

APLICAÇÃO DE CARVÃO ALTERNATIVO EM TRATAMENTO DE ÁGUA INDUSTRIAL

Bruna Ferraz Mattos de Souza¹ e David Aguiar Ferreira Junior¹

Dra. Monica Tais Siqueira D'Amelio Felipe²

Universidade São Francisco

brunaferrazms@hotmail.com

¹Alunos do Curso de Engenharia Química, Universidade São Francisco; Campus Bragança Paulista

²Professora Orientadora Doutora, Curso de Engenharia Química, Universidade São Francisco; Campus Bragança Paulista

Resumo. O presente trabalho avalia a eficiência de remoção de carga orgânica e ρ -NA de um efluente industrial a partir da utilização de carvão ativado. Foi feita a comparação de eficiência entre um carvão ativado comercial e o carvão ativado alternativo de bagaço de cana-de-açúcar desenvolvido para este trabalho. O carvão ativado alternativo foi ativado com ácido fosfórico 20%. Foram realizados ensaios de cinética e isotermas de adsorção para estudar a eficiência de remoção dos dois componentes citados anteriormente. Os ensaios de cinética para tempo de operação de 05 minutos, apresentaram redução de 40% de carga orgânica e 59% de ρ -NA para o carvão comercial e 48% de carga orgânica e 43% de ρ -NA para o carvão alternativo. Para esse mesmo tempo, foram realizados os ensaios de isoterma onde foi observado que ambos os carvões realizam melhor adsorção com massa maior de adsorbente e que ambos apresentam uma maior interação com a ρ -NA do que com a carga orgânica. Desta forma, concluiu-se que o carvão ativado alternativo desenvolvido para esse estudo, apresenta um grande potencial para uso como adsorbente e pode ser empregado no tratamento deste efluente em questão.

Palavras-chave: carvão ativado, cana-de-açúcar, adsorção.

Abstract. The present work evaluates the efficiency of removal of organic load and ρ -NA from an industrial effluent using activated carbon. An efficiency comparison was made between a commercial activated carbon and the alternative sugarcane bagasse activated carbon developed for this work. Alternative activated carbon was activated with 20% phosphoric acid. Kinetic and adsorption isotherm tests were carried out to study the removal efficiency of the two components mentioned above. Kinetic tests for operating time of 05 minutes, reduction of 40% of organic load and 59% of ρ -NA for commercial coal and 48% of organic load and 43% of ρ -NA for alternative coal. For this same time, isotherm tests were performed, where it was observed that both coals perform better adsorption with a greater mass of adsorbent and that both have a greater interaction with the ρ -NA than with the organic load. Thus, it was concluded that the alternative activated charcoal developed for this study has a great potential for use as an adsorbent and can be a treatment for the treatment of this effluent in question.

Key words: activated carbon, sugar cane, adsorption.

Introdução

O desenvolvimento dos setores industriais, agrícolas e urbanos ocasiona uma vasta gama de problemas ambientais. Evidenciando a qualidade dos recursos hídricos, é necessário ter atenção, por partes dos setores denominados acima, quanto ao descarte de seus efluentes em meio aquoso.

As indústrias do setor farmacêutico possuem uma grande diversidade de produtos, sejam para a aplicação em vacinas, remédios, cosméticos ou rações para diversos tipos de animais. Tais produtos em seus processos de sintetização produzem de forma indesejada diversos tipos de efluentes, que possuem resíduos como nutrientes, proteínas e moléculas altamente estáveis, e apresentam baixa degradação quando lançadas ao meio ambiente sem um tratamento ideal.

O Brasil é um grande exportador e produtor de carne de frango, e para suprir a demanda são empregados, no processo de criação de aves de cortes, aditivos nas alimentações das aves de forma a melhorar o desempenho destas e evitar enfermidades. Um tipo de aditivo aplicado em processos de criação de aves para abate são os anticoccidianos, capazes de inibir a doença infecciosa coccidiose (BACILA, 2019). Em 1955, pela primeira vez foi sintetizada a molécula da nicarbazina, um composto que apresenta em sua cadeia estrutural a fórmula $C_{19}H_{18}N_6O_6$, o mesmo que é oriundo de uma reação química envolvendo os compostos 4,4'-dinitrocarbonilida (DNC) presente em solução de metanol e o 2hidroxi-4,6-dimetil-piridina (HDP) (BACILA, 2019). A nicarbazina é um produto fundamental no setor da avicultura, pois é aplicada com a finalidade de controlar a coccidiose, apresentando uma atividade anticoccidiostático estável e eficaz.

Dentre os compostos presentes no complexo da nicarbazina o DNC é responsável por empregar a função da atividade anticoccidiana, porém no processo de sintetização do DNC, utiliza-se a substância ρ -nitro-anilina (ρ -NA) como matéria-prima. Segundo a Autoridade Europeia para a Segurança Alimentar (EFSA), a nicarbazina a ser empregada na alimentação das aves não deve apresentar um teor maior que 0,1% da presença de ρ -NA. Essa recomendação deve-se à ρ -NA apresentar toxicidade e atividade carcinogênica aos seres humanos quando encontrada em grande quantidade nas aves a serem consumidas como alimento (BACILA, 2019). A atividade tóxica e carcinogênica da ρ -NA é devido à presença do grupo funcional amina estar ligada ao anel aromático, esse composto pode causar problemas ao rim, assim como a diminuição de oxigênio do sangue (BACILA, 2019).

Tal efluente pode provocar inúmeras consequências nocivas ao corpo receptor ao qual é destinado. Por exemplo, uma alta carga orgânica é capaz de acarretar no consumo de oxigênio para auxiliar seu processo de decomposição e, portanto, influencia na mortalidade da biota ali presente; a presença de nutrientes em elevadas concentrações pode causar a proliferação excessiva de algas; a turbidez dificulta a fotossíntese da vegetação submersa, reduzindo assim a quantidade de plantas e atrapalhando a produtividade dos peixes.

O presente trabalho visou utilizar o processo de adsorção para tratar efluentes industriais farmacêuticos através da produção de um carvão alternativo de bagaço de cana-de-açúcar, de modo a reduzir a carga orgânica e a ρ -NA do efluente, diminuindo assim os impactos ao corpo receptor, promovendo consequentemente um aumento na eficiência do tratamento, garantindo sua posição dentro dos parâmetros estabelecidos pela legislação. Para tal, estudaram-se os aspectos teóricos sobre o processo de adsorção e seus parâmetros de influência, além das características do efluente a ser tratado e do material a ser aplicado nos ensaios de adsorção. Foram realizados ensaios de cinética e isotermas de adsorção, para estudar a eficiência da remoção dos componentes mencionados anteriormente. Foi feita a comparação de eficiência entre o carvão ativado comercial e o carvão ativado alternativo desenvolvido para este trabalho.

Referencial Teórico

Tratamento de efluentes industriais

Nos dias de hoje, a preocupação com os danos causados ao meio ambiente vem crescendo cada vez mais. As indústrias precisam ter cuidado especial quando se trata deste assunto, já que, resíduos são gerados desde a etapa inicial de produção até a final, onde os efluentes são tratados e descartados. Os efluentes industriais podem apresentar altas cargas de matéria orgânica, sulfato, amônia, metais tóxicos e muitos outros poluentes extremamente agravantes ao meio ambiente. Estudos vêm sendo realizados de forma a encontrar alternativas baratas e eficazes para o tratamento de efluentes industriais. Um processo promissor é a adsorção, onde muitos estudos (ARAÚJO, *et al.*, 2018; PAZ, GARNICA e CURBELO, 2018; SOARES, 2014) já apresentaram sua eficiência na remoção de contaminantes em meio aquoso. De forma a deixar este processo ainda mais viável, temos a utilização de carvão alternativo obtido através da biomassa.

É fundamental a caracterização do efluente gerado no processo, para se enquadrar em um tratamento adequado antes do descarte. As possíveis modelagens do processo de tratamento são amplas e é através da caracterização da natureza do efluente que é projetado um tratamento ideal e eficaz.

O descarte de efluentes tratados ou não, que são oriundos de atividades industriais, devem obedecer aos limites padrões legais de emissão e de qualidade. Os efluentes das indústrias produtoras de nicarbazina apresentam compostos como matéria orgânica, sulfato, amônia e o DNC em sua composição, sendo de extrema importância realizar o tratamento do mesmo.

Uma maneira de realizar o acompanhamento de uma ETE (Estação de Tratamento de Efluente) é aplicando análises nos pontos de entrada e saída. Assim, é possível verificar se o processo está alcançando a eficiência desejada e, conseqüentemente, atendendo aos padrões da legislação referente ao lançamento de efluente em corpos d'água.

O tratamento atual na indústria estudada é encontrado na Figura 1.



Figura 1 - Fluxograma tratamento atual na indústria estudada.

Utilizam-se análises físicas, químicas e biológicas para determinar se o tratamento se enquadra nas referências da legislação. Dentre os parâmetros físicos a serem analisados, há a quantidade de sólidos suspensos e sólidos sedimentáveis, coloração do efluente, turbidez e temperatura. O parâmetro biológico mais aplicado é a DBO₅ (Demanda Bioquímica de

Oxigênio 5) e análises de microscopia para averiguação da biota presente. Já nos parâmetros de análises químicas estão presentes o pH, composição e DQO (Demanda Química de Oxigênio), sendo esta última análise a mais importante para levantamento da eficiência do processo de tratamento (SCHLUSAZ, 2014).

Os sólidos suspensos são capazes de alterar as propriedades físicas e químicas da água, como a absorção, a temperatura, transmissão da luz etc. Tais sólidos podem ser removidos através da adsorção ou da sedimentação. Os sólidos sedimentáveis, assim como os sólidos suspensos, são removidos pela sedimentação após o processo de decantação (SCHLUSAZ, 2014).

O termo “Cor” para parâmetros de água refere-se à cor verdadeira da água isenta da presença de turbidez, geralmente removida com um processo de filtração, a turbidez é uma fonte de interferência no processo de determinação da coloração verdadeira, que é analisada pelo método de espectrofotometria (APHA, 1998).

A água residual de origem industrial pode apresentar certos graus de coloração, consequência da presença de produtos químicos, de origem orgânica ou inorgânica, responsáveis por causarem cor. É fundamental que ocorra um tratamento com a finalidade de remoção de produtos que proporcionam à coloração antes do descarte em cursos hídricos, por razões estéticas e por razões de saúde (APHA, 1998).

Existe um parâmetro quantitativo do valor de coloração que é possível de se calcular. O pH interfere nesse resultado da coloração da água, valor que invariavelmente aumenta à medida que o pH da água aumenta. É fundamental especificar o pH em conjunto com o resultado do valor da coloração obtida, para fins de pesquisa (APHA, 1998).

O valor de cor da água é possível se obter através da Equação 1:

$$\text{Cor} = \frac{A \times 50}{B} \quad (1)$$

Onde: A - Uma estimativa de cor de uma amostra diluída;

B - Amostra de B mL retirada para diluição.

A cor verdadeira da amostra como já mencionado pode ser determinada por análise espectrofotométrica, que se fundamenta em medir a absorbância de luz de certa amostra e relacionar a uma curva padrão, padronizada por uma amostra padrão. Análises espectrofotométricas são feitas em uma faixa do comprimento de onda do UV-VIS de 450 a 465 nm. (APHA, 1998). Usualmente a solução padrão que auxilia na montagem da curva padrão é o Platina-Cobalto (Pt-Co), além disso, deve se escolher um comprimento de onda dentro da faixa descrita à cima do UV-VIS, 456 nm é uma ótima proposta de faixa a se trabalhar quando se está utilizando a solução padrão o Pt-Co, devido ao mesmo apresentar alta precisão na absorção nesta faixa referida (APHA, 1998).

A DBO₅ é um método utilizado para medir a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica presente no efluente, através de processos biológicos aeróbicos. Este método considera “o metabolismo dos microrganismos heterotróficos onde os compostos orgânicos biodegradáveis são transformados em produtos finais estáveis ou mineralizados.” (SCHLUSAZ, 2014; p. 33).

A DQO é um método quantitativo que representa a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica presente em uma amostra em condições controladas. Existem métodos diferentes na realização das análises de DQO, o que vai caracterizar a escolha do método a ser aplicado será o tipo de efluente a ser analisado. Quando se tem um efluente com uma ampla gama de resíduos, o método refluxo aberto é indicado, pois se utiliza uma grande quantidade de amostra para se reproduzir os ensaios. O método de refluxo fechado é mais econômico, devido à quantidade de reagentes a ser utilizado que conseqüentemente produzem

quantidades menores de resíduos perigosos, para este método é necessário uma perfeita homogeneização para que se possam reproduzir os ensaios (APHA, 1998). Existem interferentes que podem influenciar nos ensaios da DQO, o íon cloreto é um interferente, reagindo com íon de prata presente no catalisador inibindo a atividade catalítica da prata. Qualquer outro reagente que seja capaz de inibir a atividade da prata como catalisador restringe o processo de oxidação (APHA, 1998).

Adsorção

A adsorção é um processo de transferência de massa, onde os poluentes (adsorvatos) ficam retidos na superfície do adsorvente. Para que o adsorvente seja eficiente e realize uma boa adsorção é importante possuir uma elevada área superficial e ser o mais poroso possível (NASCIMENTO, *et al.*, 2014).

As propriedades físico-químicas do adsorvente são os principais parâmetros que influenciam o processo de adsorção. É devido ao grau de porosidade, à distribuição dos poros no material e à presença de sítios ativos que determinará a capacidade e a taxa de adsorção, fatores diretamente proporcionais à área da superfície de contato. As propriedades do adsorvato estão atribuídas ao tamanho da espécie que interfere na taxa de adsorção, pois é devido ao seu tamanho que terá mais facilidade ou dificuldade para sofrer o transporte intraparticular (NASCIMENTO, *et al.*, 2014).

A polaridade é outra propriedade que determina a afinidade do adsorvente com o soluto, e definir se este permanecerá no solvente ou irá aderir no adsorvente. As condições em que o processo é operado também determinam na adsorção (NASCIMENTO, *et al.*, 2014).

A temperatura é um parâmetro de operação que afeta principalmente a constante de velocidade de adsorção, pois a temperatura é fonte de energia cinética ao sistema, o que promove a mobilidade das espécies presentes do adsorvato. O aumento de temperatura é responsável por diminuir a viscosidade do meio elevando as taxas de difusão das espécies do adsorvato em toda faixa externa e interna do adsorvente, porém, este aumento é responsável por favorecer a dessorção, causando assim a desobstrução dos poros, possibilitando a penetração de moléculas maiores do adsorvato (NASCIMENTO, *et al.*, 2014).

O pH é outro parâmetro de operação que é capaz de afetar o grau de distribuição das espécies químicas, devido às cargas superficiais do adsorvente serem resultados da sua composição. Sabe-se que o adsorvente quando em solução aquosa é capaz de adsorver os íons OH^- ou H^+ , dessa forma os sítios ativos se tornarão positivamente carregados ao associarem-se com os prótons de soluções ácidas, e negativamente carregados quando perdem prótons para soluções alcalinas (NASCIMENTO, *et al.*, 2014).

Existem dois tipos de natureza de adsorção, a física onde as forças intermoleculares são fracas e a natureza química do adsorvato permanece inalterada; e a química, onde as ligações são muito fortes e, portanto, ocorre uma alteração na composição do adsorvente (NASCIMENTO, *et al.*, 2014). Esses tipos de natureza podem ser observados através da construção da isoterma de adsorção, as isotermas são geralmente utilizadas para comparação entre diferentes tipos de carvões ativados, e dessa maneira é possível escolher aquele que seja mais apropriado para o processo (KEHL, 2015).

Isotermas de adsorção

As isotermas são extremamente importantes para entender melhor o processo de adsorção, pois são elas que indicam a forma como o adsorvente irá adsorver o soluto, além de fornecerem uma estimativa da quantidade máxima para o soluto ser adsorvido e se a purificação desejada poderá ser alcançada. A palavra “isoterma” representa o fato de o experimento ocorrer a uma temperatura constante. As isotermas são equações matemáticas que descrevem em termos quantitativos a adsorção de solutos por sólidos em temperatura

constante (NASCIMENTO, *et al.*, 2014). O equilíbrio de adsorção é obtido após o adsorvato ser colocado em contato com o adsorvente. As moléculas então fluem do meio aquoso para o adsorvente até que a concentração do soluto na fase líquida seja constante. Seu gráfico é representando por q_e (quantidade máxima de soluto retido no adsorvente no equilíbrio) vs. C_e (concentração de equilíbrio). As isotermas podem ser caracterizadas como linear (indica que a quantidade adsorvida é proporcional à concentração do fluido), favorável (extraem quantidades altas mesmo em baixos níveis de concentração) e desfavorável (baixa capacidade de remoção em baixas concentrações) que são representados na Figura 2 (NASCIMENTO, *et al.*, 2014).

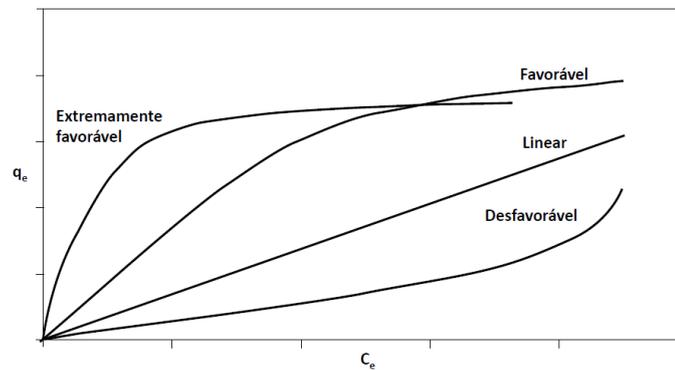


Figura 2 - Formas possíveis de isotermas (Fonte: NASCIMENTO, *et al.*, 2014).

Outra forma de avaliação são as isotermas que explicam a relação de equilíbrio entre a concentração na fase fluida e a concentração dos adsorventes. As isotermas podem ser identificadas de acordo com a natureza da inclinação inicial da curva, sendo dividida em 04 subgrupos conforme a curva se distancia da origem. A Figura 3 mostra as curvas das isotermas.

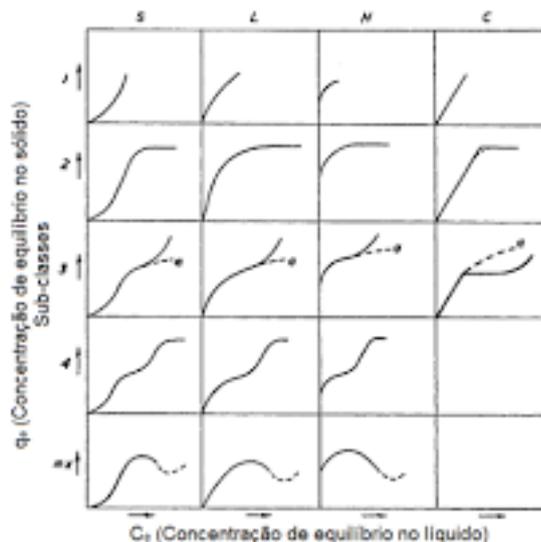


Figura 3 - Modelos de isotermas de adsorção (Fonte: K EHL, 2015).

Segundo Kehl (2015):

- Tipo S (Sigmoidal): esse tipo de isoterma apresenta uma curvatura inicial voltada para cima, indicando que as interações adsorvente-adsorbato são mais fracas do que as interações adsorbato-adsorbato e solvente-adsorvente;

- Tipo L (Langmuir): apresentam curvatura inicial voltada para baixo, já que ocorre a diminuição dos sítios ativos disponíveis;
- Tipo H (alta afinidade): são aquelas que representam a grande afinidade entre adsorbato e adsorvente, sendo que a quantidade adsorvida inicialmente é alta e logo após é alcançado o equilíbrio;
- Tipo C (partição constante): apresenta início linear, pois representa a constância do número de sítios ativos.

Muitas equações de isotermas foram propostas para ajustar os dados experimentais, sendo os dois modelos mais conhecidos e utilizados o de Langmuir e Freundlich (NASCIMENTO, *et al.*, 2014).

Modelo de Langmuir

O modelo de Langmuir é um dos mais utilizados para representação de isotermas no processo de adsorção, e frequentemente utilizada para representar a adsorção em fase líquida (SILVA, 2010). Este modelo é baseado em alguns pressupostos como:

1. Existência de um número definido de sítios;
2. Cada sítio pode ser acomodado por apenas uma molécula de cada vez;
3. Não existe interação entre as moléculas já adsorvidas;
4. Ocorre em monocamada;
5. A adsorção estará completa quando a monocamada de adsorbato for formada;
6. A velocidade da dessorção dependerá apenas da quantidade de material adsorvido.

Ao final do processo, quando as taxas de adsorção e dessorção são iguais, conclui-se que o equilíbrio dinâmico foi estabelecido.

Modelo de Freundlich

A isoterma de Freundlich é um modelo empírico que relaciona o material adsorvido com a concentração do material na solução. Este modelo considera:

1. Fisissorção das espécies;
2. Adsorção em multicamada;
3. Sólido heterogêneo, de forma a se aplicar uma distribuição exponencial para caracterizar os diferentes sítios de adsorção (NASCIMENTO, *et al.*, 2014).

Cinética de adsorção

É fundamental conhecer os parâmetros de cinética de adsorção, pois tais parâmetros possibilitam estruturar a montagem do processo e a operação do mesmo. Os parâmetros cinéticos são essenciais para a determinação da velocidade de adsorção, o tempo necessário para a remoção da impureza, o tempo de residência entre adsorvente e adsorbato (NASCIMENTO, *et al.*, 2014).

A cinética de adsorção é a taxa da velocidade em que ocorre a transferência de partículas sólidas de uma fase fluida até a região superficial da fase sólida em relação ao tempo, considerando a transferência de massa de um ou mais componentes que migrem dessa fase fluida que cercam o adsorbato até os interiores dos poros dos mesmos (NASCIMENTO, *et al.*, 2014).

É possível conduzir a cinética de adsorção através de três formas: transferência de massa externa, difusão no poro e difusão na superfície.

A transferência de massa externa conduz o adsorvato presente na fase fluída, em torno do adsorvente, a se aderir na região externa do adsorvente. Esse processo pode sofrer influência da agitação empregada no sistema e da concentração do adsorvente (NASCIMENTO, *et al.*, 2014).

A difusão no poro é conduzida com o transporte do adsorvato presente na fase fluída, para a região interna dos poros. Quando o processo de adsorção ocorre a essa via, a mesma é adotada como etapa determinante do processo de adsorção, determinando a facilidade de o adsorvato sofrer a difusão no interior do poro (NASCIMENTO, *et al.*, 2014).

A difusão na superfície ocorre com os adsorvatos presentes na região interna do poro, difundindo-se ao longo da superfície interna do poro (NASCIMENTO, *et al.*, 2014).

Modelos cinéticos: pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem

O modelo cinético de pseudo-primeira ordem é responsável por determinar se a cinética de adsorção é controlada por difusão externa, e dessa forma, independe da concentração do adsorvato. Este modelo é determinado pela Equação 2 (da SILVA, *et al.*, 2018).

$$q(t) = q_e(1 - e^{-k_1 t}) \quad (2)$$

Onde: $q(t)$ – quantidade adsorvida no tempo t (mg g⁻¹)

q_e – quantidade de soluto adsorvido no equilíbrio (mg g⁻¹)

k_1 – constante de velocidade de pseudo-primeira ordem (min⁻¹)

t - tempo (min)

Já para o modelo cinético de pseudo-segunda ordem, a taxa de adsorção depende da quantidade adsorvida na superfície do adsorvente, e também da quantidade adsorvida no equilíbrio. Ele é representado pela Equação 3 (da SILVA, *et al.*, 2018).

$$q(t) = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 q_e t} \quad (3)$$

Onde: $q(t)$ – quantidade adsorvida no tempo t (mg g⁻¹)

q_e – quantidade de soluto adsorvido no equilíbrio (mg g⁻¹)

k_2 – constante de velocidade de pseudo-segunda ordem (g mg min⁻¹)

t - tempo (min)

Carvão ativado, pirólise e ativação

O carvão ativado (CA) é uma substância de carbono puro e altamente poroso, sendo dessa forma um material com alta capacidade de coletar seletivamente as impurezas em seus poros. Devido a esta alta capacidade de adsorção o CA é utilizado em diversos processos como tratamento de água, tratamento de efluente, purificação de líquidos ou gases, em forma farmacêutica para desintoxicação etc. (SOARES, 2014). Qualquer material que possua um alto teor de carbono é capaz de ser convertido em CA. Essa conversão é comumente obtida através da pirólise, processo realizado a uma temperatura de 500 a 800 °C com baixo teor de oxigênio (KEHL, 2015). Nesta etapa o carvão apresenta uma estrutura com menor área superficial e poros pouco funcionais, sendo necessária a ativação para desobstrução e aumento do diâmetro dos poros. Essa ativação pode ocorrer de maneira física ou química (SOARES, 2014).

A pirólise é um método de conversão térmica que age rompendo as ligações carbono-carbono e formando ligações carbono-oxigênio, desta forma uma parte da biomassa será reduzida a carbono e a outra é oxidada e hidrolisada (SOARES, 2014). A biomassa é altamente utilizada por apresentarem compostos com alto teor de carbono, sendo os três principais a celulose, hemicelulose e lignina. Ao ser levada ao tratamento térmico, sofrerá degradação e irá gerar bioóleo, gases não combustíveis e carvão (SOARES, 2014).

Após o processo de pirólise o material carbonizado é submetido ao processo de ativação, que consiste em aumentar a área superficial e a porosidade do material obtido. A ativação irá retirar componentes como o alcatrão, o creosoto e as naftas, além de outros resíduos orgânicos que possam ser capazes de obstruir os poros do material pirolisado. A ativação pode ser classificada como química, física ou físico-química, quando os dois métodos são usados em conjunto (COSTA, FURMANSKI e DOMINGUINI, 2015).

Adsorvente: cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) foi trazida ao Brasil em 1532 por Martim Afonso de Souza, e desde então se tornou uma planta altamente explorada para obtenção de açúcar e álcool. A cana pode ser dividida em duas partes principais, o caldo onde encontrasse toda água presente e a fibra, a matéria seca da cana. Dessa forma a cana apresenta de 86 a 92% de caldo e de 8 a 14% de fibra (FISCHER-FILHO, 2018).

O bagaço da cana-de-açúcar corresponde ao material fibroso que permanece após a moagem desta, é um material rico em biomassa lignínica celulósica e representa cerca de 30% da massa da cana (PAZ, GARNICA e CURBELO, 2018). A quantidade de bagaço obtido para cada tonelada de cana é de aproximadamente 280 kg, correspondendo a maior quantidade de resíduo industrial no Brasil, visto que, segundo a Companhia Nacional de Abastecimento, (CONAB), a safra de 2020/2021 gerou cerca de 665,1 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, significando então uma quantidade de aproximadamente 186,2 milhões de toneladas de bagaço. A fibra do bagaço da cana-de-açúcar é constituída de celulose, hemicelulose e lignina, sendo esta última a principal responsável pela formação de carvão nos processos de pirólise.

O presente trabalho visou utilizar o processo de adsorção para reduzir a carga orgânica e de p -NA de um determinado efluente industrial para reduzir os impactos ambientais causados pelo efluente não tratado. Para determinar a eficiência do estudo foi realizada a comparação entre o uso de carvão ativado tradicional e o carvão alternativo de bagaço de cana-de-açúcar desenvolvido neste trabalho.

Material e Métodos

A metodologia apresentada neste trabalho é baseada nos ensaios estudados por Soares (2014). A Figura 4 representa, de forma simplificada, o fluxograma da metodologia utilizada.

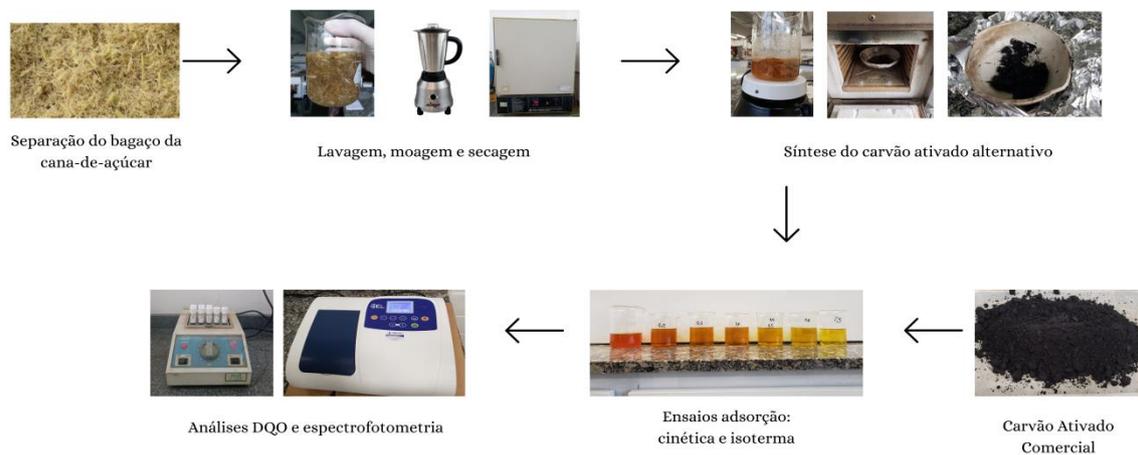


Figura 4 - Fluxograma metodologia.

Ela consiste em três etapas principais: o preparo das amostras, o processo de adsorção e as análises do efluente tratado.

Obtenção das amostras

A biomassa utilizada para sintetização do carvão ativado estudado foi o bagaço da cana-de-açúcar, resíduo obtido através do processo de extração do sólido-líquido do colmo por moagem. Tal massa é oriunda do plantio caseiro dos colmos de cana da safra do ano de 2021, localizado na cidade de Piracaia – São Paulo.

Para a comparação com o carvão ativado alternativo, foi adquirido o carvão ativado comercial.

Preparo das amostras de carvão ativado a partir do bagaço da cana

O bagaço residual da moagem foi submetido à lavagem com água destilada em um processo de batelada e sujeito a uma agitação prolongada por um período de 2 horas, através de uma placa agitadora (marca Fisatom) e um peixe magnético. O material de bagaço apresentou grandes dimensões dos grãos moídos, assim, fez-se necessário promover uma moagem em um liquidificador caseiro durante um período de 03 minutos com adição de 250 mL de água.

Após o procedimento para remoção das impurezas e moagem, realizou-se a secagem do material dispondo a uma estufa (marca Fanem) por volta dos 70 °C em um período de 6 horas.

Síntese do carvão ativado alternativo

A massa de cana-de-açúcar obtida na moagem foi submetida a um sistema contendo ácido fosfórico (H_3PO_4) 20%, sendo a razão entre os volumes ácido/bagaço igual a 2. O sistema foi operado em agitação constante por 2 horas. Após o tempo decorrido, o material foi filtrado e seco em uma estufa por 6 horas a 70 °C.

Para obtenção do carvão, o tratamento térmico foi realizado em uma mufla (marca EDG 300) disponibilizada pelo laboratório da Universidade São Francisco (USF). O procedimento teve início em temperatura ambiente a qual foi gradualmente aumentada a uma taxa de 10 °C/minuto até chegar a 400 °C, e permaneceu nesta temperatura por um período de 3 horas.

Adsorção

O estudo foi realizado utilizando como solução padrão de análise uma amostra coletada no sistema de ETE no ponto de entrada da lagoa de estabilização da indústria denominada neste trabalho de Indústria X. Com as informações obtidas no estudo laboratorial, foi possível determinar a eficiência e assim a viabilidade da implementação do processo de adsorção no processo desta ETE.

Caracterização dos carvões ativado e do efluente

A avaliação de estrutura do carvão ativado comercial e alternativo foi realizada utilizando um microscópio óptico (marca Nikon).

O pH do efluente foi aferido através de um pHmetro (marca Digimed) e já estava calibrado para utilização.

Para o ensaio de DQO foram adicionados 2 mL do efluente à solução reagente de DQO, na própria cubeta do reagente. Essa mistura foi homogeneizada e transferida para um reator de queima (marca Hach) a 150 °C por 2 horas. A análise realizada utiliza como branco 2 mL de água destilada com a solução reagente de DQO, que seguiu o mesmo procedimento da confecção das análises das amostras.

A medição da concentração inicial de ρ -NA foi realizada através de um espectro de massa em um laboratório externo.

Cinética de adsorção

Para a realização dos ensaios em batelada de cinética de adsorção foram colocados, em cada um dos seis Erlenmeyer, 100 mL do efluente a ser estudado em conjunto com 1,00 g do carvão. Cada sistema foi operado por um tempo definido para o levantamento da curva de cinética de adsorção. Os tempos estudados foram 5, 10, 20, 30, 40, 50 e 60 minutos. O sistema foi submetido à agitação e temperatura constante.

Para a montagem da curva de cinética de adsorção, foi necessário construir um gráfico da eficiência de remoção (eixo y) pelo tempo (eixo x).

Isoterma de adsorção

Para a realização dos ensaios de isoterma de adsorção foram utilizados 6 Erlenmeyer. Em cada Erlenmeyer foram adicionados 100 mL do efluente, e uma quantidade conhecida de massa de carvão, sendo essa quantidade, em gramas, igual a: 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5. O tempo de operação foi escolhido em função da melhor adsorção apresentada na cinética. O sistema operou à temperatura ambiente e agitação constante.

Foram aplicados dois modelos para determinação de que tipo de adsorção ocorreu. O modelo de Langmuir foi ajustado utilizando a Equação 4.

$$q_e = \frac{q_{max}K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (4)$$

Onde: q_e – quantidade de soluto adsorvido no equilíbrio (mg g^{-1})

q_{max} – capacidade máxima de adsorção (mg g^{-1})

K_L – constante de interação adsorvato/adsorvente (L mg^{-1})

C_e – concentração de adsorvato no equilíbrio (mg L^{-1})

O fator de separação foi determinado através da Equação 5.

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0} \quad (5)$$

Já o modelo de Freundlich, foi ajustado pela Equação 6.

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \quad (6)$$

Onde: q_e - quantidade de soluto adsorvido (mg g^{-1})

C_e - concentração de equilíbrio em solução (mg L^{-1})

$\frac{1}{n}$ – constante relacionada à heterogeneidade da superfície

K_F - constante de capacidade de adsorção de Freundlich ($\text{mg}^{1-(1/n)} (\text{g}^{-1})\text{L}^{1/n}$)

As constantes q_{max} , K_L , K_F e $1/n$ foram obtidas através do teste de hipótese Solver, disponível no Excel.

Análises: DQO, espectrofotometria

As análises de DQO das amostras foram realizadas de mesma forma que a amostra inicial, apresentada no tópico “*Caracterização dos carvões ativado e do efluente*”.

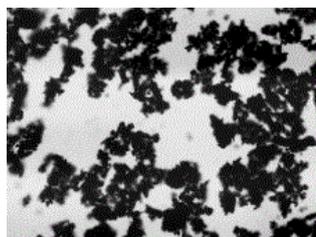
A análise espectrofotométrica foi realizada para determinação da concentração de ρ -NA nas amostras. Inicialmente foi utilizado o espectrofotômetro UV-VIS (marca BEL Photonics) para determinar o comprimento de onda de leitura do ρ -NA, utilizando como base o experimento de Lunagariya; Dhar; Vekariya (2017).

Para as análises, foi utilizado o espectrofotômetro UV (marca LGI Scientific) no comprimento de onda determinado (444 nm). Foi construída a curva de calibração e as concentrações de ρ -NA nas amostras antes e depois dos ensaios de adsorção foram analisadas. Como padrão foi utilizada a água destilada.

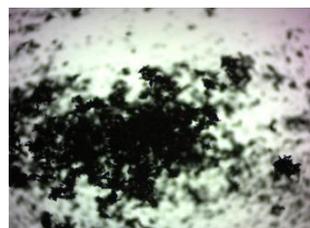
Resultados e Discussão

Caracterizações

Utilizando o microscópio foi possível compreender a estrutura do carvão ativado comercial (CAC) e do carvão ativado alternativo (CAA), os quais são apresentados na Figura 5.



(a)



(b)

Figura 5 - (a) Resolução de 100x CAC (b) Resolução de 100x CAA

Através da Figura 5 pode-se perceber uma regularidade nas partículas do CAC, tanto na sua distribuição como no seu formato, ao contrário do CAA, que não apresenta uma uniformidade entre seus grãos, sendo necessário um estudo para melhorar sua maceração após sair da mufla, melhorando assim sua distribuição e superfície de contato.

A amostra em estudo trata-se de um efluente carregado em sua composição por substâncias químicas como carga orgânica e ρ -NA. As características iniciais do efluente são apresentadas na Tabela 1 e seu aspecto inicial é apresentado na Figura 6.

Tabela 1 - Condições iniciais da amostra.

pH inicial	7,35
DQO inicial	37150 mg/L
ρ-NA inicial	0,13 g/g



Figura 6 - Coloração inicial da amostra.

Curva de Calibração da ρ -NA

A Figura 7 apresenta a curva de calibração obtida para a ρ -NA. O R^2 obtido indica boa representatividade da concentração em relação à absorbância.

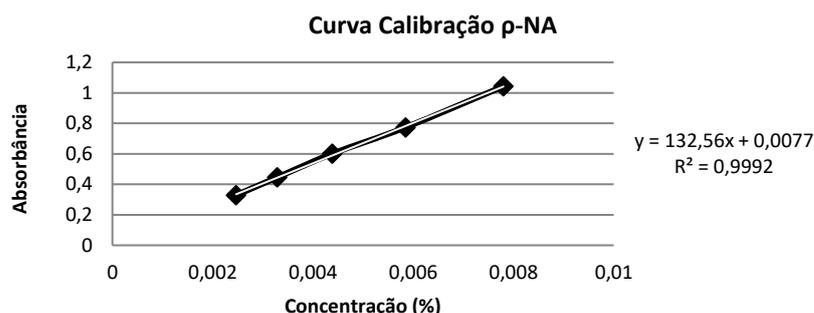


Figura 7 - Curva de calibração da ρ -NA.

Cinética de adsorção

Os ensaios de cinética foram elaborados de modo a determinar o tempo em que o sistema apresentasse a melhor eficiência de remoção, para assim serem feitos os ensaios de isoterma de adsorção. Tais ensaios foram realizados em duplicata. Constatou-se que, para o CAC, o tempo que apresentou maior taxa de remoção para carga orgânica foi de 05 minutos e para a ρ -NA foi de 20 minutos. Já para o CAA ambas as taxas de remoção foram melhores em 05 minutos. A Figura 8 apresenta o gráfico de cinética de adsorção de DQO e ρ -NA.

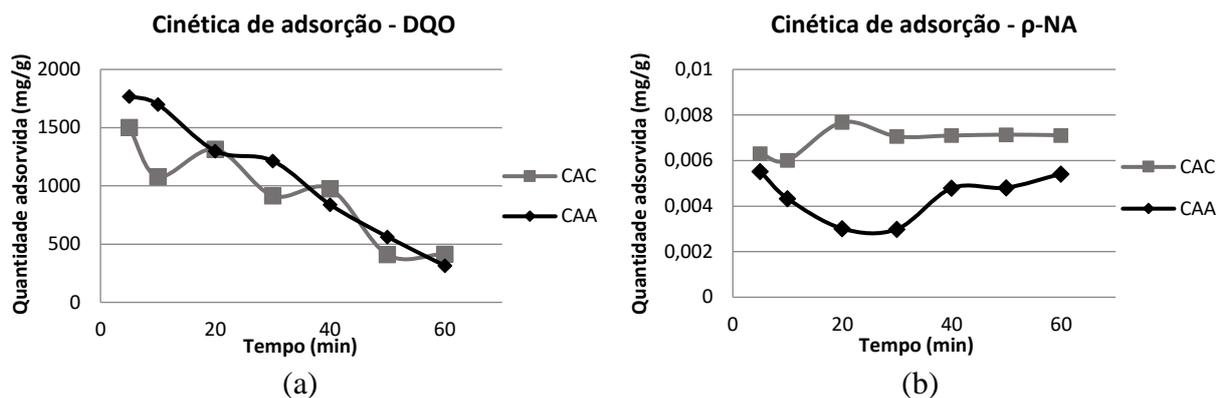


Figura 8 - (a) Cinética de adsorção - DQO (b) Cinética de adsorção - ρ -NA.

Analisando os gráficos apresentados, é possível observar que a carga orgânica no CAC apresenta grande adsorção inicial seguida de dessorção. Uma explicação é que no início, os sítios ativos mais externos do carvão estão sendo consumidos. A carga orgânica apresenta moléculas de tamanhos variados, o que indica que partículas grandes não são possíveis de serem adsorvidas nos poros. A dessorção indica pouca estabilidade no processo de adsorção da carga orgânica. Já para a ρ -NA, cujas partículas são menores apresenta crescente adsorção até os 30 min para o CAC, quando atinge o equilíbrio.

Dessa forma é observado que a ρ -NA e a carga orgânica, que é representada pelo DQO, indicam uma afinidade com o CAC, porém, a ρ -NA apresenta uma afinidade maior com o CAC quando comparado com a carga orgânica, resultando, ao longo do tempo, uma obstrução nos sítios ativos, fazendo com que outros componentes sejam dessorvidos, provocando desta maneira um aumento da concentração de carga orgânica na fase líquida.

Já no CAA percebe-se que ambos componentes são melhores adsorvidos no início do processo, em 05 minutos, e que a carga orgânica também sofre o processo de adsorção e dessorção ao longo do tempo, embora seja de forma mais suave do que com o CAC. Para a ρ -NA, a dessorção também ocorre após os minutos iniciais, porém, a adsorção volta a ocorrer depois dos 40 minutos, indicando uma boa afinidade entre a molécula de ρ -NA e o CAA, no ensaio de cinética não ocorreu a adsorção completa, demonstrando que é necessário um tempo de ensaio maior que uma hora para que a adsorção ocorra.

Pelo fato da cinética de DQO apresentar adsorção e dessorção ao longo do processo, não foi possível estabelecer os modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem nem pseudo-segunda ordem para estes ensaios. Para a ρ -NA foi possível encontrar os modelos cinéticos e a Figura 9 apresenta esses modelos.

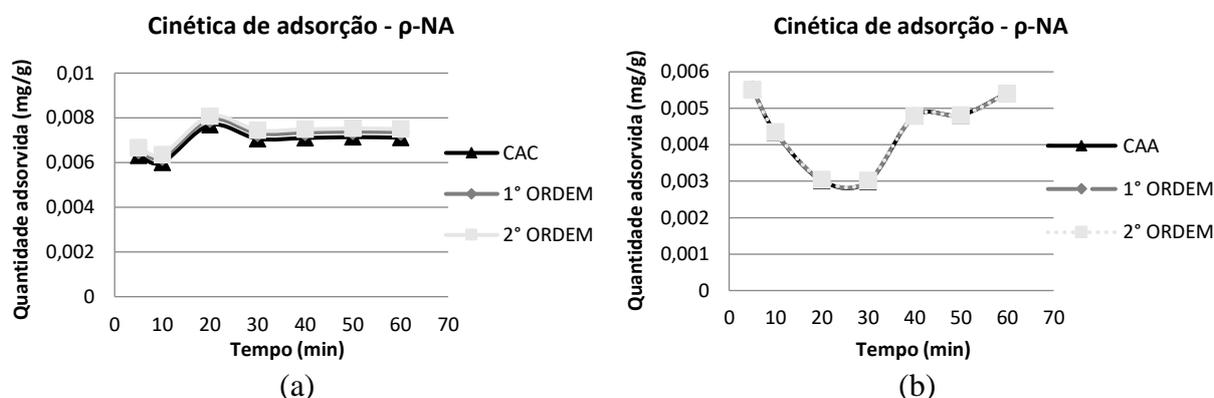


Figura 9 - (a) Cinética de adsorção - CAC (b) Cinética de adsorção - CAA.

A Tabela 2 apresenta os valores da quantidade de soluto adsorvido no equilíbrio, das constantes de velocidade e o erro dos modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem.

Tabela 2 - Modelos cinéticos de pseudo primeira ordem e pseudo-segunda ordem.

Modelos		CAC	CAA
Pseudo-primeira ordem	q_e (mg g ⁻¹)	0,25	0,24
	K_1 (min ⁻¹)	4,25	4,17
	Erro	$3,95 \times 10^{-7}$	$3,88 \times 10^{-10}$
Pseudo-segunda ordem	q_e (mg g ⁻¹)	0,23	0,23
	K_2 (g mg min ⁻¹)	20,09	19,84
	Erro	$1,01 \times 10^{-6}$	$1,76 \times 10^{-9}$

Com isso é visto que o modelo de pseudo-primeira ordem é o que melhor representa a cinética da ρ -NA para ambos os carvões, já que este modelo apresenta o menor erro, e que a constante cinética que expressa que a constante de velocidade é 4,25 min⁻¹ para o CAC e 4,17 min⁻¹ para o CAA.

Isoterma de adsorção

Os ensaios de isoterma foram baseados no melhor tempo de cinética de adsorção de carga orgânica para o CAC, já que este foi o primeiro ensaio realizado e, portanto, aquele em que a empresa que forneceu os ensaios de DQO realizou os testes primeiro. Determinado o tempo da cinética (05 minutos), foi realizado o ensaio da isoterma. A massa do carvão foi variada, obtendo-se 05 pontos que são apresentados nas Figuras Figura 10 e Figura 11. Foram realizados também os cálculos para os modelos de Langmuir e Freundlich, que também são representados a seguir.

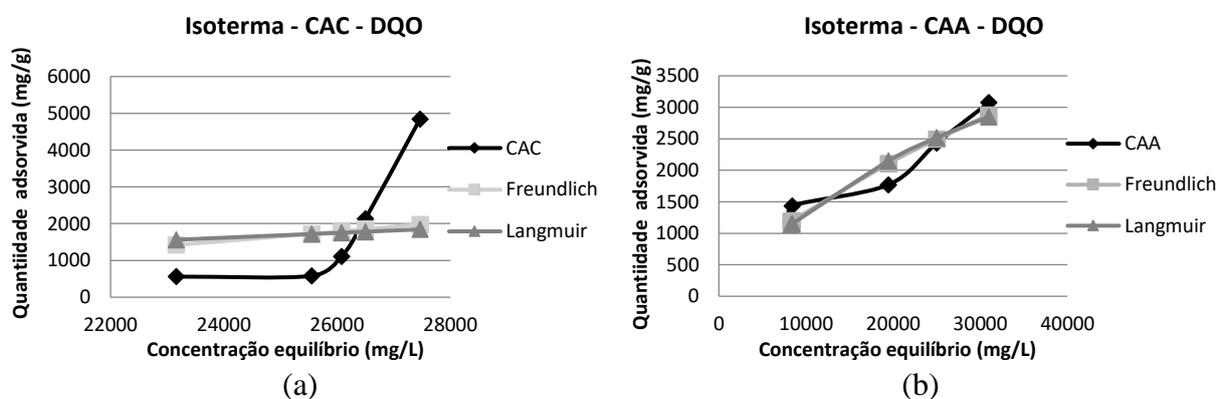


Figura 10 - (a) Isoterma de adsorção - CAC - DQO (b) Isoterma de adsorção - CAA - DQO.

Tabela 3 - Parâmetros calculados para isoterma de Langmuir e Freundlich.

	Langmuir		Freundlich	
	q_{max}	R_L	n	K_F
CAC	64353	1,04	0,51	$4,53 \times 10^{-6}$
CAA	6358	1,97	1,49	0,64

Observa-se que a isoterma de DQO obtida no experimento com CAC (Figura 10a) é caracterizada como desfavorável, ou seja, a força de interação entre o adsorvente e o adsorvato é fraca, além de ser caracterizada como uma adsorção como física, e desta forma, é possível o estudo da aplicação da recuperação do adsorvato. A obtenção dos resultados da isoterma apresentou que a carga orgânica é removida com uma baixa interação em relação ao

carvão, mesmo com um aumento significativo na massa de carvão, visando aumentar a eficiência de remoção, isso não ocorreu, pois a massa de adsorvato retida por unidade de carvão é pequena, resultando em uma isoterma desfavorável em relação ao DQO. Fato que pode ser comprovado devido ao valor de R_L ser maior do que 1, indicando que o soluto prefere a fase líquida à sólida e reafirmado pelo baixo valor de n , já que quanto maior for o n , mais forte é a interação entre o adsorvato e o adsorvente.

Para o CAA (Figura 10b), o modelo de isoterma que melhor representou a curva foi o Tipo L-4, especificando que os sítios ativos vão sendo consumidos ao longo do tempo. Ao contrário do CAC, o aumento da massa de carvão foi responsável por um aumento na eficiência na taxa de remoção de carga orgânica, tendo a eficiência máxima em 2,5 g igual a 78%, ao contrário do CAC, onde mesmo sendo a maior massa, a eficiência é de apenas 38%. Como ocorre com o CAC, o soluto prefere a fase líquida ao CAA, fato comprovado pelo R_L ser maior do que 1, porém, com este carvão o valor de n indica que a adsorção é favorável ($1 < n < 10$).

A constante K_F indica a capacidade de adsorção do adsorvente, e quanto maior for seu valor, maior será a capacidade de adsorção. Com isso, é possível comprovar a capacidade de adsorção do CAA ser muito maior do que do CAC.

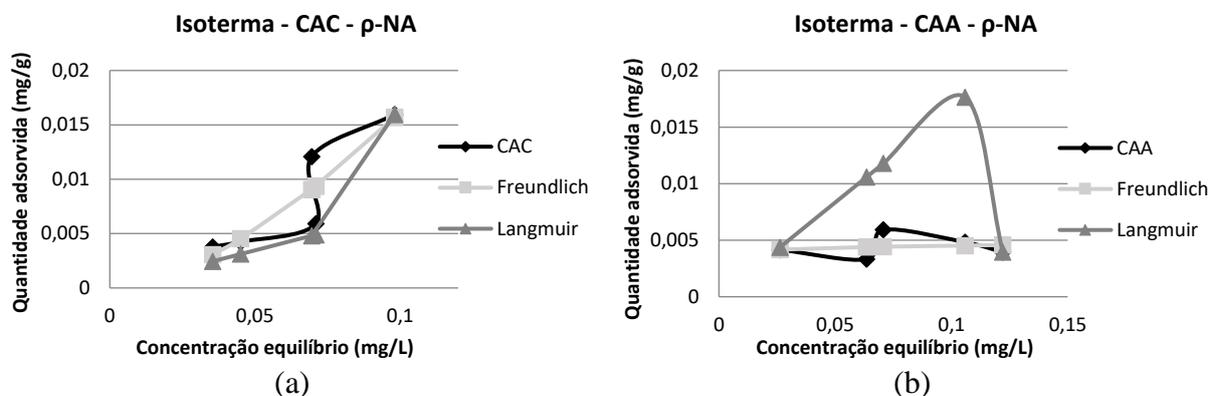


Figura 11- (a) Isotherma de adsorção - CAC - ρ -NA (b) Isotherma de adsorção - CAA - ρ -NA

Tabela 4 - Parâmetros calculados para isoterma de Langmuir e Freundlich.

	Langmuir		Freundlich	
	q_{max}	R_L	n	K_F
CAC	19418	1,00	0,63	2,76
CAA	19418	1,00	16,79	$5,18 \times 10^{-3}$

Já para isoterma da ρ -NA (Figura 11), foi observado a alta afinidade entre adsorvente e adsorvato, e possui alta adsorção no período inicial, atingindo o equilíbrio logo após. Dessa maneira, pode ser caracterizada pela isoterma de curva H-4. É possível reafirmar desta forma o que foi identificado nos ensaios de cinética, a alta afinidade entre a ρ -NA e o CAC, já que mesmo para uma baixa quantidade de carvão a taxa de remoção de ρ -NA foi alta sendo de 73%, um valor mais favorável quando comparado com a taxa de remoção de carga orgânica com valor igual a 38%.

Assim como a curva do CAC, a curva do CAA é representada pela isoterma de curva H-4, apresentando alta afinidade entre adsorvente e adsorvato. Embora o CAA apresente uma boa afinidade com ambos os componentes estudados neste trabalho, é visto que a ρ -NA, embora ligeiramente, possui uma afinidade maior com o carvão do que a carga orgânica, e desta maneira a taxa de remoção deste componente foi maior, sendo igual a 80%, enquanto a taxa de remoção da carga orgânica foi de 78%.

Para a ρ -NA temos ambos os carvões representados pelo parâmetro linear ($R_L = 1$), porém, o parâmetro n para o CAC apresentou maior afinidade com o solvente, enquanto o

CAA apresenta um alto valor de n , indicando que a interação entre adsorvente e adsorvato é forte. Já pela constante K_F vê-se que a capacidade de adsorção do CAC é maior do que do CAA.

Coloração final do efluente

As Figuras de 12 a 15 representam a coloração final do efluente tratado em cada ensaio, apresentando de forma visual a diminuição entre a coloração da amostra inicial e as variações de tempo e massa estudadas neste trabalho.



Figura 12 - Coloração ensaio cinética CAC - Da esquerda para direita: amostra padrão e 5 minutos até 60 minutos.



Figura 13 - Coloração ensaio cinética CAA - Da esquerda para direita: amostra padrão e 5 minutos até 60 minutos.



Figura 14 - Coloração ensaio isoterma CAC - Da esquerda para direita: amostra padrão e 0,2 gramas até 2,5 gramas.



Figura 15 - Coloração ensaio isoterma CAA - Da esquerda para direita: amostra padrão e 0,2 gramas até 2,5 gramas.

Rota de descarte

Para obtenção da matéria prima do bagaço da cana-de-açúcar, parcerias com pequenos produtores que não possuem condições de gerar fonte de energia ou fertilizantes a partir dos resíduos, devem ser realizadas. Assim é possível obter esta matéria prima por um custo mais baixo e sendo lucrativa para ambas as partes. Além disso, o carvão ativado alternativo é biologicamente mais adequado quando comparado o carvão ativado comercial. Pelo fato do carvão comercial ser de origem mineral, não é possível ser levado a um processo de

incineração, ao contrário do carvão alternativo, que é de fonte orgânica e assim a incineração é uma rota de descarte mais sustentável e barata.

Conclusão

O presente trabalho realizou o estudo do teste de remoção de carga orgânica e ρ -NA de um efluente industrial, utilizando o carvão ativado comercial e o carvão alternativo que foi sintetizado a partir do bagaço da cana-de-açúcar.

Para implementação do projeto com eficácia, mais estudos devem ser aprofundados sobre condições operacionais, tais como: pH, temperatura, agitação, concentração e tempo de contato, a fim de encontrar condições de operações que permitem o favorecimento do aumento da eficiência de remoção de ambos os compostos. Estudos sobre a produção do carvão também devem ser aprofundados, como a melhoria na obtenção da granulometria e morfologia do carvão, com o objetivo de aumentar a área de contato, promovendo um maior favorecimento da capacidade de adsorção do carvão por unidade de massa.

Os testes de cinética mostraram que o CAC apresenta maior afinidade com a ρ -NA do que com a carga orgânica, sendo esta dessorvida ao longo do tempo. O mesmo ocorre para o CAA, embora de maneira mais sutil, a carga orgânica também é dessorvida ao longo do tempo, enquanto a ρ -NA é adsorvida. Os resultados obtidos na isoterma de CAC apresentam que ocorre uma baixa interação entre carvão e carga orgânica, o que é confirmado pelos parâmetros R_L e n . Já para o CAA, uma maior afinidade foi constatada, porém, observa-se que ocorre a diminuição da disponibilidade dos sítios ativos pela ocupação da ρ -NA nos mesmos. Os resultados obtidos pela isoterma de ρ -NA para o CAC demonstrou uma alta afinidade entre adsorvente e adsorvato, assim como o CAA.

Sendo assim, foi determinado, após todos os ensaios apresentados neste trabalho, que o carvão alternativo ativado com H_3PO_4 , desenvolvido para esse estudo apresenta um grande potencial para uso como adsorvente na remoção de ambos os componentes, com taxas de remoção igual a 78% de carga orgânica e 80% de ρ -NA em condições de operação de 05 minutos e 2,5 gramas de adsorvente.

O carvão alternativo é biologicamente mais adequado para aplicação no processo, por ser de fonte orgânica apresenta uma melhor rota de descarte, podendo ser levado a um processo de incineração ao contrário do carvão comercial que é oriundo de matéria mineral sendo mais difícil e mais caro o destino da residual sólido. Desta maneira, as perspectivas futuras deste trabalho são o estudo da viabilidade econômica na produção deste carvão, sua implantação em um tanque de adsorção no tratamento de efluentes da indústria estudada, a aplicação de processos de retro lavagem desse carvão, com a finalidade de explorar a reutilização do mesmo em mais de um processo de batelada, tendo a mesma eficiência de remoção por adsorção em sucessivas bateladas.

Agradecimentos À professora e orientadora Dra. Monica Felipe, pelo suporte, ensinamento e dedicação a nos ajudar nesta etapa tão importante; aos técnicos do laboratório de química da Universidade São Francisco: Cláudio Negretti, Everaldo Garbin, João Bernardo e Juliana Fuzaro, por todo auxílio e disponibilidade oferecida para realização deste trabalho; a todo corpo docente, responsáveis por nos tornarmos Engenheiros.

Referências Bibliográficas

APHA (1998). *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 20th ed. Washington.

ARAÚJO, P. C. C.; GONÇALVES JÚNIOR, D. R.; CARDOZO-FILHO, L.; MARQUES, J. J.; SANTOS, E. J. 2018. **Uso de carvão ativado na remoção de CO₂**. Scientia Plena, Sergipe, v. 14, n. 5.

BACILA, D. M. 2019. **Efeito dos tratamentos térmicos convencionais no resíduo da nicarbazina e monitoramento do seu produto de degradação na carne de frango**. Orientadora: Profa. Dra. Luciana Igarashi Mafra. Tese de Doutorado, Engenharia de Alimentos, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.

COSTA, P. D. D.; FURMANSKI, L. M.; DOMINGUINI, L. 2015. **Produção, caracterização e aplicação de carvão ativado de casca de nozes para adsorção de azul de metileno**. Revista Virtual de Química, v. 7, n. 4, p. 1272-1285. ISSN 1984-6835.

da SILVA, J.E.; RODRIGUES, F. I.L.; PACÍFICO, S. N.; SANTIAGO, L. F.; MUNIZ, C. R.; SARAIVA, G. D.; NASCIMENTO, R. F.; SOUSA NETO, V. O. 2018. **Estudo de Cinética e Equilíbrio de Adsorção Empregando a Casca do Coco Modificada Quimicamente para a Remoção de Pb(II) de Banho Sintético**. Revista Virtual de Química, v. 10, n. 5, *no prelo*. ISSN 1984-6835.

FISCHER-FILHO, J. A. 2018. **Resposta De Cultivares De Cana-De-Açúcar A Lâminas De Irrigação Via Gotejamento Subsuperficial**. Orientador: Prof. Dr. José Renato Zanini. Tese de Doutorado, Agronomia, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, Brasil.

KEHL, C. C. P. L. 2015. **Remoção de nitrogênio amoniacal por adsorção em carvão ativado**. Orientador: Mariliz Guterres. Trabalho de Diplomação em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

LUNAGARIYA, J.; DHAR, A.; VEKARIYA, R. L. 2017. *Efficient esterification of: N - butanol with acetic acid catalyzed by the Brönsted acidic ionic liquids: Influence of acidity*. RSC Adv.. 7. 5412-5420. 10.1039/C6RA26722J.

NASCIMENTO, R. F. D.; LIMA, A. C. A.; VIDAL, C. B.; MELO, D. Q.; RAULINO, G. S. C. 2014. **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. Fortaleza: Imprensa Universitária da Universidade Federal do Ceará (UFC). ISBN 978-85-7485-186-0.

PAZ, J. E. D. M.; GARNICA, A. I. C.; CURBELO, F. D. D. S. 2018. **Estudo da adsorção de chumbo utilizando como adsorvente bagaço de cana de açúcar ativado**. HOLOS, v. 8, p. 3-18, 19 Dezembro 2018. ISSN 1807-1600. Acesso em: 23 abril 2021. Disponível em: doi:<https://doi.org/10.15628/holos.2018.7544>.

SCHLUSAZ, M. 2014. **Avaliação da eficiência da estação de tratamento de efluentes (ETE – ronda, ponta grossa – PR) através da análise de parâmetros físico-químicos**. Orientador: Prof. Dr. Ciro Maurício Zimmermann. Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharel em Engenharia Química. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Brasil.

SILVA, J. C. D. 2010. **Desenvolvimento de processo integrado utilizando processos de separação por membrana e adsorção em carvão ativado para o tratamento de água associada à produção de petróleo**. Orientador: Cristiano Piacsek Borges. Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

SOARES, L. A. 2014. **Síntese, ativação e caracterização de carvão obtido a partir do bagaço de cana-de-açúcar e avaliação da capacidade de adsorção**. Orientadora: Prof^a. Dr^a. Márcia Maria Lima Duarte. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do

Norte, Natal, Brasil.

TADINI, C. C.; TELIS, V. R. N.; MEIRELLES, A. J. A.; PESSOA-FILHO; P. A. 2019.
Operações unitárias na indústria de alimentos. 1ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 2. ISBN
978-85-216-3267-2