

Adsorção do corante Preto Reativo 5 em coluna de leito fixo utilizando lodo de esgoto sanitário (biocarvão) como adsorvente

Adsorption of Reactive Black 5 dye in a fixed bed column using sewage sludge (biochar) as adsorbent

RESUMO

Isabele Stresser Aleluia
aleluia@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Karina Querne de Carvalho
kaquerne@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Fernando Hermes Passig
fhpassig@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Daiane Cristina de Freitas
daianecris.freitas@gmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Samara Graciela de Faria
sfaria@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

A adsorção do corante Preto Reativo 5 (PR 5) em solução aquosa foi verificada em uma coluna de leito fixo preenchida com carvão à base de lodo de esgoto de uma estação de tratamento de esgotos, como adsorvente. Adsorventes foram preparados por tratamento térmico (pirólise, LP) e químico (funcionalização com HNO_3 , LF). Os ensaios de adsorção foram realizados na coluna preenchida com LP em pH 12 a 41 °C e com LF em pH 3,3 a 51 °C. Foi utilizado planejamento estatístico com modelo de delineamento composto central rotacional para otimizar a vazão afluyente, concentração do PR 5 e massa do adsorvente. Os dados experimentais foram ajustados aos modelos de Thomas e Yoon-Nelson. Os dados cinéticos foram bem ajustados em ambos os modelos cinéticos com R^2 igual e superior a 0,99 para LP e superior a 0,74 para LF. O processo demonstrou bom desempenho para os lodos na coluna de leito fixo. A adsorção foi favorecida para menores vazões, maiores massas de adsorvente e baixas concentrações. Assim, concluiu-se que o lodo de esgoto pode ser utilizado como adsorvente alternativa na remoção do PR 5.

PALAVRAS-CHAVE: : Adsorvente alternativo, Corante Reativo, Modelos de Thomas e Yoon-Nelson.

ABSTRACT

The adsorption of the Reactive Black 5 (PR 5) dye in aqueous solution was verified in a fixed bed column filled with coal-based on sewage sludge from a wastewater treatment plant, as an adsorbent. Adsorbents were prepared by thermal (pyrolysis, PS) and chemical (functionalization with HNO_3 , FS) treatment. The adsorption assays were performed on the column filled with LP at pH 12 to 41 °C and with LF at pH 3.3 to 51 °C. Statistical planning with a central rotational composite design model was used to optimize the effluent flow, RB 5 concentration, and adsorbent mass. The experimental data were fitted to Thomas and Yoon-Nelson models. Kinetic data were well adjusted in both kinetic models with R^2 equal to and above 0.99 for LP and above 0.74 for LF. The process showed a good performance for sludge in the fixed bed column. Adsorption was favored for lower flowrates, higher adsorbent masses, and lower concentrations. Thus, it was concluded that the sewage sludge could be used as an alternative adsorbent in the removal of RB 5.

KEYWORDS: Alternative adsorbent, Reactive dye, Thomas and Yoon-Nelson models.

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

Direito autorial: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a produção de lodo de atividades humanas aumentou significativamente devido à industrialização, urbanização e à necessidade de atendimento às normas legais de tratamento de esgotos sanitários, o que contribui para aumento da necessidade de transporte e descarte deste passivo ambiental. No Brasil, a geração desse resíduo é estimada em 150 a 220 milhões de toneladas por ano de massa seca (85% de teor de água), sendo que apenas 40% da população urbana tem acesso ao tratamento de esgotos, conforme estudo por Pedroza et al. (2010).

Os corantes são um dos principais constituintes de águas residuárias geradas em indústrias, principalmente nas têxteis, couro, tintas e plásticos. Os corantes reativos são moléculas coloridas usadas para tingir as fibras de celulose. Eles são caracterizados por ligações azo $-N=N-$. A cor destes corantes é devido à ligação azo e cromóforos associados. Os corantes são absorvidos pela celulose e então reagem com a fibra pela formação de uma ligação covalente entre a molécula do corante e a fibra, que é mais resistente às condições incomuns de uso do que a ligação físico-química entre outras classes de corantes e a celulose.

Os sistemas reativos destes corantes reagem com grupos hidroxila ionizados no substrato de celulose. No entanto, os íons hidroxila presentes no banho de tingimento devido às condições de tingimento alcalino competem com o substrato de celulose, resultando em uma porcentagem de tinturas hidrolisadas que não podem mais reagir com a fibra. Portanto, entre 10–50% (correspondendo a um grau de fixação entre 50–90%) da carga inicial de corante estará presente no efluente do banho de tingimento dando origem a um efluente altamente colorido. Conforme descrito por Guarantini e Zanoni (2000), os corantes azo podem ser decompostos em aminas aromáticas com potencial carcinogênico em condições aeróbias.

Diversas técnicas físicas, químicas e/ou biológicas têm sido aplicadas para tratar efluentes contendo corantes, incluindo eletrocoagulação (EL-ASHTOUKHY, 2010), biossorção (AKSU, 2000), reagente de Fenton (KUSVURAN, 2005), H_2O_2 /radiação UV (SZPYRKOWICZ, 2001), ozonização (TREVIZANI, 2018), separação por membrana (ROBINSON, 2001), lodo ativado (KHANDEGAR, 2013), reatores do tipo UASB (AMARAL, 2014) ou adsorção com carvão ativado (AL-DEGS, 2008). Alguns destes processos apresentam desvantagens tais como elevados custos de instalação e operação, demanda de área, possibilidade de entupimento, necessidade de substituição de estruturas, disposição de resíduos gerados, dentre outros, que dificultam sua implantação nas indústrias.

A adsorção é a combinação de forças físicas e químicas que agem no contato entre sólido e fluido, originando a transferência de massa do adsorvato (fase fluida) para o adsorvente (fase sólida), processo no qual a molécula fica retida na superfície. Este processo vem sendo utilizado no tratamento efluentes contendo corantes, devido ao baixo custo, fácil operação e eficiência de remoção elevada. Porém o carvão ativado comercial (CAC) comumente utilizado tem custos elevados de produção, aquisição e regeneração, o que dificulta seu uso em larga escala no tratamento destes efluentes.

A adsorção em coluna de leito fixo é uma das formas mais comuns e eficientes de tratamento de águas residuárias. É importante mencionar que

estudos de coluna em pequena escala, geralmente, fornecem estimativas para remoção de corantes de sistemas de tratamento em escala plena, conforme relatado por Mckay et al. (1990).

Diferentes modelos matemáticos são usados para descrever a dinâmica de adsorção em leito fixo, sendo o modelo de Thomas um dos mais utilizados. Esse modelo assume que não há dispersão axial no leito e o modelo cinético é de segunda ordem e reversível (PATEL, 2019). O modelo de Yoon-Nelson é uma modelagem matemática simplificada do modelo de Thomas, e possui a facilidade de não necessitar o conhecimento do mecanismo de interação do adsorvato e o adsorvente, além de não necessitar de conhecimento profundo das características do material (XU; CAI; PAN, 2013).

Nesta pesquisa foi investigada a adsorção do corante Preto Reativo 5 (PR 5) em coluna de leito fixo preenchida com lodo de esgoto como adsorvente, como continuidade aos estudos previamente realizado por Freitas et al. (2020). Os parâmetros taxa de fluxo, concentração inicial do corante e massa do adsorvente foram investigados usando o planejamento estatístico método do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR). Os dados experimentais da adsorção do corante PR 5 na coluna de carvão ativado foram ajustados aos modelos de Thomas e Yoon-Nelson.

MATERIAIS E MÉTODOS

O lodo anaeróbio foi coletado de um reator anaeróbio de manta de lodo ascendente (tipo UASB) de uma Estação de Tratamento de Esgotos Sanitários do município de Curitiba, Paraná, Brasil, e foi usado como matéria-prima para preparação do carvão ativado (adsorvente).

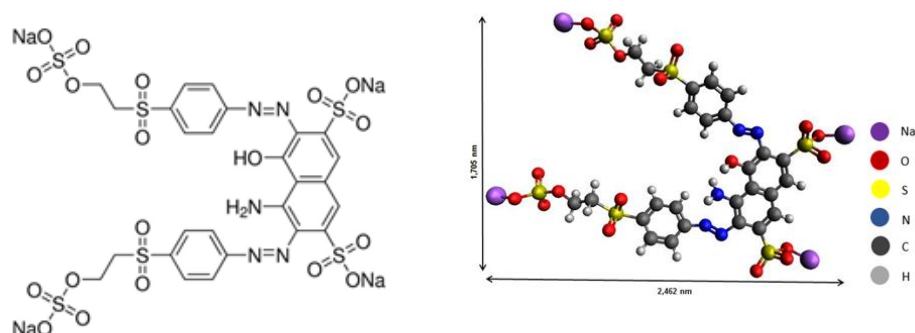
O lodo de esgoto *in natura* (LI) foi seco a 105 (5) °C em estufa por 24 h e, em seguida, parte do material foi triturada em um moinho de panelas. As massas foram peneiradas para obter frações com diâmetros variando de 0,6 a 0,075 mm. Em seguida, estas frações foram submetidas à ativação térmica de acordo com procedimentos descritos por Vasques et al. (2011), nos quais aproximadamente 100 g do LI foram aquecidos a 200 (5) °C por uma hora, pirolisadas a 500 (5) °C por uma hora em forno mufla sob atmosfera inerte de nitrogênio (fluxo de gás de 2 mL min⁻¹). Este adsorvente foi denominado como lodo pirolisado (LP).

A partir do LP, foi realizada a ativação química de acordo com metodologia adaptada de Sonai et al. (2016), na qual 2 g do adsorvente foram colocadas em frascos de Erlenmeyer de 125 mL contendo 50 mL de uma solução de HNO₃ (ácido nítrico) 0,1 M e mantidos em um agitador orbital Solab SL 222, a 150 rpm por 3 h a 25 °C. Em seguida, este material foi filtrado em filtros de membrana de 0,45 µm e colocado no forno mufla a 105 (5) °C até obter massa constante. O adsorvente obtido foi denominado lodo funcionalizado (FS). A caracterização dos adsorventes LI, LP e LF foi realizada em estudos prévios por Freitas et al. (2020).

O corante Preto Reativo 5 (número CAS 17095-24-8, pureza > 99,9%) possui fórmula molecular C₂₆H₂₁N₅Na₄O₁₉S₆ e peso molar de 991,82 g mol⁻¹. Este corante azo-têxtil e os reagentes químicos de grau analítico, como HCl e NaOH foram adquiridos na Sigma-Aldrich Co., EUA.

A estrutura molecular e o tamanho do PR 5 foram determinados usando o software Avogadro (versão 1.2.0), conforme demonstrado na Figura 1.

Figura 1 - Estrutura química do corante Preto Reativo 5 (PR 5).



Fonte: Autoria própria (2020).

Neste estudo, os parâmetros selecionados - taxa de fluxo, concentração e massa do adsorvente - foram investigados usando o método de Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), para projetar o experimento, otimizar os parâmetros eficazes com um número mínimo de experimentos e analisar o efeitos de interação entre os parâmetros operacionais, conforme relatado anteriormente por Kaçan e Kütahyalı (2012), e por Azargohar e Dalai (2008).

Neste método foram considerados pontos fatoriais (2^k), pontos axiais ($2k$) e pontos centrais (3), em que k é o número de parâmetros. As réplicas no ponto central incluem 17 replicações, que são realizadas definindo todos os fatores em seus pontos médios para estimar o erro residual para cada adsorvente. Portanto, o número de ensaios contínuos necessários para cada adsorvente foi 17 ($N = 2^k + 2k = n_c = 2^3 + 2 \times 3 + 3 = 17$).

A faixa e os níveis das variáveis numéricas independentes em termos de valores reais e codificados são mostrados na Tabela 1. As variáveis estudadas foram Taxa de fluxo de 2,0-8,0 mL min⁻¹, concentração de corante de 15-35 mg L⁻¹ e massa adsorvente de 0,21-1,0 g.

Uma coluna de leito fixo em escala de bancada foi montada com um condensador Liebig de vidro, com diâmetro interno de 0,86 cm e altura de 30 cm. As partículas de carvão ativado foram empacotadas na coluna entre camadas de suporte de algodão-pérolas de vidro-carvão ativado-suporte de algodão-pérolas de vidro. Diferentes massas de cada adsorvente variando de 0,21 g a 1,0 g foram acondicionadas na coluna. A alimentação da coluna foi feita com uma bomba peristáltica Concept plus, Prominent Brasil Ltda. Os valores das variáveis taxa de fluxo, concentração inicial e massa do adsorvente são apresentados na Tabela 1.

Os experimentos foram conduzidos em valores ótimos de pH e temperatura obtidos em ensaios preliminares por Freitas et al (2020), sendo 12 e 42 °C para o LP e 3,4 e 51 °C para LF, respectivamente. Amostras do efluente da coluna foram coletadas em intervalos de tempo pré-determinados para determinação do corante PR 5, e ajuste aos modelos Thomas e Yoon-Nelson.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores da taxas de fluxo, concentração inicial do PR 5 e massa do adsorvente, e os resultados dos ajustes aos modelos matemáticos são apresentados na Tabela 1.

Em relação à concentração inicial, foi possível observar que o maior tempo de saturação (31,55 min) foi verificado para a menor concentração do corante (19,10 mg L⁻¹) no ensaio 7 para o LP. Para o LF, o maior tempo de saturação (189,39 min) foi verificado no ensaio 5, para a mesma concentração do corante.

Em relação à vazão afluente, foi possível observar que o corante presente na solução aquosa teve mais tempo, tanto para LP (58,56 min) quanto para LF (189,39 min), para interagir com leito à base de carvão ativado para vazão afluente de 3,2 mL min⁻¹. O aumento da vazão afluente (8,0 mL min⁻¹) acarretou na menor remoção do PR 5, resultando em menor tempo de saturação (LP = 9,56 min, LF = 29,40 min) para ambos os lodos no ensaio 14.

Isto pode ser explicado pela influência do menor gradiente de concentração provocado pelo transporte mais lento devido ao menor coeficiente de difusão ou ao menor coeficiente de transferência de massa. Foi possível observar que o tempo de saturação diminuiu com o aumento da concentração do corante.

A adsorção do corante na coluna de leito fixo depende em grande parte da quantidade da massa de adsorvente na coluna. Como mostrado na Tabela 1, o tempo de saturação (LP = 38,86 min, LF = 106,65 min) aumentou com o aumento da massa adsorvente (1,0 g) para o PR 5. À medida que a massa adsorvente aumentou, o corante teve mais chance para entrar em contato com o adsorvente e foi alcançado maior tempo de remoção do corante.

Comportamento similar foi observado por Al-Degs et al. (2009) quando o carvão ativado foi usado para adsorver os corantes reativos amarelo Remazol e preto Remazol em coluna de leito fixo.

O ajuste dos dados experimentais aos modelos de Thomas e Yoon-Nelson resultaram em coeficiente de determinação (R²) de 0,99 para LP em 11 ensaios e variável de 0,74 a 0,99 para LF.

CONCLUSÕES

Nesta pesquisa foi possível verificar remoção do corante preto reativo 5 na coluna de leito fixo preenchida com lodo de esgoto como adsorvente.

O processo de remoção por adsorção foi dependente da vazão afluente e da massa do adsorvente.

A adsorção em coluna de leito fixo apresentou melhor desempenho com menor concentração inicial de corante (19,10 mg L⁻¹), menor taxa de fluxo (2 mL min⁻¹) e maior massa de adsorvente (1 g).

O maior tempo de saturação de adsorção da coluna para LP foi de 58,56 min e de 189,39 min para LF. Os experimentos foram bem descritos pelos modelos Thomas e Yoon-Nelson.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a concessão da bolsa de iniciação científica ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e disponibilização da infraestrutura no LabSan da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

REFERÊNCIAS

AKSU Z.; TEZER S., Equilibrium and kinetic modelling of biosorption of Remazol Black B by *Rhizopus arrhizus* in a batch system: effect of temperature, *Process Biochem.* 36 (2000) 431–439.

AL-DEGS Y.S.; KHRAISHEH M.A.M.; ALLEN S.J.; AHMAD M.N. Adsorption characteristics of reactive dyes in columns of activated carbon. Ahmad. *Journal of Hazardous Materials*. Editor: Elsevier. 15 de julho de 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389408015963>. Acesso em 29, ago, 2020.

AMARAL F.M.; KATO M.T.; FLORENCIO L.; GAVAZZA S., Color, organic matter and sulfate removal from textile effluents by anaerobic and aerobic processes, *Bioresour. Technol.* 163 (2014), 364-369.

AZARGOHAR R.; DALAI A.K., Steam and KOH activation of biochar: Experimental and modeling studies, *Microporous and Mesoporous Materials*, Volume 110, Issues 2–3 (2008) 413-421.

EL-ASHTOUKHY E-S.Z.; AMIN N.K., Removal of Acid Green Dye 50 from wastewater by anodic oxidation and electrocoagulation – a comparative study, *J. Hazard. Mater.* 179 (2010) 113–119.

FREITAS, DAIANE. Adsorção e dessorção do corante preto reativo 5 em solução aquosa utilizando adsorvente alternativo de lodo de esgoto sanitário (biocarvão) In.: Repositório Institucional da UTFPR. 15 de julho de 2020. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/5111>. Acesso em 29, ago, 2020.

GUARATINI, C. C. I.; ZANONI, V. B. Corantes têxteis. *Química Nova*, v. 23, n. 1, p. 71–78, 2000.

KAÇAN E.; KÜTAHYALI C., Adsorption of strontium from aqueous solution using activated carbon produced from textile sewage sludges, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 97 (2012), pp. 149-157

KHANDEGAR V.; SAROHA A.K., Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent – A review, *J. Environ. Manage.* 128 (2013) 949-963.

KUSVURAN E.; IRMAK S.; YAVUZ H.I.; SAMIL A.; ERBATUR O., Comparison of the treatment methods efficiency for decolorization and mineralization of Reactive Black 5 azo dye, *J. Hazard. Mater.* 119 (2005) 109–116.

MCKAY G.; BION M.J. Simplified optimisation for fixed bed adsorption systems *Water Air Soil Poll.*, 51 (1990), pp. 33-41

PATEL, H. Fixed-bed column adsorption study: a comprehensive review. *Applied Water Science*, v. 9, n. 3, p. 1–17, 2019.

PEDROZA M.M.; VIEIRA G.E.G.; SOUSA J.F. de; PICKLER A.C.; LEAL E.R.M.; MILHOMEN C.C. Produção e tratamento de lodo de esgoto – uma revisão. *Revista Liberato*. 11 (2010) 89-188.

ROBINSON T.; MCMULLAN G.; MARCHANT R.; NIGAM P., Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative, *Bioresour Technol*. 77 (2001) 247-255.

SHAFEEYAN M.S.; DAUD W.M.A.W.; HOUSMAND A.; ARAMI-NIYA A., The application of response surface methodology to optimize the amination of activated carbon for the preparation of carbon dioxide adsorbents, *Fuel* 94 (2012) 465–472.

SILVA T.L.; RONIX A.; PEZOTI O.; SOUZA L.S.; LEANDRO P.K.T.; BEDIN K.C.; BELTRAME K.K.; CAZETTA A.L.; ALMEIDA V.C. Mesoporous activated carbon from industrial laundry sewage sludge: Adsorption studies of reactive dye Remazol Brilliant Blue R, *Chem. Eng. J.* 303 (2016) 467–476.

SONAI, G. G.; SOUZA, S. M. A. G. U. de; OLIVEIRA, D. de; SOUZA, A. A. U. de. The application of textile sludge adsorbents for the removal of Reactive Red 2 dye. *Journal of Environmental Management* 168, 149–156, 2016.

SZPYRKOWICZ L.; JUZZOLINO C.; KAUL S.N., A comparative study on oxidation of disperse dyes by electrochemical process, ozone, hypochlorite and Fenton reagent, *Water Res.* 35 (2001) 2129–2136.

TREVIZANI J.L.B.; NAGALLI A.; PASSIG F.H.; CARVALHO K.Q. DE; SCHIAVON G.J., A.N.L. Model, Influence of pH and concentration on the decolorization and degradation of BR red azo dye by ozonization, *Acta Sci. Technol.* 40 (2018) 1-8.

VASQUES, A. R.; SOUZA, S. M. A. G. U. de; WEISENBERG, L.; SOUZA, A. A. U. de; VALLE, J. A. B. Adsorção dos corantes RO16, RR2 e RR141 utilizando lodo residual da indústria têxtil. *Engenharia Sanitária Ambiental*. v. 16 n. 3. Jul/set 2011. p. 245–252.

XU, Z.; CAI, J.; PAN, B. Mathematically modeling fixed-bed adsorption in aqueous systems. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, v. 14, n. 3, p. 155–176, 2013.

Tabela 1 – Resultados de Thomas e Yoon Nelson para os ensaios na coluna de leito fixo para LP e LF.

Ensaio	Parâmetros			Lodo Pirolisado						Lodo Funcionalizado						Tempo de saturação (min)	
				Thomas			Yoon-Nelson			Thomas			Yoon-Nelson				
	Concentração Inicial (mg L ⁻¹)	Vazão (L min ⁻¹)	Massa (g)	k (L mg ⁻¹ min ⁻¹)	q (mg g ⁻¹)	R ²	k _{yn} (min ⁻¹)	t _{50%} (min)	R ²	k (L mg ⁻¹ min ⁻¹)	q (mg g ⁻¹)	R ²	k _{yn} (min ⁻¹)	t _{50%} (min)	R ²	LP	LF
1	19,1	3,20	0,30	0,0192	2,69	0,99	0,31	17,91	0,99	0,0063	6,24	0,99	0,12	35,60	0,99	23.90	74.36
2	19,10	6,80	0,30	0,5530	2,23	0,99	5,21	6,96	0,99	0,0082	4,35	0,94	0,16	24,70	0,94	12.35	128.00
3	30,90	3,20	0,30	0,0062	5,96	0,99	0,18	22,53	0,99	0,0041	8,79	0,99	0,13	32,45	0,99	34.80	60.29
4	30,90	6,80	0,30	0,0311	4,38	0,99	0,89	7,65	0,99	0,0084	4,13	0,99	0,26	15,28	0,99	11.63	27.10
5	19,10	3,20	0,80	0,0095	1,72	0,99	0,19	22,23	0,99	0,0032	3,90	0,94	0,06	51,10	0,94	31.55	189.39
6	19,10	6,80	0,80	0,0279	1,52	0,99	0,48	10,57	0,99	0,0108	3,09	0,95	0,21	19,01	0,95	23.06	47.75
7	30,90	3,20	0,80	0,0054	7,42	0,99	0,16	29,78	0,99	0,0026	5,16	0,97	0,08	41,70	0,97	58.56	101.03
8	30,90	6,80	0,80	0,0177	3,04	0,99	0,51	12,41	0,99	0,0074	4,41	0,98	0,00	16,79	0,98	17.03	36.37
9	25,00	5,00	0,21	0,0130	9,52	0,99	0,32	19,04	0,99	0,0042	3,70	0,79	0,10	5,90	0,79	25.93	26.41
10	25,00	5,00	1,00	0,0119	0,98	0,87	0,30	8,77	0,87	0,0030	4,26	0,94	0,07	34,66	0,94	38.86	106.65
11	15,00	5,00	0,50	0,0206	1,34	0,94	0,35	7,93	0,94	0,0058	3,53	0,93	0,10	19,56	0,93	17.12	46.03
12	35,00	5,00	0,50	0,0194	1,96	0,97	0,62	6,10	0,97	0,0071	4,27	0,94	0,24	12,73	0,94	11.77	28.77
13	25,00	2,00	0,50	0,0084	1,81	0,98	0,21	16,89	0,98	0,0118	3,96	0,74	0,03	35,96	0,74	33.42	139.91

14	25,00	8,00	0,50	0,0291	1,89	0,95	0,77	4,59	0,95	0,0057	4,53	0,92	0,14	10,80	0,92	9.56	29.40
15	25,00	5,00	0,50	0,0083	3,09	0,94	0,20	13,03	0,94	0,0084	2,69	0,97	0,19	19,10	0,97	29.45	37.62
16	25,00	5,00	0,50	0,0077	3,18	0,93	0,18	13,40	0,93	0,0042	2,97	0,96	0,19	19,00	0,96	32.82	42.91
17	25,00	5,00	0,50	0,0061	3,43	0,93	0,15	14,48	0,93	0,0072	3,06	0,97	0,18	19,50	0,97	36.82	42.91

Legenda: k_{Th} : constante cinética de Thomas ($\text{mL min}^{-1} \text{mg}^{-1}$); q_0 : quantidade de corante no equilíbrio (mg g^{-1}); Q : vazão (mL min^{-1}); C_0 : concentração inicial (mg L^{-1}); w : massa de adsorvente (g). k_{YN} : constante de Yoon- Nelson (min^{-1}); τ : tempo 50% de saturação (min); t : tempo (x) Fonte: Autoria própria (2020).

$$\text{Equação de Thomas: } \ln\left(\frac{C_i}{C_0} - 1\right) = \frac{k_{Th} \cdot q_0 \cdot w}{Q} - k_{Th} \cdot C_0 \cdot \tau;$$

$$\text{Equação de Yoon-Nelson: } \ln\left(\frac{C_i}{C_0 - C_i}\right) = k_{YN} \cdot t - \tau \cdot k_{YN}$$