



# AVALIAÇÃO DA REMOÇÃO DO CORANTE VERMELHO REATIVO 4B PELO ADSORVENTE COMERCIAL DOWEX™ OPTIPORE™ SD-2

S. P. D. Oliveira<sup>1</sup>; P. Marin<sup>1</sup>; C. E. Borba<sup>1</sup>; A. N. Módenes<sup>1</sup>; F. R. Espinoza-Quiñones<sup>1</sup>; L. S. Figueiredo<sup>1</sup>; N. Passaia<sup>1</sup>; E. A. da Silva<sup>1</sup>

1- Departamento de Engenharia Química – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus Toledo.

Rua da Faculdade, 645- Jardim La Salle - CEP: 85903-000 – Toledo- PR – Brasil.

Telefone: (45) 9918-3236 – Email: [spdoliveira@hotmail.com](mailto:spdoliveira@hotmail.com)

**RESUMO:** O objetivo deste trabalho foi estudar a remoção do corante vermelho reativo 4B utilizando o adsorvente comercial Dowex™ Optipore™ SD-2. Para tanto, foram realizados testes preliminares em sistema batelada para avaliar a influência do pH, na faixa de 1 a 12, e da temperatura, na faixa de 30 a 50°C, no processo de adsorção. Os melhores resultados foram pH 2 e a temperatura de 30°C. A isoterma de Langmuir representou de forma satisfatória os dados experimentais de equilíbrio ( $r^2= 0,9865$  e  $q_{max}= 333 \text{ mg g}^{-1}$ ). O modelo de difusão intrapartícula foi ajustado aos dados cinéticos, apresentando um coeficiente de correlação de 0,9610 e coeficiente de difusão intrapartícula ( $D_{ef}$ ) de  $1,95 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ h}^{-1}$ .

**PALAVRAS-CHAVE:** efluentes têxteis, adsorção, modelos cinéticos e de equilíbrio.

**ABSTRACT:** The objective of this work was to study the removal of reactive red dye 4B using Dowex™ Optipore™ SD-2 commercial adsorbent. For this purpose, preliminary tests were performed in batch system to evaluate the influence of pH in the range of 1 to 12, and temperature in the range of 30 to 50 °C, in the adsorption process. The best results were obtained at pH 2 and temperature of 30 °C. The Langmuir isotherm represented satisfactorily the experimental equilibrium data ( $r^2= 0,9865$  and  $q_{max}= 333 \text{ mg g}^{-1}$ ). The intraparticle diffusion model was adjusted to the kinetic data, showing a correlation coefficient of 0.9610 and intraparticle diffusion coefficient ( $D_{ef}$ ) of  $1,95 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ h}^{-1}$ .

**KEYWORDS:** textile effluents; adsorption; kinetic and equilibrium models.

## 1. INTRODUÇÃO

Os efluentes gerados pelas indústrias têxteis apresentam grande potencial poluidor ao meio ambiente, esta característica se dá principalmente devido a presença de corantes neste tipo de efluente (Barakat, 2011). Os corantes em corpos d'água, mesmo em baixas concentrações, são tóxicos aos organismos vivos e afetam a penetração de luz solar, o que prejudica a fotossíntese de plantas aquáticas (Hameed, 2008; Vimonses *et al.* 2009; Pajootan *et al.*, 2012). Além disto, os corantes também são altamente tóxicos aos seres humanos, que em contato direto com esse

produto podem desenvolver dermatites, câncer, entre outras doenças (Zahrim, *et al.*, 2011).

Dentre os diferentes tipos de corantes, os reativos são os mais utilizados pelas indústrias têxteis devido a sua reatividade com as fibras e estabilidade da cor. A molécula do corante reativo pode ser definida pelos seguintes sistemas estruturais: um sistema cromóforo, responsável pelo fenômeno da cor; um grupo sulfonato, responsável pela solubilidade e caráter aniônico do corante; e um ou mais grupos reativos, que podem formar ligação covalente com as fibras de celulose por reações de adição ou substituição nucleofílica (Kimura *et al.*, 1999).



A remoção da cor dos efluentes têxteis é um dos grandes problemas ambientais apresentado por esse setor, uma vez que os corantes são resistentes à digestão aeróbia e altamente estável ao calor, luz e agentes oxidantes (Kyzas *et al.*, 2012).

A eletrocoagulação (Palácio *et al.*, 2009), a floculação (Manenti *et al.*, 2010) e a adsorção (Fiorentin *et al.*, 2010) são alguns dos processos estudados para o tratamento de efluentes têxteis. A adsorção é um método promissor, pois, é uma técnica de baixo custo, dependendo do adsorvente utilizado, projeto simples e de fácil operação. Porém, para que sejam obtidos bons resultados é necessário que seja feita a escolha correta do material adsorvente, por isso, diferentes tipos de materiais vêm sendo testados para a remoção da cor de efluentes têxteis, dentre eles: carvão ativado (Liao *et al.*, 2012; Schimmel *et al.*, 2010), macrófita *Egeria Densa* (Módenes *et al.*, 2011), bagaço de laranja (Fiorentin *et al.*, 2010) e casca de ovo (Elkady *et al.*, 2011).

Devido à grande utilização do corante vermelho reativo 4B nas indústrias têxteis, este trabalho tem como objetivo avaliar a remoção desse corante pelo adsorvente Dowex<sup>TM</sup> Optipore<sup>TM</sup> SD-2.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Adsorvente

O adsorvente utilizado foi o Dowex<sup>TM</sup> Optipore<sup>TM</sup> SD-2, produzido por Dow Chemical Company. Algumas propriedades físico-químicas deste adsorvente são apresentadas na Tabela 1. Para a realização dos experimentos o adsorvente foi seco em estufa (Cienlab) à 50°C até massa constante.

**Tabela 1.** Características físico-químicas do adsorvente Dowex<sup>TM</sup> Optipore<sup>TM</sup> SD-2.

Matriz	Copolímero de estireno divinilbenzeno
Grupo funcional	Amina terciária
Área superficial	800 m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup>
Tamanho de partículas	0,10 - 1,20 mm
Diâmetro médio de poros	50 Å

### 2.2. Soluções de Corante e Procedimento Analítico

As soluções foram preparadas diluindo-se o corante vermelho reativo 4B em água destilada. O pH das soluções foram ajustados adicionando-se HCl 1M ou NaOH 1M. Utilizando o espectrofotômetro UV-vis (Shimadzu - UV 1800) foram determinadas as absorvâncias das soluções de corante (50 mg L<sup>-1</sup>) em diferentes pHs (2, 4, 6, 8, 10 e 12) e identificado o maior comprimento de onda. O valor encontrado foi de 540 nm para todas as soluções. Em seguida, foi construída a curva de calibração do espectrofotômetro UV-vis utilizando soluções de corante vermelho reativo 4B com concentração na faixa de 0 a 100 mg L<sup>-1</sup> e pH 2. A curva de calibração foi utilizada para determinar a concentração das soluções durante os experimentos.

### 2.3. Testes Preliminares

Primeiramente foi avaliado o efeito do pH e da temperatura sobre a capacidade de adsorção do adsorvente Dowex<sup>TM</sup> Optipore<sup>TM</sup> SD-2.

Para avaliar o efeito do pH da solução de corante sobre a capacidade de adsorção do adsorvente, 50 mL de solução de corante, com concentração inicial de 150 mg L<sup>-1</sup>, e 5 mg de adsorvente foram adicionados em erlenmeyers. A suspensão foi colocada num agitador orbital (*shaker*) com velocidade de agitação e temperatura controladas (120 rpm e 30°C, respectivamente). Os experimentos foram realizados para diferentes valores de pH (1 – 12). Após 96 horas foi retida uma amostra da solução, não foi necessário nenhum tipo de operação para esta separação. A concentração na fase líquida foi determinada utilizando o espectrofotômetro UV-vis. A concentração no adsorvente foi calculada por meio de um balanço de massa na fase líquida, representado pela Equação 1.

$$\bar{q}_{eq} = \frac{V}{m} (C_0 - C_{eq}) \quad (01)$$

onde  $\bar{q}_{eq}$  é a concentração média de corante no adsorvente no equilíbrio (mg g<sup>-1</sup>);  $V$  é o volume de solução (L);  $m$  é a massa do adsorvente (g);  $C_0$  é a concentração inicial na fase líquida (mg L<sup>-1</sup>) e  $C_{eq}$  é a concentração na fase líquida no equilíbrio (mg L<sup>-1</sup>).

Os experimentos para avaliar efeito da temperatura sobre a capacidade de adsorção do



adsorvente foram realizados da mesma forma que os experimentos para o efeito do pH, com exceção somente do pH da solução que foi fixado em 2 e a temperatura que foi variada na faixa de 30 – 50°C.

## 2.4. Teste Cinético

Para o teste cinético, 50 mL de solução de corante, com concentração inicial de 157 mg L<sup>-1</sup> e pH 2, e 5 mg de adsorvente foram adicionados em erlenmeyers. A suspensão foi colocada no *shaker* com velocidade de agitação e temperatura controladas (120 rpm e 30°C, respectivamente). As amostras foram retiradas em intervalos de tempo predeterminados (0 – 200 h). A concentração no adsorvente, em cada instante de tempo, foi calculada utilizando a Equação 2.

$$\bar{q}(t) = \frac{V}{m}(C_0 - C(t)) \quad (02)$$

onde  $\bar{q}(t)$  é a concentração média de corante no adsorvente em cada instante de tempo (mg g<sup>-1</sup>) e  $C(t)$  é a concentração na fase líquida em cada instante de tempo (mg L<sup>-1</sup>).

## 2.5. Teste de Equilíbrio

Para o teste de equilíbrio, 50 mL de solução de corante, com concentração inicial na faixa de 5 – 300 mg L<sup>-1</sup> e pH 2, e 5 mg de adsorvente foram adicionados em erlenmeyers. A suspensão foi colocada no *shaker* com velocidade de agitação e temperatura controladas (120 rpm e 30°C, respectivamente). As amostras foram retiradas após 96 h, tempo de equilíbrio determinado no teste cinético. A concentração no adsorvente foi calculada utilizando a Equação 1.

## 2.6. Modelagem Matemática

Os dados de equilíbrio de adsorção do corante vermelho reativo 4B sobre o adsorvente Dowex<sup>TM</sup> Optipore<sup>TM</sup> SD-2 foram modelados pela isoterma de adsorção de Langmuir (Equação 3). A isoterma de Langmuir é um modelo teórico baseado nas seguintes hipóteses: (i) todos os sítios de adsorção são ativos; (ii) não existe interação entre as moléculas adsorvidas; (iii) a adsorção ocorre em monocamada sobre superfície homogênea.

$$\bar{q}_{eq} = \frac{q_{max} b C_{eq}}{1 + b C_{eq}} \quad (03)$$

onde  $q_{max}$  (mg g<sup>-1</sup>) e  $b$  (L mg<sup>-1</sup>) são os parâmetros da isoterma de Langmuir.

Os dados da cinética de adsorção foram ajustados ao modelo matemático de difusão intrapartícula. Na construção do modelo foram admitidas as seguintes hipóteses: (i) adsorção sobre superfície homogênea; (ii) processo isotérmico e isobárico; (iii) propriedades físicas constantes no sólido e na fase líquida. O balanço de massa na fase líquida foi descrito pela Equação 1. A isoterma de Langmuir foi utilizada para descrever o equilíbrio entre as fases líquida e sólida, pois esse modelo foi o que descreveu melhor os dados de equilíbrio. A difusão intrapartícula do corante no interior dos poros do adsorvente foi descrita pela Lei de Fick, como mostra a Equação 4.

$$\frac{\partial}{\partial t} q(r, t) = \frac{D_{ef}}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial}{\partial r} q(r, t) \right) \quad (04)$$

onde  $D_{ef}$  é o coeficiente de difusão intrapartícula (cm<sup>2</sup> h<sup>-1</sup>).

Para o cálculo da concentração média de corante no adsorvente foi utilizada a Equação 5.

$$\bar{q}(t) = \frac{3}{R} \int_0^R r^2 q(r, t) dr \quad (05)$$

onde  $R$  é o raio da partícula adsorvente (cm).

As condições de contorno utilizadas para a resolução deste modelo foram as seguintes:

$$\frac{\partial}{\partial t} q(r = 0, t > 0) = 0 \quad (06)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} q(r = R, t > 0) = \frac{q_{max} b C(t)}{1 + b C(t)} \quad (07)$$

$$C(0) = 0 \quad (08)$$

$$\bar{q}(0) = 0 \quad (09)$$

$$q(r, 0) = 0 \quad (10)$$

Para a resolução do modelo matemático da cinética de adsorção, a equação foi discretizada utilizando o método das linhas, que transforma as equações diferenciais parciais em um conjunto de equações diferenciais ordinárias. O sistema de equações diferenciais ordinárias, juntamente com as condições iniciais e de contorno, foi resolvido

pelo método de Runge-Kutta-Fehlberg, com o auxílio do *software* Maple 13.

**2.6.1. Identificação dos parâmetros dos modelos matemáticos:** Os parâmetros da isoterma de adsorção foram obtidos a partir da minimização da seguinte função objetivo:

$$OF_{eq} = \sum_{j=1}^N (\bar{q}_{eq}^{exp} - \bar{q}_{eq}^{mod})^2 \quad (11)$$

onde  $N$  é o número de dados experimentais de equilíbrio;  $\bar{q}_{eq}^{exp}$  e  $\bar{q}_{eq}^{mod}$  são as médias das concentrações do corante no equilíbrio no adsorvente obtidas experimentalmente e pelo modelo, respectivamente.

O parâmetro  $D_{ef}$  do modelo cinético foi obtido a partir da minimização da função objetivo representada pela Equação 12.

$$OF = \sum_{j=1}^N \left( \frac{C^{exp} - C^{mod}}{C^{exp}} \right)^2 \quad (12)$$

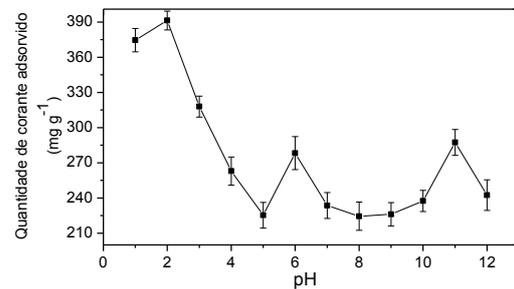
onde  $C^{exp}$  e  $C^{mod}$  são as concentrações na fase líquida, em cada instante de tempo, obtidas experimentalmente e pelo modelo cinético, respectivamente.

O método de otimização Simplex, desenvolvido por Nelder e Mead (1965), foi utilizado para minimização de tal função, com o auxílio do *software* Maple 13.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1. Testes Preliminares

O pH da solução de corante é uma variável de grande importância no estudo do processo de adsorção, pois ele influencia diretamente na carga superficial do adsorvente e na ionização das moléculas de corante. Sendo assim, o pH da solução pode tanto contribuir como prejudicar o processo de adsorção, por isso é importante ajustá-lo de acordo com o adsorvente e adsorvato que será utilizado. Com os resultados experimentais do teste do pH construiu-se a Figura 1 que relaciona a capacidade de adsorção do adsorvente em função do pH da solução de corante.



**Figura 1.** Efeito do pH da solução na adsorção do corante vermelho reativo 4B.

Como pode ser observado na Figura 1, para as condições estudadas, a maior quantidade de corante removido foi obtida para solução com pH 2. Machado (2011) e Fiorentin (2010), também obtiveram o pH 2 como melhor pH para a remoção de corantes reativos em carvão ativado e bagaço de laranja, respectivamente.

A temperatura tem dois efeitos principais sobre o processo de adsorção de corantes. Em temperaturas elevadas há uma maior agitação molecular do sistema, aumentando a velocidade de difusão das moléculas de corante da superfície até os poros internos do adsorvente. Em contrapartida, as mudanças de temperatura alteram o equilíbrio entre as fases líquida e sólida. Altos valores de temperatura favorecem processos de adsorção endotérmicos, e o contrário acontece para processos de adsorção exotérmicos. Os resultados do teste do efeito da temperatura sobre o processo de adsorção do corante vermelho reativo 4B estão expostos na Tabela 2.

**Tabela 2.** Efeito da temperatura no processo de adsorção.

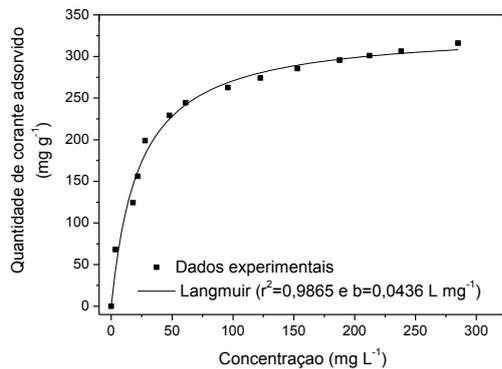
Temperatura (°C)	$q_{eq}$ (mg g <sup>-1</sup> )
30	288 ± 18
40	305 ± 15
50	336 ± 17

Com os resultados do teste de temperatura foi possível verificar que, nas condições avaliadas, a temperatura de 30°C é a mais indicada para a realização do processo de adsorção, uma vez que o custo energético seria muito alto para elevar a temperatura a 50°C resultando em um pequeno aumento na capacidade de adsorção do corante.



### 3.2. Teste de Equilíbrio

A isoterma de Langmuir foi usada para descrever os dados de equilíbrio de adsorção. A Figura 2 mostra o ajuste da isoterma aos dados experimentais. Com base no valor do coeficiente de correlação ( $r^2 = 0,9865$ ) pode-se concluir que o modelo de Langmuir descreveu de forma satisfatória os dados experimentais.



**Figura 2.** Ajuste da isoterma aos dados experimentais de equilíbrio.

O adsorvente Dowex™ Optipore™ SD-2 mostrou uma capacidade máxima de adsorção do corante vermelho reativo 4B igual a  $333 \text{ mg g}^{-1}$ . A capacidade máxima de adsorção de alguns adsorventes encontrados na literatura para a remoção de corantes reativos está exposta na Tabela 3.

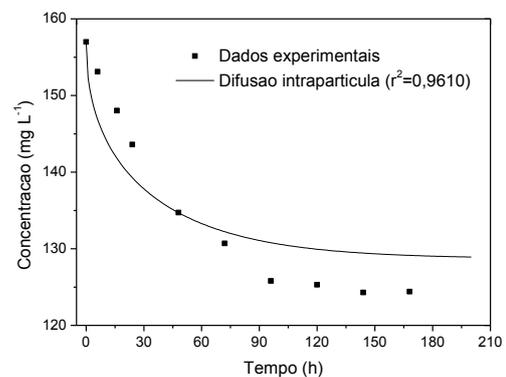
**Tabela 3.** Capacidade máxima de adsorção de corantes reativos em diferentes adsorventes.

Adsorvente	$q_{max}$ ( $\text{mg g}^{-1}$ )	Fonte
Carvão ativado	205	Galán <i>et al.</i> , 2013
Macrófita <i>Egeria Densa</i>	29,83	Módenes <i>et al.</i> , 2011
Casca de ovo	46,93	Elkady <i>et al.</i> , 2011
Bagaço de laranja	25,98	Fiorentin <i>et al.</i> , 2010

Em comparação com os adsorventes mostrados na Tabela 3, verifica-se que o adsorvente Dowex™ Optipore™ SD-2 é uma boa alternativa para a remoção do corante vermelho reativo 4B de efluentes industriais.

### 3.3. Teste Cinético

A cinética de adsorção em sistema batelada foi descrita pelo modelo de difusão intrapartícula (Equação 4). Para a resolução deste modelo foram utilizados os parâmetros obtidos pelo ajuste da isoterma de Langmuir aos dados experimentais de equilíbrio:  $q_{max} = 333 \text{ mg g}^{-1}$  e  $b = 0,0436 \text{ L mg}^{-1}$ . Os resultados experimentais e os do modelo cinético são apresentados na Figura 3. O valor do coeficiente de correlação do ajuste do modelo aos dados experimentais cinéticos foi de 0,9610, com um desvio de 16%. O coeficiente de difusão intrapartícula ( $D_{ef}$ ) obtido pelo modelo foi de  $1,95 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ h}^{-1}$  e o valor da função objetivo foi igual a 0,0107.



**Figura 3.** Ajuste do modelo de difusão intrapartícula aos dados experimentais cinéticos.

A adsorção de corantes reativos depende de alguns fatores como as propriedades físico-químicas do adsorvente, a quantidade de grupos sulfonato dos corantes e as dimensões das cadeias orgânicas dos corantes (Jesus *et al.*, 2011). O corante vermelho reativo 4B apresenta quatro grupos sulfonatos (Al-Degs *et al.*, 2008) que interagem com os grupos amina do adsorvente Dowex™ Optipore™ SD-2. Segundo Cestari *et al.* (2004), os grupos amina do adsorvente em solução adsorvem fortemente as moléculas de corantes reativos, devido à interação eletrostática. Além disso, a cadeia ramificada e a elevada massa molar do corante vermelho reativo 4B,  $994,5 \text{ g mol}^{-1}$  (Al-Degs *et al.*, 2008), associada a estrutura mesoporosa do adsorvente Dowex™ Optipore™ SD-2 teve grande influência na difusão intrapartícula.



## 4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho indicaram que o adsorvente comercial Dowex™ Optipore™ SD-2 possui grande potencial de remoção do corante vermelho reativo 4B presente em efluentes têxteis industriais. Testes em sistema batelada mostraram que o pH da solução igual a 2 e a temperatura de 30°C foram as condições que favoreceram a maior remoção do corante. A isoterma de Langmuir representou de forma satisfatória os dados de equilíbrio ( $r^2 = 0,9865$ ). O modelo de difusão intrapartícula foi utilizado para descrever a cinética de adsorção do corante vermelho reativo 4B sobre o adsorvente Dowex™ Optipore™ SD-2 apresentando um coeficiente de correlação igual a 0,9610.

## 5. REFERÊNCIAS

- AL-DEGS, Y. S.; EL-BARGHOUTH, M. I.; EL-SHEIKH, A. H.; WALKER, G. M. Effect of solution pH, ionic strength, and temperature on adsorption behavior of reactive dyes on activated carbon. **Dyes Pigm.**, v. 77, p. 16-23, 2008.
- BARAKAT, M. A. Adsorption and photodegradation of Procion yellow H-EXL dye in textile wastewater over TiO<sub>2</sub> suspension. **J. Hydro-environment Res.**, v. 5, p. 137-142, 2011.
- CESTARI, A. R.; VIEIRA, E. F. S.; SANTOS, A. G. P. dos; MOTA, J. A.; ALMEIDA, V. P. de. Adsorption of anionic dyes on chitosan beads. 1. The influence of the chemical structures of dyes and temperature on the adsorption kinetics. **J. Colloid Interface Sci.**, v. 280, p. 380-386, 2004.
- ELKADY, M. F.; ILBRAHIM, A. M.; EL-LATIF, M. M. A. Assessment of the adsorption kinetics, equilibrium and thermodynamic for the potential removal of reactive red dye using eggshell biocomposite beads. **Desalination**, v. 278, p. 412-423, 2011.
- FIorentin, L. D.; TRIGUEROS, D. E. G.; MÓDENES, A. N.; ESPINOZA-QUIÑONES, F. R.; PEREIRA, N. C.; BARROS, S. T. D.; SANTOS, O. A. A. Biosorption of reactive blue 5G dye onto drying orange bagasse in batch system: kinetic and equilibrium modeling. **Chem. Eng. J.**, v. 163, p. 68-77, 2010.
- GALÁN, J.; RODRÍGUEZ, A.; GÓMEZ, J. M.; ALLEN, S. J.; WALKER, G.M. Reactive dye adsorption onto a novel mesoporous carbon. **Chem. Eng. J.**, v. 219, p. 62-68, 2013.
- HAMEED, B. H. Equilibrium and kinetic studies of methyl violet sorption by agricultural waste. **J. Hazard. Mater.**, v. 154, p. 204-212, 2008.
- JESUS, A. M. D.; ROMÃO, L. P. C.; ARAUJO, B. R.; COSTA, A. S.; MARQUES, J. J. Use of humin as an alternative material for adsorption/desorption of reactive dyes. **Desalination**, v. 274, p. 13-21, 2011.
- KIMURA, I. Y.; GONÇALVES JR., A. C.; STOLBERG, J.; LARANJEIRA, M. C. M.; FÁVERE, V. T. de. Efeito do pH e do tempo de contatonaadsorção de corantes Reativos por microesferas de quitosana. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, p. 51-57, 1999.
- KYZAS, G. Z.; LAZARIDIS, N. K.; MITROPOULOS, A. C. Removal of dyes from aqueous solutions with untreated coffee residues as potential low-cost adsorbents: Equilibrium, reuse and thermodynamic approach. **Chem. Eng. J.**, v. 189-190, p. 148-159, 2012.
- LIAO, P.; ISMAEL, Z. M.; ZHANG, W.; YUAN S.; TONG, M.; WANG, K.; BAO J. Adsorption of dyes from aqueous solutions by microwave modified bamboo charcoal. **Chem. Eng. J.**, v. 195-196, p. 339-346, 2012.
- MACHADO, F. M.; BERGMANN, C. P.; FERNANDES, T. H. M.; LIMA, E. C.; ROYER, B.; CALVETE, T.; FAGAN, S. B. Adsorption of Reactive Red M-2BE dye from water solutions by multi-walled carbon nanotubes and activated carbon. **J. Hazard. Mater.**, v. 192, p. 1122-1131, 2011.
- MANENTI, D. R.; GOMES, L. F. S.; BORBA, F. H.; MÓDENES, A. N.; ESPINOZA-QUIÑONES, F. R.; PALÁCIO, S. M. Otimização do processo foto-Fenton utilizando irradiação artificial na degradação do efluente têxtil sintético. **Engvista (UFF)**, v. 12, n1, p. 22-32, 2010.
- MÓDENES, A. N.; ESPINOZA-QUIÑONES, F. R.; ALFLEN, V. L.; COLOMBO, A.; BORBA, C. E. Utilização da macrófita Egeria Densa na biosorção do corante reativo 5G. **Engvista**, v. 13, p. 160-166, 2011.



NELDER, J. A.; MEAD, R. A. A simplex method for function minimization. **Comput. J.**, v. 7, p. 308-313, 1965.

PAJOOTAN, E.; ARAMI, M.; MAHMOODI, N. M. Binary system dye removal by electrocoagulation from synthetic and real colored wastewaters. **J. Taiwan Inst. Chem. Eng.**, v. 43, p. 282-290, 2012.

PALÁCIO, S. M.; ESPINOZA-QUIÑONES, F. R.; MÓDENES, A. N.; OLIVEIRA, C. C.; BORBA, F. H.; SILVA JR., F.G. Toxicity assessment from electro-coagulation treated-textile dye wastewaters by bioassays. **J. Hazard. Mater.**, v. 172, p. 330-337, 2009.

SCHIMMEL, D.; FAGNANI, K. C.; SANTOS, J. B. O. dos; BARROS, M. A. S. D. SILVA, E. A. da; Adsorption of turquoise blue QG reactive dye on commercial activated carbon in batch reactor: kinetic and equilibrium studies. **Chem. Eng. J.**, v. 27, No. 02, p. 289 - 298, 2010.

VIMONSES, V.; LEI, S.; JIN, B.; CHOW, C.W.K; SAINT, C. Kinetic study and equilibrium isotherm analysis of Congo Red adsorption by clay materials. **Chem. Eng. J.**, v. 148, p. 354-364, 2009.

ZHRIM, A. Y.; TIZAOUI, C.; HILAL, N. Coagulation with polymers for nanofiltration pre-treatment of highly concentrated dyes: A review. **Desalination**, v. 266, p. 1-16, 2011.

## 6. AGRADECIMENTOS

À Fundação Araucária, CNPq e CAPES pelo apoio financeiro. À Coremal Comércio e Representações Maia LTDA pelo fornecimento do adsorvente e à Texpal Química pelo fornecimento do corante.