

ADSORÇÃO DE PARACETAMOL EM SOLUÇÃO AQUOSA EM CARVÃO ATIVADO: ESTUDO TERMODINÂMICO

Camila Rodrigues Pessoa¹, Francisco Wilton Miranda da Silva²
1-Autor; 2-Orientador.

Resumo: A presença de compostos emergentes como os fármacos em água gera uma grande preocupação ambiental visto que sua interação com o sistema endócrino dos animais causa efeitos, além de desenvolver bactérias resistentes que podem afetar tanto a vida marinha quanto a dos seres humanos. O paracetamol é um dos fármacos analgésicos mais antigos e de uso mais difundido no mundo. Com isso, neste trabalho, uma amostra de carvão ativado (CA) comercial foi analisada como adsorvente no processo de adsorção para remoção do paracetamol em solução aquosa. Inicialmente, foram determinadas, por experimento, as isotermas em quatro temperaturas distintas. O modelo de Langmuir ajustou-se bem às isotermas experimentais, apresentando coeficiente de correlação de 0,98 para todas as isotermas. Em seguida, a partir da constante do modelo de Langmuir (K_L) e a equação de Van't Hoff, foram obtidos os parâmetros termodinâmicos. Foi observado que as variações da energia livre de Gibbs padrão (ΔG°) foram próximas em cada temperatura, com valores de -25,86, -26,61, -27,31 e -28,11 kJ/mol para 30, 40, 50 e 60 °C, respectivamente, e, portanto, de natureza espontânea para qualquer temperatura, já que são valores negativos. O processo de adsorção apresentado foi de caráter exotérmico com $\Delta H^\circ = -3,15$ kJ/mol. Os resultados mostraram que o processo de adsorção de paracetamol sobre o carvão ativado é espontâneo e exotérmico e que a temperatura pouco influencia na capacidade de adsorção do adsorvente estudado.

Palavras-chave: Adsorção; Paracetamol; Termodinâmica; Entalpia; Carvão Ativado.

1. INTRODUÇÃO

O consumo intenso de fármacos tem crescido gradativamente, decorrente da evolução da medicina e o crescimento industrial [1]. Com isso, impactos ambientais negativos originados do descaso antropogênico, com o descarte de resíduos, por exemplo, afetam tanto o ecossistema quanto a saúde e a qualidade de vida dos seres humanos como, toxicidade aquática e desenvolvimento de resistência em bactérias patogênicas [2].

Mesmo que em pequenas quantidades - por isso, denominados micropoluentes - os fármacos são detectados nos corpos d'água superficiais, efluentes de estações de tratamento de esgoto e água, entre outros, tendo o potencial de causar significativos efeitos adversos, pois alteram a qualidade da água, que sequentemente será levada ao abastecimento de água potável. Além disso, possuem pequena biodegradabilidade no meio ambiente, o que contribui para aumentar a prevalência ambiental desses contaminantes e o impacto sobre os organismos aquáticos e terrestres [1].

A presença dos fármacos demonstra que os processos convencionais de tratamentos de águas são ineficientes para remoção desses micropoluentes, precisando utilizar técnicas avançadas adicionais de tratamento. Vários estudos sobre essas técnicas têm mostrado eficiência na remoção dos fármacos, incluindo a tecnologia de biorreatores com membranas, processos oxidativos avançados e adsorção em carvão ativado. Este último pode eliminar vários compostos farmacêuticos poluentes, uma vez que a existência de anéis benzênicos ou grupos amida na sua estrutura possibilita serem adsorvidos por carvões ativados, devido à sua combinação única de uma rede porosa altamente desenvolvida [2].

Dentre os microcontaminantes encontrados em recursos hídricos merece atenção o paracetamol. Por ser um medicamento analgésico e antipirético, é muito utilizado para combater febre e dores leves e moderadas. Ademais, por ser vendido sem prescrição médica, torna-se um dos fármacos mais consumidos e liberados no meio ambiente [3]. Vários estudos reportam a adsorção de paracetamol em carvão ativado como promissora [2,3,4]. No entanto, poucos trabalhos refletem sobre a determinação de parâmetros termodinâmicos.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo avaliar a adsorção de paracetamol em uma amostra de carvão ativado comercial. Para isso, será determinada a isoterma de adsorção e os parâmetros termodinâmicos da adsorção de fenol, como forma de avaliar a performance do carvão como material para a separação de paracetamol de soluções aquosas.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Fundamentação Teórica

2.1.1. Fármacos e o Paracetamol

Os fármacos como micropoluentes têm causado impactos negativos ao meio ambiente, mesmo em concentrações de traços, variando de microgramas a nanogramas por litro [3]. Ao longo do tempo tem sido intensificado a presença desses compostos nas águas e solos devido ao descarte indevido de medicamentos vencidos, da excreção de metabólitos que não são eliminados no processo de tratamento de esgotos, do uso em indústrias, escoamento de águas agrícolas e pecuárias, aterros sanitários, fossas sépticas e atividade doméstica. Esses contaminantes na água têm o potencial de causar significativos efeitos adversos no ecossistema, pois induzem a formação de mutações que resultam na resistência de antibióticos em bactérias, causam toxicidade aguda e crônica, bioconcentração em cadeias alimentares e efeitos endócrinos [5].

Muller (2002) reporta os limites toxicológicos para alguns medicamentos, com base em 10% da dose máxima diária aceitável, considerando 60 kg como peso médio de uma pessoa [6]. Dessa forma, foram estabelecidos os seguintes limites de quantificação para fármacos em água potável conforme a Tabela 1 [7].

Tabela 1. Limites de quantificação para fármacos em água potável [7].

Fármacos	Quantidade em água potável ($\mu\text{g.L}^{-1}$)
Paracetamol	150
Diclofenaco	7,5
Eritromicina	15
Ácido Acetilsalicílico	25
Ibuprofeno	150

O paracetamol ganha destaque nesta discussão, por ser um medicamento altamente vendido e de fácil acesso, seu uso vem sendo crescente em todo o Brasil, muitas vezes em excesso pela população. Com isso, esse fármaco é bastante descartado no meio ambiente, o que pode acarretar, em longo prazo, problemas mais graves ao ecossistema e aos seres humanos, até mesmo diminuir os limites toxicológicos permitidos devido ao aumento da resistência das bactérias a esse analgésico/antipirético. Além disso, possibilita uma maior detecção em corpos hídricos e efluentes, como mostra a Tabela 02, que tem como comparativo outros compostos.

Tabela 2. Concentrações médias de Paracetamol encontrados em efluentes de estações de tratamento de esgotos [Adaptado de Ferreira (2015) [4]].

Fármacos	Concentração Média (conc. máxima) dados em ng L^{-1}	Local
Paracetamol	59.000	Brasil
	>20	Reino Unido
	990 (11400)	Espanha
	254,8 (481,6) (Inverno)	Coréia
	130	Brasil
	18,8	Itália
	23.184,8 (48.878,0) Primavera	Portugal
	28.685,3 (66.700,0) Verão	Portugal

Os resíduos de medicamentos são encaminhados com o esgoto bruto para as estações de tratamento de esgoto (ETE), onde são, na maioria dos casos, submetidos a processos convencionais de tratamento. Contudo, esses processos são baseados na degradação biológica dos contaminantes, não sendo eficientes na remoção de fármacos residuais por possuírem ação biocida ou estruturas químicas complexas não passíveis de biodegradação.

Vários processos podem ser incluídos na remoção de fármacos, tais como fitotratamento, coagulação,

radiação gama, osmose reversa. No entanto, estes processos não são amplamente utilizados devido aos custos de implantação e operação de tais sistemas.

Consequentemente, existe a necessidade crescente de processos alternativos no tratamento de águas residuárias para remoção de fármacos que podem ser úteis como etapas de pré ou pós-tratamento do processo final, tal como a adsorção em carvão ativado, devido seu baixo custo e ter mostrado eficiência no processo.

Em Snyder *et al.* (2007), é reportado que tanto o carvão ativado em pó quanto o carvão ativado granular são capazes de remover produtos farmacêuticos com eficiências de até 90% em estações de tratamento de água de abastecimento [8].

2.1.2. Adsorção

A adsorção consiste num processo de transferência de massa, que envolve a interface sólido-líquido e sólido-gás [9]. Estuda a habilidade de concentrar determinadas substâncias, existentes em fluidos líquidos ou gasosos (adsorvatos), utilizando uma substância sólida (adsorvente) para reter componentes do fluido em sua superfície externa. É um fenômeno superficial complexo, no qual os poluentes interagem com os sítios ativos da superfície do material adsorvente, ocorrendo à retenção dos íons metálicos ou ligantes orgânicos no adsorvente, por meio de adsorção física ou química [10].

O processo de adsorção física, comumente chamado de fisissorção, ocorre quando o adsorvato é retido na superfície do material adsorvente através de interações eletrostáticas fracas. Pela adsorção química, chamada de quimissorção é um processo de adsorção que envolve uma forte ligação entre o adsorvente e o adsorvato, através do compartilhamento ou transferência de elétrons, formando uma monocamada [10].

A adsorção é considerada uma técnica promissora, principalmente devido à possibilidade de se utilizar diversos tipos de materiais naturais como adsorventes. Além disso, é um método eficaz e econômico, com capacidade de remover poluentes com concentrações abaixo de 100 mg. L⁻¹ e com alta eficiência [9].

2.1.3. Isoterma de Adsorção

A determinação do equilíbrio de adsorção é essencial para obtenção de informações relevantes sobre projeto e análise de um processo de separação por adsorção [10]. Por sua vez, as isotermas são diagramas de equilíbrio que mostram a concentração de equilíbrio de um adsorvato no adsorvente com a pressão parcial (no caso de gases) ou concentração da fase líquida, em uma determinada temperatura fixa.

Os modelos de isotermas fornecem informações implícitas importantes para o processo de adsorção, tais como: tipo de interação que pode ocorrer no processo de adsorção, a qualidade do adsorvente, que pode ser indicada pela capacidade máxima de adsorção em diferentes condições experimentais de adsorção, as características energéticas e de afinidade dos adsorventes pelo adsorvato

Os diversos modelos de isotermas encontrados na literatura se baseiam em estados de equilíbrios dinâmicos, tais como Langmuir, Freundlich, Redlich-Peterson, Temkin e Dubinin Radushkevich. Dentre essas, podemos citar as duas mais utilizadas, Langmuir e Freundlich, devido fornecerem um parâmetro de capacidade máxima de adsorção, além de serem modelos simples e fácil interpretação [10].

2.1.4. Isoterma de Langmuir

Inicialmente, esse modelo foi desenvolvido para representar a adsorção gás-líquido, porém foi bem mais aproveitado na adsorção sólido-líquido. Esse modelo indica que na superfície do material adsorvente há um número definido de sítios ativos dispostos de forma homogênea, ocasionando adsorção em monocamadas. Dessa forma, não ocorre interações entre as moléculas adsorvidas no sólido com as moléculas presentes na fase líquida, além da energia de adsorção se manter constante [10].

A expressão da isoterma de Langmuir é representada a seguir pela Equação 1:

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

Onde,

q_{ads} = quantidade de soluto adsorvido por grama de adsorvente no equilíbrio (mg/g);

q_{max} = capacidade máxima de adsorção (mg/g);

K_L = constante de interação adsorvato/adsorvente (L/mg);

C_e = concentração do adsorvato no equilíbrio (mg/L).

2.1.5. Variáveis que influenciam na adsorção em fase líquida

São vários os fatores que influenciam o processo de adsorção, tais como área superficial, as propriedades do adsorvente e do adsorvato (natureza e condições operacionais), temperatura, pH do meio, entre outros.

A natureza do adsorvente inclui: tamanho do poro, densidade, grupos funcionais presentes na superfície e hidrofobicidade do material. Por outro lado, a natureza do adsorvato depende da polaridade, do tamanho da molécula, da solubilidade e da acidez ou basicidade. As condições operacionais incluem, principalmente, temperatura, pH e natureza do solvente [10].

2.1.6. Termodinâmica de Adsorção

Os parâmetros termodinâmicos de adsorção podem ser obtidos a partir das isotermas de equilíbrio em diferentes temperaturas, tais como, energia livre de Gibbs padrão (ΔG°), entalpia padrão (ΔH°) e entropia padrão (ΔS°). A energia envolvida define a espontaneidade e a natureza do processo de adsorção [9].

A espontaneidade no processo de adsorção é relacionada a variação da energia livre de Gibbs padrão a uma determinada temperatura. Quando $\Delta G^\circ < 0$, o processo é considerado espontâneo, pois ocorre uma liberação de energia, o que favorece a formação de produtos. Já quando $\Delta G^\circ > 0$, o processo é não espontâneo, precisando de aplicações de ações externas. A variação de entalpia determina se o processo de adsorção há uma absorção ou liberação de calor. Quando $\Delta H^\circ < 0$, indica que há uma liberação de calor, dessa forma, o processo de adsorção é exotérmico. Já quando $\Delta H^\circ > 0$, ocorre uma absorção de calor, e, por isso, o processo é endotérmico [9].

A variação da energia livre de Gibbs (ΔG°) pode ser calculada a partir da Equação 2, após a determinação da constante de equilíbrio pela Equação 3.

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_{eq} \quad (2)$$

$$K_{eq} = \frac{K_L \times MM \times C^\circ}{\lambda^\circ} \quad (3)$$

Onde,

K_L = constante de interação adsorvato/adsorvente do modelo de Langmuir (L/g)

MM = massa molar do paracetamol (g/mol)

C° = concentração molar padrão 1 mol/L

λ° = coeficiente de atividade padrão

R = constante dos gases (J/mol. K);

T = temperatura (K);

K_{eq} = constante de equilíbrio termodinâmico;

Com o conhecimento do valor da constante de equilíbrio de adsorção obtida para diferentes temperaturas é possível construir o gráfico de $\ln(K_{eq})$ versus $1/T$, obtendo-se através da linearização, os valores de ΔH° e ΔS° , identificados pela inclinação e interceptação da reta, respectivamente, conforme a Equação 4. Por sua vez, o valor de ΔG° foi calculado a partir da Equação 5.

$$\ln K_{eq} = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{RT} \quad (4)$$

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (5)$$

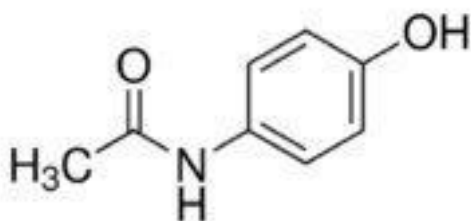
Os valores de ΔG° obtidos a partir da Equação 5 indicam como é controlado o processo de adsorção. Quando os valores negativos de ΔG° são obtidos a partir do valor de $\Delta H^\circ > T\Delta S^\circ$, o processo é controlado pela entalpia e quando $T\Delta S^\circ$ contribui mais que ΔH° , a adsorção é controlada pela entropia.

A variação de entropia (ΔS°) indica mudanças na organização estrutural e energética do sistema durante o processo de adsorção. Quando $\Delta S^\circ < 0$ significa uma diminuição da aleatoriedade na superfície do adsorvente, já quando o $\Delta S^\circ > 0$ indica que ocorre mudanças na estrutura adsorvato-adsorvente, devido ao aumento da aleatoriedade na interface sólido-líquido durante o processo de adsorção.

2.1.7. Materiais

Na realização dos experimentos, foi utilizado como adsorvente uma amostra de carvão ativado comercial (CAC) WV1050, produzida pela empresa Mead-Westvaco (EUA), como mostra a figura 2. O adsorvato utilizado foi o paracetamol sob forma pulverizada com pureza nominal de 100%, produzido pela Salutaris Farmácia. A figura 1 mostra a fórmula estrutural do paracetamol, onde apresenta grupos funcionais, tais como a amida e a hidroxila ligada ao anel benzeno (álcool), o que facilita o processo de adsorção devido aos íons livres.

Figura 1. Fórmula estrutural do paracetamol.



Fonte: Rheinheimer (2016).

Figura 2. Carvão ativado WV1050 (autoria própria).



3. METODOLOGIA

A metodologia empregada consistiu basicamente em três etapas: determinação experimental de isothermas em diferentes temperaturas, determinação dos parâmetros do modelo de Langmuir e estimação dos parâmetros termodinâmicos. A seguir é descrita a metodologia empregada.

3.1. Isoterma de Adsorção

Para a determinação das isothermas de adsorção, empregou-se a metodologia experimental descrita em Conrado (2019) [3]. Dados preliminares, como pH de solução e tempo de equilíbrio foram retirados de seu trabalho. Cada ponto da isoterma foi feito em duplicata. Previamente no experimento, o carvão foi ativado a 120 °C durante 3 horas

Para esse experimento, soluções de paracetamol foram preparadas em água deionizada ajustada em pH 2 (pH ideal) em diferentes concentrações (5, 10, 20, 30, 40, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200 mg/L). Após esse procedimento foram pesadas amostras de 0,01g do adsorvente (CA) para serem postas em contato com as soluções em erlenmeyer de 125ml. Logo as amostras foram colocadas sob agitação de 160 (rpm) por 12 horas. As concentrações foram medidas em espectrofotômetro UV-VIS, com comprimento de onda de 243 nm. Foram realizadas medições de isothermas em quatro temperaturas: 30, 40, 50 e 60 °C.

Para cada etapa do experimento foram calculadas as quantidades de paracetamol adsorvido a partir da equação 6 e realizados ajustes a partir do modelo de Langmuir utilizando a equação 1. Para mais detalhes acerca da metodologia deve-se consultar o trabalho de Conrado (2019) [3].

A quantidade de paracetamol removida em função da concentração foi calculada pela equação 6.

$$q_{ads} = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (6)$$

Onde,

q_{ads} = quantidade adsorvida de paracetamol por unidade de massa de carbono ativado (mg/g);

C_0 = concentração da solução inicial de paracetamol (mg/L);

C_e = concentração da solução de paracetamol no equilíbrio (mg/L);

V = volume da solução de paracetamol utilizada no experimento (L);

m = massa da amostra de carbono ativado utilizado (g).

3.2. Determinação dos parâmetros termodinâmicos

Os parâmetros termodinâmicos foram estimados a partir das isothermas ajustadas pelo modelo de Langmuir. Foram estimados os seguintes parâmetros: a variação da energia livre de Gibbs padrão (ΔG°), a variação de entropia padrão (ΔS°) e a variação de entalpia padrão (ΔH°), que corresponde a entalpia de adsorção. Dessa forma, utilizando das equações 2,3,4 e 5 foi possível determinar esses valores e definir características, como a espontaneidade, se ocorreu liberação ou absorção de calor, o grau de desordem no sistema. Com isso, a avaliação dos parâmetros termodinâmicos envolvidos é de extrema importância, pois delineiam a viabilidade do processo [11].

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Isotermas de Adsorção de Paracetamol

O Gráfico 1 mostra as isotermas de adsorção de paracetamol medidas a 30, 40, 50 e 60 °C no carvão ativado comercial WV1050. As isotermas seguiram um padrão em que obteve-se quantidades adsorvidas semelhantes nas temperaturas distintas em todo o intervalo de concentração de equilíbrio estudado. Este comportamento demonstra que a temperatura tem pouca influência sobre a capacidade de adsorção.

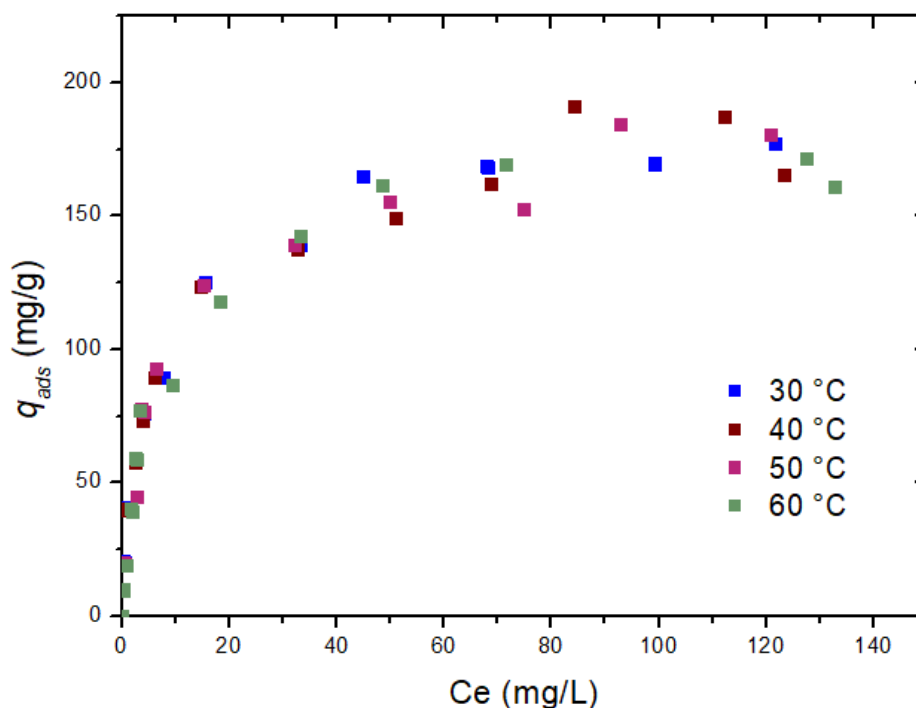


Gráfico 1. Isotermas de adsorção de Paracetamol em carvão WV1050 em diferentes temperaturas. (Autoria própria)

As isotermas foram ajustadas pelo modelo de Langmuir (Equação 1), obtendo altos valores de coeficiente de correlação ($R^2 > 0,97$) para todas as temperaturas. Dessa forma, obteve-se a constante de interação adsorvato/adsorvente (K_L) e a capacidade máxima adsorvida (q_{max}), como mostrado na Tabela 3.

Tabela 3. Dados obtidos dos ajustes das isotermas por Langmuir (autoria própria).

Temperaturas (°C)	K_L	q_{max} (mg/g)	R^2
30	0,18852	177,58077	0,98032
40	0,18634	178,76352	0,97386
50	0,1759	177,93617	0,97895
60	0,16941	173,30553	0,97996

As constantes de equilíbrio de Langmuir apresentam um padrão. Percebe-se que à medida que a temperatura aumenta, diminui a interação entre o adsorvato e adsorvente. Pode-se observar que em 30 °C com $K_L = 0,18852$ e em 40 °C como $K_L = 0,18634$, há alteração apenas na terceira casa decimal. Por sua vez, a 50 °C com $K_L = 0,1759$ e em 60 °C com $K_L = 0,1694$, tem-se uma redução da constante de interação na segunda casa decimal.

Dessa forma, observa-se que a constante de equilíbrio de Langmuir possui variações mínimas, o que implica que a temperatura pouco influencia no processo de adsorção, já que K_L é diretamente proporcional à capacidade máxima de adsorção, o que corrobora com os resultados mostrados previamente no Gráfico 1.

4.2. Estudo Termodinâmico

A partir das isotermas ajustadas, foi possível determinar os parâmetros termodinâmicos e realizar o estudo em relação aos valores das variações padrões da energia de Gibbs (ΔG°), da entalpia (ΔH°) e da entropia (ΔS°). Os valores de K_L foram usados para estimar os parâmetros a partir da inclinação e da interceptação da curva de $\ln(K_{eq}) \times 1/T$, conforme mostrado no Gráfico 2. Previamente, a constante de equilíbrio (K_{eq}) para cada temperatura foi obtida através da Equação 3.

Tabela 4. Dados usados no cálculo da constante de equilíbrio. (Autoria própria)

MM Paracetamol (g/mol) =	151,17
$\lambda^\circ =$	1
$C^\circ =$	1

Tabela 5. Dados calculados da K_{eq} para construção do Gráfico 2. (Autoria própria).

Isoterma ($^\circ\text{C}$)	$1/T$ (K^{-1})	K_{eq}	$\ln(K_{eq})$
30	0,0033	28498,5684	10,25761
40	0,00319	28169,0178	10,24598
50	0,00309	26590,803	10,18832
60	0,003	25609,7097	10,15073

Pode ser observado que à medida que a constante de equilíbrio aumenta, o inverso da temperatura cresce diretamente proporcional.

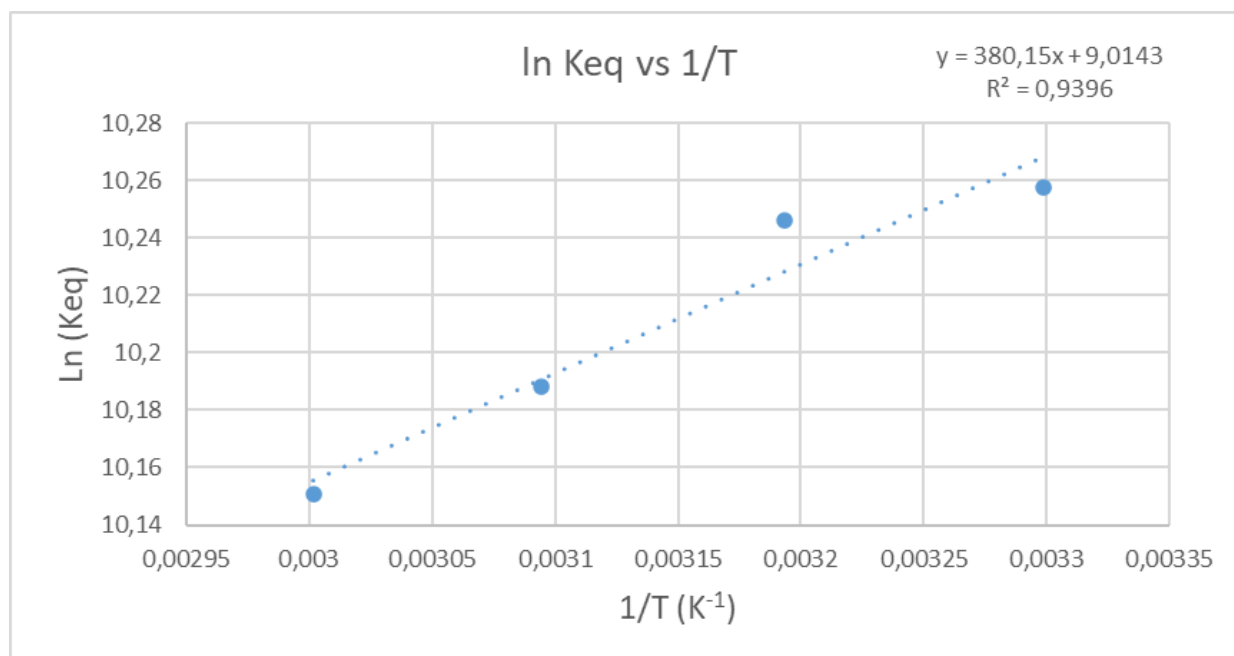


Gráfico 2. Intercepção da curva de $\ln(K_{eq}) \times 1/T$. (Autoria própria)

Dessa forma, os dados foram ajustados por um ajuste linear, mostrando um bom coeficiente de correlação ($\sim 0,94$), em que,

$a = 380,15$ e $b = 9,0143$ (coeficientes da equação do 1º grau obtida pelo ajuste).

Dessa forma, com a construção do gráfico e a obtenção dos coeficientes pela equação, foi calculado a

variação de entropia padrão (ΔS°), a variação de entalpia padrão (ΔH°), a partir das equações a seguir. Para a variação da energia livre de Gibbs padrão (ΔG°) foi utilizada a equação 2 em cada temperatura. Posteriormente, é apresentada as tabelas com todos valores, ver Tabela 6.

$$\Delta H^\circ = - \frac{a \times R}{1000} \quad (7)$$

$$\Delta S^\circ = \frac{b \times R}{1000} \quad (8)$$

Com $R = 8,314 \text{ J/mol. K}$

Tabela 6. Parâmetros termodinâmicos para o processo de adsorção (autoria própria).

T (K)	ΔG° (kJ/mol)
30	-25,86766
40	-26,61675
50	-27,36584
60	-28,11492
ΔH° (kJ/mol) = -3,15905	
ΔS° (kJ/ mol. K) = 0,07491	
$R^2 = 0,93959$	

Mediante resultados, os parâmetros termodinâmicos foram estimados para avaliar a viabilidade e natureza do processo de adsorção. Os valores negativos de ΔG° indicam que o processo de adsorção é de natureza espontânea. Além disso, seus valores se tornam mais negativos com aumento da temperatura, o que significa que a capacidade de adsorção é favorecida pelo aumento da temperatura, mas não tão relevante, já que essas diferenças são consideradas baixas.

O valor negativo obtido para ΔH° revela que a interação no processo de adsorção foi de natureza exotérmica, ou seja, o processo libera calor/energia, o que pode ser explicado pela distância entre a superfície do sólido e a substância adsorvida serem muito próximas na adsorção química, associada à formação de interações, neste caso, com o solvente. Posteriormente, o valor positivo de ΔS° mostra que houve um aumento na aleatoriedade na interface sólido-solução no processo de adsorção. Este aumento na desordem pode ser atribuído à entropia translacional extra adquirida pelas moléculas de água, que estavam previamente adsorvidas ou localizadas nas multicamadas ao redor da superfície.

Um ponto a destacar é o fato de que cada sítio de adsorção pode ter características próprias e, portanto, diferentes propriedades adsorptivas, já que raramente se tem uma superfície de sítios homogêneos. Como o próprio valor de K_L nessa metodologia é obtido por linearização dos dados da isoterma, isso mostra que tanto ΔG° como ΔH° e ΔS° não são exatamente as verdadeiras funções termodinâmicas no processo de adsorção, seriam valores médios.

5. CONCLUSÕES

O processo de adsorção em carvão ativado foi investigado para evidenciar sua eficácia na remoção do paracetamol em solução aquosa. Os resultados mostraram que o adsorvente tem potencial de adsorção com capacidades máximas de adsorção de até 178,7 mg de paracetamol/g de carvão para o intervalo de concentração estudado. A partir das isotermas medidas, verificou-se que, para o intervalo avaliado (30 a 60 °C), a temperatura tem pouca influência sobre a quantidade adsorvida. O modelo de Langmuir se ajustou bem a todas as isotermas, apresentando coeficiente de correlação em torno de 0,98. Avaliando a termodinâmica, conclui-se que o processo aconteceu de forma espontânea, de natureza exotérmica e com aumento da aleatoriedade na interface sólido-líquido.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LIMA, D.R.S. *et al.*, Pharmaceuticals and endocrine disrupting compounds in Brazilian waters: occurrence and removal techniques. Ouro Preto (MG): UFOP, 2017. Eng Sanit Ambient. 1-12 p. v.22 n.6
- [2] TAMBOSI, J.L. Remoção de fármacos e avaliação de seus produtos de degradação através de tecnologias avançadas de tratamento. Florianópolis(SC): UFSC, 2008. 74-110 p.
- [3] CONRADO, N.M. Remoção de paracetamol de solução aquosa em carbono ativado. Mossoró-Rn: UFERSA, 2019. 1-11 p.
- [4] FERREIRA, R.C. Mecanismo de adsorção de paracetamol em carvões nacionais. Maringá-PR: UTFPR, 2015. 44-110 p.
- [5] NAVES, J.T.R; BARBOSA, D.S; LACERDA, C.A. Emerging micropollutants of pharmaceutical origin in surface waters in BRICS: a review. Rondonópolis-MG: Research, Society and Development, 2022. 1-12 p. v. 11.
- [6] Muller, J. J. A. Toxicological limits of medicines in drinking-water. RIVM Rapport . 2002.
- [7] BOGER, B., et al. Pharmaceutical micropollutants in brazilian aqueous samples: A systematic review. *Ciência e Natura*, v. 37, n.4, p. 725-739, 2015.
- [8] SNYDER, S., et al. Role of membranes and activated carbon in the removal of endocrine disruptors and pharmaceuticals. *Desalination*. v.202: p.156-181, 2007.
- [9] CARVALHO, S.C. Resíduos da indústria de beneficiamento de castanha de caju *Anarcadium occidentale* L. como adsorvente de cromo (VI) em solução aquosa. Mossoró-Rn. UFERSA, 2021. 33-35 p.
- [10] NASCIMENTO, R.F. *et al.* Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais. Fortaleza-CE: UFC, 2014. 73-86 p.
- [11] SILVA, F.N. Investigação da Seletividade e da Termodinâmica de Adsorção de Cr(VI) de Águas Residuárias por Nanoadsorventes Magnéticos do Tipo CoFe₂O₄-Fe₂O₃. Brasília-DF: FACULDADE UnB- PLANALTINA, 2018. 74-93 p.
- [12] SILVA, W.L.L., SIMONI, J.A. Thermodynamic study of the adsorption of copper (II) onto organic-modified montmorillonite. Campinas-SP: 1 Universidade de Campinas, Cid. Univ. “Zeferino Vaz”, 2018. 1-10 p.
- [13] RIVERA-UTRILLA, José et al. Pharmaceuticals as emerging contaminants and their removal from water. A review. *Chemosphere*, v. 93, n. 7, p. 1268-1287, 2013.