculares entre os locais de energia favoráveis ocorrem e são, portanto, independente das propriedades eletrônicas das moléculas envolvidas. O adsorvato (substância adsorvida num processo de adsorção) é mantido à superfície por forças relativamente fracas, comparadas às forças de condensação e podem ser formadas múltiplas camadas;
- **Adsorção Química:** Envolve uma troca de elétrons entre os sítios de adsorção e as moléculas de soluto, desse modo, uma ligação química é formada. A qui-

missorção é caracterizada por energias de interação entre superfície e adsorvato comparáveis à força de ligações químicas, conseqüentemente, muito forte e muito mais estável que a fisissorção. Geralmente, apenas uma única camada pode ser adsorvida.

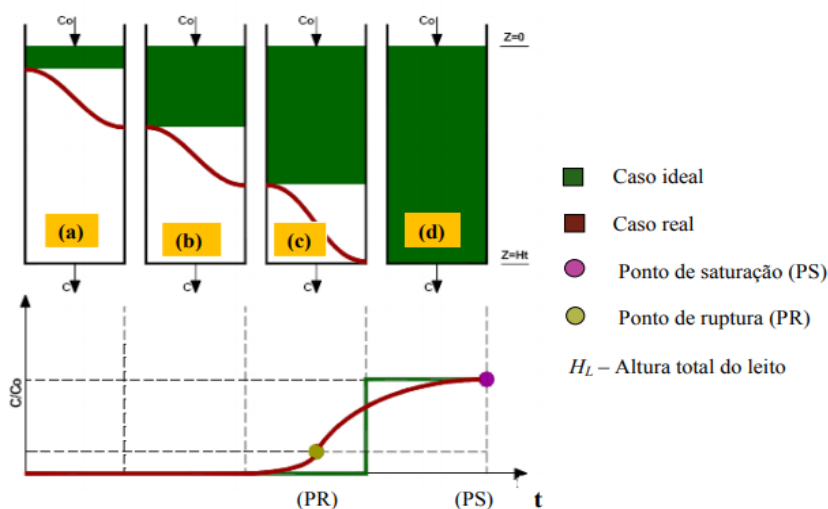
2.2.1 Adsorção em Coluna de Leito Fixo

O estudo de adsorção em leito fixo demonstra um comportamento favorável às condições reais, se comparado ao processo em batelada. Na adsorção em leito fixo, a concentração da fase fluida muda de acordo com o tempo e com a posição na coluna. A Zona de Transferência de Massa (ZTM) é a região onde está ocorrendo a transferência de massa em função do tempo e a suas características dependem de alguns fatores, como diâmetro da coluna, adsorvente utilizado, fase fluida utilizada, entre outros (ARAÚJO et al., 2017; MCCABE et al., 1993).

As operações, onde a mistura fluida, a ser tratada, passa por meio de um leito estacionário de adsorvente, são mais econômicas do que aquelas em estado não estacionário. Neste caso, o transporte contínuo das partículas sólidas requer um custo elevado (TREYBAL, 1984). No leito fixo, o adsorvente deve ser substituído ou regenerado, periodicamente, à medida que ele for saturando. A capacidade adsortiva de um leito fixo (mg/g) é estimada por meio das curvas de ruptura (breakthrough curves) (CURBELO, 2002).

Fontes (2010) descreveu o comportamento ideal e real da curva de ruptura (FIGURA 1). Segundo ele, no caso ideal, Figura 1(a), não há curva de ruptura, pois, o adsorvente encontra-se saturado. No caso real, existe uma região no interior da coluna em que ocorre uma variação significativa da concentração de soluto, na qual o soluto está sendo transferido para o adsorvato, local onde ocorre o processo de adsorção. Por isso, na Figura 1(a), todo soluto que entra em contato com a coluna é rapidamente adsorvido.

Figura 1 – Curva de ruptura para a adsorção em leito fixo



Fonte: Borba (2006).

O início da ZTM (região onde ocorre a mudança mais acentuada na concentração) pode ser chamado de frente de adsorção, esta região vai deslocando-se para partes inferiores do leito fixo e diminuindo seu tamanho (FIGURA 1(b)). Enquanto a frente de adsorção não atinge o final da coluna, o fluido obtido na saída dela terá a concentração do soluto aproximadamente igual a zero, indicando que todo o adsorvato ficou retido no leito. Uma vez que a frente de adsorção tenha alcançado o final do leito (FIGURA 1(c)) será detectada pela primeira vez a presença de soluto no fluido de saída, o ponto de ruptura pode ser observado quando a concentração de saída (C) atinge 5 % da concentração alimentada (C_0) (FONTES, 2010).

A concentração passa a crescer intensamente até C/C_0 atingir 50 % ($C/C_0=0,5$). Após um período, a adsorção de soluto pelo sólido praticamente deixa de ocorrer, devido a todos os sítios ativos disponíveis do adsorvente terem sido preenchidos, obstando o processo de adsorção, fazendo com que o fluido de saída e a alimentação do sistema tenham concentrações praticamente iguais ($C/C_0=1$), indicando a exaustão ou ponto de saturação do leito (FONTES, 2010).

2.2.2 Adsorvente: Bagaço de Cana-de-Açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) é uma biomassa que pode ser transformada quase que totalmente em energia aproveitável por meio de processos industriais, que na sua maioria, já são dominados e conhecidos e apresentam alto índice de aproveitamento dos subprodutos e baixo impacto ambiental (NOVACANA, 2018).

No Brasil, a produção total de bagaço de cana-de-açúcar, no ano de 2019, segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), foi de 635,51 milhões de toneladas, o que representa um aumento de 0,4% em relação à safra 2017/18, que fechou em 633,26 milhões de toneladas. A Região Centro-Sul responde por 90% deste volume, enquanto os 10% restantes cabem aos Estados da região Norte-Nordeste, de acordo com dados divulgados pela União da Indústria de Cana-de-Açúcar (MONDO, 2018).

Segundo Silva (2017), a composição média do bagaço de cana-de-açúcar é de carbono (39,7 – 40 %), oxigênio (40 – 46 %), hidrogênio (5,5 - 7,4 %), nitrogênio e cinzas (0 - 0,3 %) e a composição média da fibra do bagaço de cana-de-açúcar é de celulose (26,6 - 54,3 %), hemicelulose (14,3 - 24,4 %) e lignina (22,7 - 29,7 %).

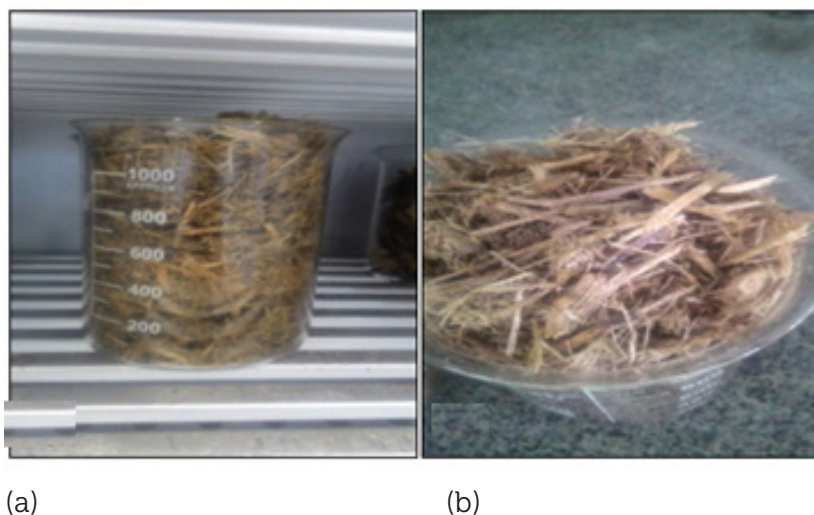
3 METODOLOGIA

Inicialmente, é realizada a revisão bibliográfica com os temas de bioadsorção e água produzida e a escolha da metodologia aplicada, nesse caso, testes em laboratório. As amostras de bagaço de cana-de-açúcar são pré-tratadas para remoção de contaminantes advindos da produção da cana-de-açúcar. Em seguida, a ativação química é realizada e, para verificar essa ativação, é feita a caracterização por meio dos equipamentos de difração de raios-X (Shimadzu XRD-6000) e espectroscopia de infravermelho (FTIR). Por fim, os testes em coluna de leito fixo são realizados e os resultados são analisados no Espectrofotômetro (Quimis).

3.1 MATERIAIS

O bagaço da cana-de-açúcar utilizado é proveniente da usina Santa Clotilde, situada em Rio Largo, do Estado de Alagoas, onde o pré-tratamento se deu por meio das etapas de lavagem com água destilada, secagem em estufa, moagem e, por fim, o peneiramento com diferentes malhas de aberturas. As caracterizações para obter o teor de carbono fixo foram as mesmas utilizadas no trabalho de Brandão (2006) & Santos e colaboradores (2003). As Figuras 2(a) e (b) apresentam as amostras antes e após a secagem em estufa, respectivamente.

Figura 2 – Bagaço de cana-de-açúcar (a) antes e (b) após a secagem



Fonte: Autores (2021).

O ensaio de análise granulométrica foi realizado com o conjunto de peneiras com aberturas de malhas 16 (1,18mm), 30 (0,6mm), 50 (0,3mm) e 100 (0,15mm). O bagaço de cana-de-açúcar é um material de fácil trituração, na primeira malha com diâmetro médio acima de 1,18mm houve apenas 3,72% de massa retida, já nas peneiras seguintes, foi observado uma maior retenção, cerca de 41,09% e 39,94% para os diâmetros médio de 0,89mm e 0,45mm, respectivamente. A última peneira foi capaz de reter mais material que a primeira peneira, visto que o material é capaz de formar partículas muito finas depois de triturado. As amostras com diâmetro menor que 0,6mm foram aplicadas nos testes de caracterização.

A ativação química se deu com base no trabalho de Souza e colaboradores (2012). Essa ativação foi realizada para melhor eficiência no processo de adsorção do bagaço de cana-de-açúcar. A biomassa é embebida em uma solução de 0,1mol/L de NaOH, 0,1mol/L de HCl e 1,2mol/L de ácido cítrico durante 24 horas, posteriormente, o material é lavado com água ultrapura repetidas vezes e seco à 55°C, durante 24 horas.

3.2 PREPARO DA SOLUÇÃO SINTÉTICA DE ÁGUA PRODUZIDA E TESTES NA COLUNA DE LEITO FIXO

A solução sintética consiste em uma solução com concentração de $100.000 \text{ mg.L}^{-1}$ de cloreto de sódio e de 600 mg.L^{-1} de querosene comercial. Com isso, é possível simular um teor de óleos e graxas em torno de 600 ppm.

Os experimentos relacionados a curva de ruptura e determinação de capacidade adsorptiva tiveram como base o trabalho de Araújo e outros autores (2017) e Fontes (2010). Além disso, os ensaios são realizados na temperatura ambiente (23°C) em um sistema construído para simular uma coluna de leito fixo, conforme Figura 3.

Figura 3 – Coluna de leito fixo



Fonte: Autores (2021).

Alguns parâmetros para realização dos testes de adsorção foram medidos e descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros da coluna de leito fixo

PARÂMETROS DA COLUNA DEFINIDOS	
Diâmetro interno da coluna: D_L (cm)	1,13
Altura do leito: H_L (cm)	10,00
Altura hidrostática da coluna: H_h (cm)	40,00
PARÂMETRO REQUERIDO	
Fluxo da solução salina: Q (mL/min)	1,30

Fonte: Autores (2021).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA BIOMASSA

4.1.1 Determinação dos Teores de Umidade, Matéria Volátil, Cinzas e Carbono Fixo

Na determinação do teor de umidade foi realizada uma análise com 4 amostras, considerando a granulometria de 0,150mm. O valor correspondente é igual a 2,39%, o baixo teor de umidade pode influenciar em algumas propriedades do bagaço de cana-de-açúcar na coluna de leito fixo, como por exemplo, a sua contração por secagem e facilidade de compactação na coluna, reduzindo assim o grau de adsorção.

O teor de matéria volátil foi determinado para a amostra com tamanho médio de 0,225 mm. Matéria volátil é qualquer substância que tenha uma tendência para vaporizar, dadas as condições adequadas. A volatilidade da substância é medida pela sua pressão de vapor, o ponto em que se torna uma substância a partir de um sólido para um gás, ou vice-versa. A substância volátil tem uma tendência para ser mais inflamável do que um não-volátil, no ensaio, a quantidade obtida é igual à 69,85%, isso confere uma alta pressão de vapor e uma alta inflamabilidade do bagaço da cana-de-açúcar.

Por isso, umas das principais aplicações do bagaço de cana-de-açúcar é sua utilização em usinas para geração de energia por meio da combustão do próprio bagaço. Vale ressaltar que os valores de matéria volátil e carbono fixo são inversamente proporcionais, logo, quanto maior o teor de matéria volátil menor será o teor de carbono fixo presente na biomassa.

As amostras, para obter o teor de cinzas, foram previamente secas em estufa e logo após colocadas na mufla, a uma temperatura de 700°C até que se formasse cinzas claras. A quantificação do conteúdo inorgânico faz-se por meio da determinação do resíduo pela incineração ou cinzas. Assim, a biomassa calcinada à alta temperatura tem toda a sua matéria orgânica transformada em CO₂, restando apenas compostos minerais na forma de cinzas. Foi observada uma média de 7,92 % de matéria inorgânica presente na biomassa. Alguns estudos mostram que quanto menor a quantidade de matéria orgânica maior será adsorção, uma vez que, pode haver uma competitividade entre o composto e a matéria orgânica no processo (ZAGO, 2010).

Por fim, com os valores dos teores de umidade (2,39%), matéria volátil (68,95%) e cinzas (7,92%) é possível obter o teor de carbono fixo, obtido pela Equação (01).

$$\text{Carbono Fixo [\%]} = 100 \% - \text{umidade [\%]} - \text{matéria volátil [\%]} - \text{cinzas [\%]} \quad (1)$$

Por meio do teste de carbono fixo foi possível verificar o resíduo deixado após a queima da matéria volátil, com a volatilização das substâncias no processo, restando basicamente carbono. O carbono fixo tem relação direta com o poder calorífico. Um maior teor de carbono fixo implica em um maior tempo de residência dentro do

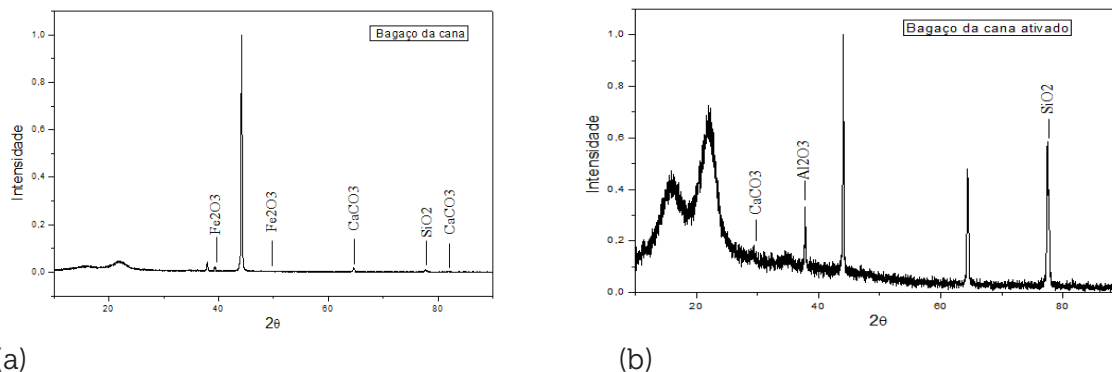
aparelho de queima. Outra característica importante é que todo material com alto teor de carbono pode ser ativado (ZAGO, 2010), aumentando assim sua eficiência no processo de adsorção.

4.1.2 Difração de Raios-X (DRX) e Espectroscopia de Infravermelho (FTIR)

Para análise dos dados de difração de raios-X foi utilizado o *software Expert HighScore Plus*, no qual foi capaz de identificar os possíveis compostos presentes em cada biomassa, sendo ela ativada e não ativada, mediante ao seu banco de dados.

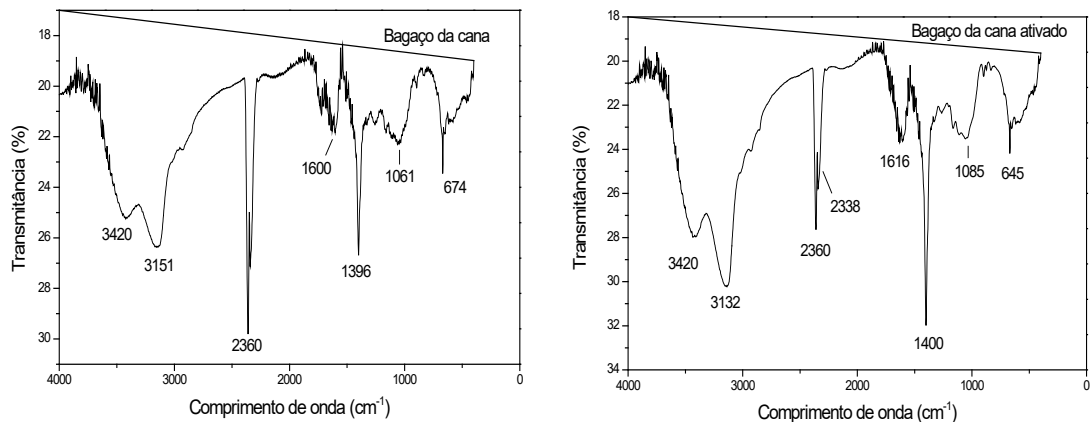
A Figura 4 (a) apresenta a análise do DRX do bagaço de cana-de-açúcar natural. Nela é possível visualizar as bandas relativas à hematita (Fe_2O_3) em $39,31^\circ$ e $49,78^\circ$, conforme a carta de número 24-0072. As bandas em $64,60^\circ$ e $81,98^\circ$ são relativos à calcita (CaCO_3), de acordo com a carta 05-0586. A quinta banda em $77,78^\circ$ é relativo à sílica (SiO_2) – carta 33-1161. Já a Figura 4(b) corresponde o DRX do bagaço de cana-de-açúcar ativado, onde observa-se a presença de calcita (CaCO_3) em $29,20^\circ$, carta de número 05-0586, alumina (Al_2O_3) em $37,83^\circ$, de acordo com a carta de número 10-0173, e Sílica (SiO_2) em $77,66^\circ$, carta de número 33-1161.

Figura 4 – Análise DRX para o bagaço de cana-de-açúcar (a) natural e (b) ativado



Fonte: Autores (2021).

Para a análise de espectroscopia de infravermelho foi utilizado o *software KnowItAll®*, porém o banco de dados relacionado a biomassa é escasso e impossibilitou a identificação dos componentes por meio desse método. O *software* identificou apenas a presença de dióxido de carbono no bagaço de cana-de-açúcar com banda na faixa de $2500 - 2300$. É possível observar tanto na amostra *in natura* quanto na amostra ativada quimicamente bandas características de O-H ($2900-3400 \text{ cm}^{-1}$), de carbonila em ($1500-1650 \text{ cm}^{-1}$). Os gráficos de FTIR das amostras estão descritos na Figura 5, com a identificação das suas principais bandas.

Figura 5 – Análise FTIR para o bagaço de cana-de-açúcar (a) natural e (b) ativado

(a)

(b)

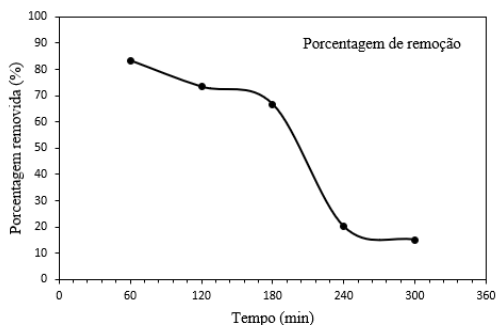
Fonte: Autores (2021).

4.2 EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO E CURVA DE RUPTURA

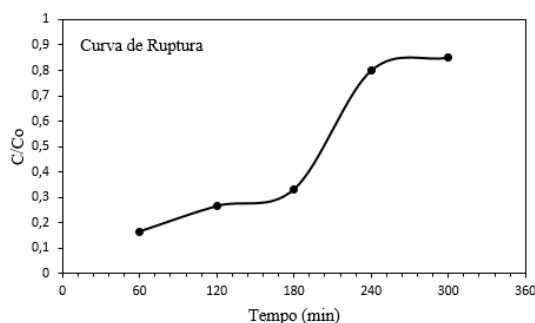
Após os experimentos na coluna de leito fixo, ver Figura 3, é possível identificar a eficiência de remoção do bagaço de cana-de-açúcar na coluna, conforme Figura 6(a) que mostra o percentual de remoção em cada tempo de retirada do efluente tratado. É possível identificar uma queda na taxa de remoção com o passar do tempo, isso é explicado pelo fato de quanto maior a passagem de efluente contaminado pela coluna, mais saturada estará a mesma, já que os poros estão sendo ocupados pelo querosene enquanto a água é retirada, há um momento (tempo de 180 minutos, conforme Figura 6(a) em que os poros não têm mais espaço para adsorver o querosene, então começa a diminuir sua taxa de remoção abruptamente.

E, a partir dos valores das concentrações do efluente tratado no decorrer do tempo e a concentração inicial, é possível gerar a curva de ruptura do sistema, conforme Figura 6(b).

Figura 6 – (a) Eficiência do bagaço de cana-de-açúcar na coluna de leito fixo e (b) a curva de ruptura



(a)



(b)

Fonte: Autores (2021).

A curva de ruptura, apresentada na Figura 6(b), é comprovada pelo seu formato de S, podendo ser um forte indicador da capacidade adsorptiva do bioadsorvente. A remoção contínua de óleo até a ruptura foi de aproximadamente 75%. O ponto de ruptura foi fixado no ponto $C/C_0 = 0,3$ ou 30%, por meio do ponto de ruptura é possível definir que a operação da coluna na prática deve ser interrompida quando a remoção de óleo for igual ou menor do que 70%, visto que, quando se passa do ponto de ruptura a eficiência de remoção decai rapidamente, outro parâmetro definido foi o tempo de ruptura com aproximadamente 180 minutos para as condições e parâmetros da coluna de leito fixo.

5 CONCLUSÕES

A remoção de contaminantes da água produzida é fundamental antes de seu descarte, por isso, necessita-se de técnicas de remoção eficiente. Neste artigo, foi possível verificar a técnica de adsorção, utilizando o bagaço de cana-de-açúcar como bioadsorvente. Por meio dos resultados concluiu-se que através pela caracterização físico-química do bagaço de cana foi possível identificar características importantes da biomassa, o bagaço de cana possui um baixo teor de umidade, em torno de 2,39%; o teor de cinzas foi de 7,92%; o bagaço possui alto percentual de substâncias com tendência de vaporizar dadas as condições adequadas de temperatura e pressão, podendo ser identificado pelo teor de matéria volátil em torno de 69,85%; por fim, o bagaço de cana possui 19,75% de carbono em sua estrutura, identificado pelo teor de carbono fixo.

A ativação química utilizando NaOH, HCl e ácido cítrico foi identificada por meio das análises de DRX e FTIR, comprovando-se a efetiva ativação mediante os novos picos gerados após o contato com a solução de ativação.

Os ensaios de adsorção realizados com solução sintética, em contato com a coluna de leito fixo, utilizando o bagaço de cana-de-açúcar como filtro, mostrou-se excelente, apresentando remoção de 83,4% na primeira hora de fluxo.

REFERÊNCIAS

ALBERTINI, S.; CARMO, L. F.; PRADO, L.G. F. Utilização de serragem e bagaço de cana-de-açúcar para adsorção de cádmio. **Ciênc. Tecnol. Aliment.**, v. 27, n. 1, p. 113-118, 2007. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0101-20612007000100020>.

ARAÚJO, D. A. *et al.* Remoção do óleo da água produzida utilizando o carvão ativado comercial. **Holos**, v. 8, p. 12-31, dez. 2017. Doi: <https://doi.org/10.15628/holos.2017.5891>.

BABARINDE, N. A. A. *et al.* Kinetic, Equilibrium and thermodynamic studies of the biosorption of Ni(II), Cr(III) and Co(II) from aqueous solutions using banana (*Musa acuminata*) leaf. **International Journal of Physical Sciences**, v. 7, n. 9, p. 1376-1385, 2012. Disponível em: <https://academicjournals.org/journal/IJPS/article-abstract/1E0F86618998>. Acesso em: 25 de março de 2020.

BORBA, C. E. **Modelagem de remoção de metais pesados em coluna de leito fixo**. 2006. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Unicamp, Campinas/SP, 2006.

BRANDÃO, P. C. **Avaliação do uso do bagaço de cana como adsorvente para a remoção de contaminantes, derivados do petróleo, de efluentes**. 2006. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, UFU, Uberlândia, MG, 2006.

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução nº 430**, de 13 de maio de 2011.

CURBELO, F. D. S. **Estudo da remoção de óleo em águas produzidas na indústria de petróleo, por adsorção em coluna utilizando a vermiculita expandida e hidrofobizada**. 2002. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Natal, RN, 2002.

DURELL, G.; JOHNSEN, S.; UTVIK, T R.; FROST, T.; NEEF, J. **Produced water impact monitoring in the Norwegian sector of the North Sea**: Overview of water column surveys in the three major regions. Seventh SPE International Conference on Health, Safety, and Environment in Oil and Gas Exploration and Production. Calgary, Canada: SPE, 2004. p.15.

E&P FORUM. **Oil Industry International Exploration and Production Forum**. North Sea Produced Water: Fate and effects in the Marine Environment. London, 1994. Report N°: 2.62/204, 50p.

FAKHRU'L-RAZI, A.; ALIREZA, P.; LUQMAN, C.A.; DAYANG, R.A.B; SAYED, S.M.; ZURINA, Z.A. Review of Technologies for oil and gas produced water treatment. **Journal of Hazardous Materials**, v. 170, p. 530-551, out. 2009. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.044>.

FARMEN, E.; HARMAN, C.; HYLLAND, K.; TOLLESFSEN, K. E. Produced water extracts from North Sea oil production platforms result in cellular oxidative stress in a rainbow trout in vitro bioassay. **Marine Pollution Bulletin**. v. 60, n. 7, p. 1092-1098, jul. 2010. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.01.015>.

FERREIRA Helinska, B. **Estudo dos processos de tratamento de água produzida de petróleo**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Petróleo) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Natal, RN, 2016.

FERREIRA Hellen, J. H. J. **Uso de biocarvão e suas biomassas precursoras para remediação de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos em água**. 2016. 67 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Sergipe, UFS, Aracaju, SE, 2016.

FONTES, V. A. **Estudo de adsorvente obtido de terras diatomáceas para remoção de metais pesados em águas produzidas: processamento, caracterização e dinâmica em leito fixo**. 2010. 116 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia do Petróleo) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Natal, RN, 2010.

GOMES, A. P. P. **Gestão Ambiental da Água Produzida na Indústria de Petróleo: melhores práticas e experiências internacionais**. 2014. 128 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2014.

JOHNSEN, S.; UTVIK, T R.; GARLAND, E.; VALS, B.; CAMPBELL, J. **Environmental Fate and Effect of Contaminants in Produced Water**. Seventh SPE International Conference on Health, Safety, and Environment in Oil and Gas Exploration and Production. Calgary, Canada: SPE, 2004. p. 9.

MONDO, N. **Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar**. Disponível em <http://www.neomundo.org.br/2018/06/21/brasil-e-o-maior-produtor-mundial-de-cana-de-acucar/>. Acesso em: 21 de junho de 2018.

MOREIRA, S. A.; SOUSA, F. W.; OLIVEIRA, A. G. Remoção de Metais de Solução Aquosa Usando Bagaço de Caju. **Quim. Nova**, v. 32, n. 7, p. 1717-1722, 2009. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422009000700007>.

NEFF, J.; LEE, K.; DeBLOIS, E. M. Produced water: Overview of composition, fates and effects. **Springer Science**, p. 3-54, jul. 2011. Doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0046-2_1.

NOVACANA. **A cana-de-açúcar como fonte de energia elétrica**. Disponível em: <https://www.novacana.com/estudos/a-cana-de-acucar-como-fonte-de-energia-eletrica-241013/>. Acesso em: 15 de abril de 2020.

NOVACANA. **Cana-de-Açúcar — Tudo sobre esta versátil planta**. Disponível em: <https://www.novacana.com/cana-de-acucar>. Acesso em: 17 de abril de 2021.

RAY, J. P.; ENGELHARDT, F. R. **Produced Water: Technological Environmental Issues and Solutions**. New York: Plenum Press, 1992. 632 p.

ROMERA, E. *et al.* Comparative study of biosorption of heavy metals using different types of algae. **Bioresource Technology**, v. 98, n. 17, p. 3344-3353, 2007. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2006.09.026>.

SANTOS, E. G.; ALSINA, O.L. S.; SILVA, F. L. H. Estudo da Adsorção de Contaminantes Orgânicos Provenientes da Água de Extração do Petróleo, Utilizando Biomassas como Adsorvente. Encontro Brasileiro de Adsorção - EBA, 4, 2003. **Anais[...]**, Rio de Janeiro, RJ, 2003. p. 198-205.

SHIMADZU. **Difratômetro de Raios X**. Disponível em <http://www.shimadzu.com.br/analitica/produtos/difratometros/xrd-7000.shtml>. Acesso em: 21 de março de 2019.

SILVA, M. C. M. **Avaliação da adsorção de cobre a partir de carvão ativado obtido quimicamente do bagaço de cana de açúcar**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Natal, RN, 2017.

SOUZA, J. V. T. M.; MASSOCATTO, C. L.; DINIZ, K. M.; TARLEY, C. R. T.; CAETANO, J.; Adsorção de cromo (III) por resíduos de laranja in natura e quimicamente modificados. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 33, n. 1, p. 03-16, 2012. Disponível em: <http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/semexatas/article/view/10048/11108>. Acesso em: 10 de abril de 2021.

STEPHENSON, M.T. Components of Produced Water: A Compilation of Industry Studies. **J of Petroleum Technology**, v. 44, n. 5, p. 548-603, maio1992. Doi: <https://doi.org/10.2118/23313-PA>.

TREYBAL, R. E. **Operaciones com transferencia de masa**, 2. ed. México: McGraw-Hill, 1984.

UTVIK, T. I. R. Chemical characterization of produced water from four offshore oil production platforms in the North Sea. **Chemosphere**, v. 39, n. 15, p. 2593-2606, 1999. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00171-X](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00171-X).

ZAGO, J. F. **Influência das características físico-químicas de carvões ativados na adsorção de saxitoxinas**. 2010. 202 f. Tese (Doutorado em Tecnologia ambiental e recursos hídricos) – Universidade de Brasília, UnB, Brasília, DF, 2010.

Data do recebimento: 21 de maio de 2021

Data da avaliação: 9 de agosto de 2021

Data de aceite: 12 de setembro de 2021

1 Professor de Estratégia. E-mail: renatosilvafdgh@gmail.com

2 Engenheira de Segurança na Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte – CAERN.
E-mail: walquiriaj@gmail.com

3 Professora Doutora dos Cursos das Engenharias da Universidade Tiradentes – UNIT/AL.
E-mail: jailmabs@hotmail.com

4 Professora Doutora dos Cursos das Engenharias da Universidade Tiradentes – UNIT/AL.
E-mail: vanessa.limeira@gmail.com