

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENGENHARIA QUÍMICA

LARIANA NEGRÃO BERALDO DE ALMEIDA

REMOÇÃO DO CORANTE AMARELO REATIVO B2R UTILIZANDO
BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II

PONTA GROSSA

2015

LARIANA NEGRÃO BERALDO DE ALMEIDA

**REMOÇÃO DO CORANTE AMARELO REATIVO B2R UTILIZANDO
BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Trabalho de Conclusão de Curso II
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química, da Coordenação de
Engenharia Química, da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Juliana Martins
Teixeira de Abreu Pietrobelli

Co-orientador: Prof. Dr. Everton Moraes
Matos

PONTA GROSSA

2015



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa

Nome da Diretoria
Nome da Coordenação
Nome do Curso



TERMO DE APROVAÇÃO

REMOÇÃO DO CORANTE AMARELO REATIVO B2R UTILIZANDO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

por

LARIANA NEGRÃO BERALDO DE ALMEIDA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 03 de Junho de 2015 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Juliana Martins Teixeira de Abreu Pietrobelli
Prof^a. Dr^a Orientadora

Prof^a. Dr^a Maria Regina Parise
Membro titular

Prof. Dr. Ciro Maurício Zimmermann
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

Dedico este trabalho à minha família, em especial ao meu pai e minha mãe pelo amor e apoio durante todo o curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar à Deus pela saúde concedida e por me guiar e iluminar nessa jornada, pois sem Ele nada seria possível.

Aos meus pais Luiz e Regina pelo amor depositado, pelo apoio nas horas mais difíceis e por não medirem esforços em me ajudar a concluir este curso.

Aos meus avós Francisco e Maria José, Oséas e Elza pelo carinho, conselhos e por muitas vezes pronunciarem palavras de apoio e incentivo.

Agradeço à minha orientadora Professora Doutora Juliana Martins Teixeira de Abreu Pietrobelli pela amizade, ensinamentos, dedicação e confiança em mim depositada durante todo o desenvolvimento deste projeto.

Ao professor Doutor Everton Moraes Matos pelas ideias e colaboração no trabalho.

Ao André, namorado prestativo que me auxiliou durante a realização dos experimentos com sua paciência e amor.

As minhas amigas pela amizade, companheirismo na jornada de estudos e pelos momentos de descontração.

As colegas de curso Bruna Cássia e Adriane Zanutto pela ajuda no desenvolvimento dos procedimentos deste estudo.

Ao Fabiano Scheufele pela colaboração nas análises.

A todos os professores do curso de Graduação de Engenharia Química.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa e seus respectivos funcionários.

Enfim, a todas as demais pessoas, colegas e familiares que direta ou indiretamente contribuíram para a realização e conclusão deste projeto e do curso de graduação em Engenharia Química.

Muito Obrigada.

A confiança em si mesmo é o primeiro
segredo do sucesso. (Ralph Waldo
Emerson)

RESUMO

ALMEIDA, Lariana Negrão Beraldo de. **Remoção do corante amarelo reativo B2R utilizando bagaço de cana-de-açúcar**. Defesa realizada em 2015. 64. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Química - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2015.

As etapas de tingimento nas indústrias têxteis apresentam grande importância no beneficiamento dos tecidos, contudo, parte dos corantes utilizados para conferir coloração a este material são descartados nas posteriores lavagens, pois os corantes não se fixam 100% a fibra têxtil. Deste modo, os efluentes gerados apresentam, além de outros componentes, corante em sua composição. Os tratamentos convencionais empregados não se resumem a apenas uma etapa, e sim, diversos métodos biológicos, físicos e químicos. Na remoção da cor por adsorção, o carvão ativado é bastante utilizado como adsorvente, contudo, apresenta valor elevado e dificuldade de dessorção do mesmo. Assim, técnicas de baixo custo visando remover esta coloração das águas residuais são estudadas. Neste contexto, o presente trabalho fundamentou-se em estudar e definir as melhores condições, tempo de equilíbrio e quantidade de adsorvente necessário para a remoção do corante Amarelo Reativo B2R em solução sintética utilizando o bagaço de cana-de-açúcar. Além destes parâmetros, os modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem e difusão intrapartícula bem como as isotermas de adsorção de Langmuir e Freundlich foram ajustados aos dados obtidos experimentalmente. Os ensaios realizados definiram que em pH 1,5 aconteceu maior remoção, o tempo necessário para atingir o equilíbrio de remoção foi de 36 horas, sendo o sistema submetido a temperatura 30°C e agitação de 110 rpm. Além do mais, dentre os modelos cinéticos estudados o melhor ajuste aconteceu por pseudo-segunda ordem e, em relação as isotermas de adsorção, a isoterma de Freundlich melhor representou os dados experimentais. O estudo demonstrou que o bagaço de cana-de-açúcar apresenta potencial no tratamento de efluentes contendo corante Amarelo Reativo B2R.

Palavras-chave: Biossorção. Corante. Bagaço de cana-de-açúcar. Cinética. Isotermas.

ABSTRACT

ALMEIDA, Lariana Negrão Beraldo de. **Removal of dye Reactive Yellow B2R using Sugarcane Bagasse**. Defesa realizada em 2015. 64. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Química - Federal Technology University - Parana. Ponta Grossa, 2015.

Dyeing steps in the textile industries have great importance in the processing of this tissue, however, large part of the dyes used to impart color to fabrics are discarded in subsequent washes, because that dyes do not settle 100% to textile fiber. Thus, the generated effluents present, in addition to other components, a dye in their composition. Conventional treatments applied not boil down just a step, but, many biological, physical and chemical methods. In the color removal by adsorption, activated carbon is widely used as adsorbent, however, it has a high cost and difficulty desorption of it. Thus, low-cost techniques in order to remove this coloration of waste water are studied. In this context, the present study was based in studying and defining the best conditions, equilibration time and amount of adsorbent required to remove the dye Reactive Yellow B2R in synthetic solution using sugarcane bagasse. Besides these parameters, the kinetic models: pseudo-first order kinetic models, pseudo-second order and intraparticle diffusion as in the Langmuir and Freundlich adsorption isotherm in the results obtained experimentally. The tests performed determined that at pH 1.5 the higher removal occurred, the time required to reach equilibrium was 36 hours, in this case the system was subjected to 30°C of temperature and agitation of 110 rpm. Moreover, from the kinetic models studied the best adjustment of the kinetic model was the pseudo-second order. Among the adsorption isotherms and, the Freundlich isotherm, was best represented the experimental data. The study demonstrated that the sugarcane bagasse shows potential in the treatment of effluents that contains the dye Reactive Yellow B2R.

Keywords: Biosorption. Dye. Sugarcane Bagasse. Kinetics. Isotherm.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1- Isotermas de adsorção..... | 32 |
| Figura 2 - Sequência dos experimentos realizados..... | 36 |
| Figura 3 - Resultados teste de precipitação | 44 |
| Figura 4 - Leitura da solução inicial realizada no espectrofotômetro UV-Vis | 45 |
| Figura 5 - Resultados teste de influência do pH da solução. | 46 |
| Figura 6 – Perfil cinético da biossorção do corante Amarelo Reativo B2R pelo bagaço de cana-de-açúcar..... | 49 |
| Figura 7 - Modelo cinético pseudo-segunda ordem ajustado aos dados experimentais..... | 52 |
| Figura 8 – Variação do q_{eq} no tempo..... | 52 |
| Figura 9 -Dados experimentais ajustados as isotermas (a) Langmuir e (b) Freundlich | 55 |
| Figura 10 - Resultado análise FTIR para o bagaço de cana-de-açúcar | 57 |
| Figura 11 – Comparação das curvas obtidas em análise FTIR: (a) apenas bagaço de cana-de-açúcar e (b) bagaço de cana-de-açúcar com corante..... | 58 |
| Figura 12 - Identificação das alterações na curva (b) de bagaço de cana-de-açúcar com corante..... | 59 |
| | |
| Fotografia 1 - Bagaço de cana-de-açúcar | 37 |
| Fotografia 2 - Corante Amarelo Reativo B2R utilizado no estudo | 38 |
| Fotografia 3 - Agitador de peneiras para análises granulométricas eletromagnético. | 40 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Classificação de corantes têxteis, suas características e associações com fibras | 19 |
| Tabela 2 - Propriedades do corante Amarelo Reativo B2R..... | 21 |
| Tabela 3- Diâmetros médios das partículas analisadas | 40 |
| Tabela 4 - Dados preparo da biomassa | 43 |
| Tabela 5- Resultados teste de granulometria..... | 47 |
| Tabela 6 - Resultados teste cinéticos..... | 48 |
| Tabela 7 - Modelos cinéticos estudados e suas respectivas equações lineares..... | 50 |
| Tabela 8 - Parâmetros cinéticos obtidos pelo ajuste dos dados experimentais aos modelos cinéticos pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem e difusão intrapartícula..... | 50 |
| Tabela 9 - Resultados obtidos no teste de equilíbrio..... | 53 |
| Tabela 10 - Equações lineares para as isotermas de adsorção: Freundlich e Lagmuir | 53 |
| Tabela 11 - Parâmetros e coeficientes de correlação obtidos para as respectivas isotermas de adsorção | 54 |
| Tabela 12 - Valores bases para as absorções de grupos funcionais | 57 |

LISTA DE ABREVIATURAS, LETRAS GREGAS E ACRÔNIMOS

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|--------|-------------------------------|
| DBO | Demanda biológica de oxigênio |
| DQO | Demanda química de oxigênio |
| RPM | Rotações por minuto |
| pH | Potencial Hidrogeniônico |
| UV-Vis | Ultravioleta visível |

LISTA DE LETRAS LATINAS

| | |
|-----------|--|
| b | Constante de Langmuir ($L\ mg^{-1}$) |
| C_0 | Concentração inicial do corante ($mg\ L^{-1}$) |
| C_{eq} | Concentração do corante em solução não adsorvido em equilíbrio ($mg\ L^{-1}$) |
| K_1 | Constante cinética do modelo pseudo primeira-ordem (min^{-1}) |
| K_2 | Constante cinética do modelo pseudo segunda-ordem (min^{-1}) |
| K_F | Constante de Freundlich |
| K_i | Constante cinética de difusão intrapartícula ($mg\ g^{-1}\ min^{-1/2}$) |
| m_s | Massa seca do material biossorvente (g) |
| n_F | Constante de Freundlich |
| q_{eq} | Quantidade de corante adsorvido no equilíbrio (mg de poluente g^{-1} de biossorvente) |
| $q_{máx}$ | Quantidade máxima adsorvida do corante por unidade de massa (mg de poluente g^{-1} de biossorvente) |
| q_t | Quantidade de corante adsorvido em um tempo específico (mg de poluente g^{-1} de biossorvente) |
| t | Tempo (min^{-1}) |
| V | Volume da solução no sistema (mL) |

LISTA DE ACRÔNIMOS

| | |
|--------|--|
| CONAMA | Conselho Nacional do Meio Ambiente |
| CETESB | Companhia Ambiental do Estado de São Paulo |
| UTFPR | Universidade Tecnológica Federal do Paraná |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA | 15 |
| 1.2 OBJETIVO GERAL | 15 |
| 1.2.1 Objetivos Específicos | 15 |
| 1.3 JUSTIFICATIVA | 16 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO | 17 |
| 2.1 INDÚSTRIA TÊXTIL | 17 |
| 2.1.1 Etapa de Tingimento | 18 |
| 2.2 CORANTES TÊXTEIS | 18 |
| 2.2.1 Classificação dos Corantes | 19 |
| 2.2.2 Corante Amarelo Reativo B2R | 20 |
| 2.3 EFLUENTES TÊXTEIS | 21 |
| 2.3.1 Tratamento Biológico | 22 |
| 2.3.2 Tratamento químico | 23 |
| 2.3.3 Tratamento físico | 24 |
| 2.4 BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR | 25 |
| 2.5 BIOSSORÇÃO | 26 |
| 2.6 CINÉTICA DE ADSORÇÃO | 28 |
| 2.6.1 Modelo Cinético Pseudo-primeira Ordem | 29 |
| 2.6.2 Modelo Cinético Pseudo-segunda Ordem | 29 |
| 2.6.3 Modelo Cinético Difusão Intrapartícula | 30 |
| 2.7 ISOTERMAS DE ADSORÇÃO | 31 |
| 2.7.1 Isoterma de Langmuir | 33 |
| 2.7.2 Isoterma de Freundlich | 34 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS | 36 |
| 3.1 PREPARO DA BIOMASSA | 37 |
| 3.2 PREPARO DAS SOLUÇÕES E DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DO CORANTE | 37 |
| 3.2.1 Curva de calibração | 38 |
| 3.3 TESTES PRILIMINARES | 38 |
| 3.3.1 Influência do pH sobre a banda de absorção do corante | 38 |
| 3.3.2 Teste de influência do pH na biossorção | 39 |
| 3.3.3 Teste de granulometria | 39 |
| 3.4 TESTE CINÉTICO | 41 |
| 3.4.1 Modelos Cinéticos | 41 |
| 3.5 TESTE DE EQUÍLIBRIO | 41 |
| 3.5.1 Isotermas de adsorção | 42 |

| | |
|--|-----------|
| 3.6 CARACTERIZAÇÃO DO BIOSSORVENTE | 42 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 43 |
| 4.1 PREPARO DA BIOMASSA..... | 43 |
| 4.2 TESTES PRELIMINARES | 43 |
| 4.2.1 Influência do pH sobre a banda de absorção do corante..... | 43 |
| 4.2.2 Teste de influência do pH | 45 |
| 4.2.3 Teste de granulometria | 47 |
| 4.3 TESTE CINÉTICO | 48 |
| 4.3.1 Cinética de adsorção | 50 |
| 4.4 TESTE DE EQUILIBRIO..... | 53 |
| 4.4.1 Isotermas de Adsorção | 53 |
| 4.5 CARACTERIZAÇÃO DO BIOSSORVENTE | 56 |
| 5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 60 |
| 5.1 CONCLUSÃO | 60 |
| 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 61 |
| REFERÊNCIAS..... | 62 |

1 INTRODUÇÃO

Face ao processo de globalização e evolução que se faz presente na sociedade, o setor industrial vem crescendo com o passar dos anos, visando atender as necessidades da população que se torna cada vez mais exigente e atua numa constante busca por inovações e praticidade.

A indústria têxtil participa significativamente no setor industrial como um todo, transformando matérias-primas em diversos artigos do cotidiano.

Neste contexto, os processos têxteis apresentam elevada importância, e a produção envolve diversas etapas, sendo a água utilizada em grande volume durante todo o processo. Na etapa de tingimento é conferida cor ao tecido o que a caracteriza como uma fase muito importante no beneficiamento do material. Os corantes que não se fixam a fibra do tecido são descartados na etapa de lavagem. Tingir um tecido depende de fatores como o tipo de fibra têxtil, corantes que serão utilizados, entre outros (OLIVEIRA, 2013).

Os corantes sintéticos são amplamente utilizados neste processo de tingimento, sendo os corantes reativos os mais empregados pelas indústrias de processamento têxtil devido ao fato de apresentarem alta solubilidade em água, estabilidade química, além da obtenção de diversas tonalidades, contudo, apresentam efluentes com coloração intensa que, mesmo em concentrações baixas são perceptíveis a “*olho nu*”; gerando impacto nos corpos receptores (GUSMÃO, 2014).

Além de apresentarem forte coloração, os efluentes gerados nas indústrias têxteis possuem alta demanda química e biológica de oxigênio, sólidos totais dissolvidos entre outros componentes que fazem com que este efluente necessite de tratamentos prévios antes de serem descartados (HONORIO, 2013).

Dentre os diversos métodos químicos, físicos e biológicos utilizados no tratamento destas águas residuais, os processos de sorção se apresentam com elevada eficiência e simplicidade de aplicação na remoção de cor. O carvão ativado é muito empregado como adsorvente neste processo de sorção, no entanto apresenta alto custo o que pode inviabilizar o processo (SCHEUFELE et al., 2014).

Deste modo, estudos são realizados em busca de adsorventes economicamente viáveis e que sejam efetivos na remoção de poluentes da água,

como os corantes. Neste contexto, o presente trabalho teve como objeto de estudo a biomassa bagaço de cana-de-açúcar.

A cana de açúcar é uma das principais culturas do agronegócio brasileiro. Ela é utilizada principalmente como matéria prima na fabricação de álcool e açúcar. Durante e posterior produção destes produtos, alguns subprodutos são formados, sendo um dos principais o bagaço de cana-de-açúcar.

O bagaço de cana-de-açúcar é produzido em grandes quantidades, e aproximadamente 50% é empregado na geração de energia em usinas e destilarias, contudo quantidade significativa ainda fica como excedente apresentando problemas em seu acondicionamento e preocupações ambientais (SCHEUFELE et al., 2014).

Deste modo, utilizar o volume excedente do bagaço de cana-de-açúcar em aplicações alternativas à queima pode apresentar ganhos financeiros e também ambientais.

1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Qual a capacidade de remoção do corante Amarelo Reativo B2R em solução aquosa utilizando bagaço de cana-de-açúcar?

1.2 OBJETIVO GERAL

Avaliar a capacidade de remoção do corante Amarelo Reativo B2R em solução aquosa utilizando bagaço de cana-de-açúcar.

1.2.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Executar testes preliminares para a identificação dos principais parâmetros que podem influenciar no processo de remoção;
- Realizar teste cinético para verificar o tempo de equilíbrio e a cinética de adsorção;

- Desenvolver teste de equilíbrio para a avaliação da quantidade necessária de bagaço de cana-de-açúcar na remoção do corante Amarelo reativo B2R, bem como a isoterma de adsorção.

1.3 JUSTIFICATIVA

Justifica-se o presente trabalho face ao processo de contaminação do meio ambiente pelos efluentes advindos da indústria têxtil, quando estes são descartados de maneira inapropriada. Procedimentos que visam recuperação de ambientes com áreas contaminadas são movidos por pesquisas que almejam novas tecnologias na remoção de poluentes, de modo a minimizar o impacto ambiental causado pelos agentes poluidores, como os efluentes industriais.

Dentre os procedimentos já utilizados para o tratamento de resíduos líquidos têxteis, o método de sorção apresenta-se como uma técnica bastante aplicada, e diversos estudos objetivam identificar materiais adsorventes de baixo custo operacional que possam otimizar o tratamento dos efluentes, de modo a não necessariamente substituir os métodos já existentes, mas sim, acrescentar e potencializar a remoção de corantes em água.

Tem-se como exemplos de estudos já realizados: Ferrari (2009) que verificou a remoção do corante de efluentes da indústria têxtil utilizando processos com membranas e adsorção em bagaço de laranja; Gusmão (2014) que analisou a adsorção de dois corantes catiônicos e de uma etaramina utilizando bagaço de cana modificados quimicamente e Scheufele et.al (2014) que avaliou a aplicação do bagaço de cana-de-açúcar como material adsorvente na remoção do corante reativo azul 5G. As pesquisas citadas identificaram resultados satisfatórios e deste modo potenciais adsorventes no processo de remoção de corantes.

Neste contexto, fundamenta-se a utilização do bagaço de cana-de-açúcar para o estudo de remoção do corante Amarelo Reativo B2R em água, por ser um subproduto gerado na produção de etanol e açúcar e que, embora utilizado para a queima e geração de energia, o volume excedente deste subproduto poderá ter uma aplicação e aproveitamento na remoção do corante.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste tópico são descritas características da indústria têxtil, dos corantes reativos, os efluentes têxteis e seus tratamentos convencionais, o processo de biossorção, cinética de adsorção, isoterma de adsorção e o adsorvente envolvido nesta pesquisa, o bagaço de cana de açúcar.

2.1 INDÚSTRIA TÊXTEL

A indústria têxtil é de grande importância para a economia de diversos países, no Brasil este mercado encontra-se entre os principais setores da atividade industrial nacional.

Para a produção na indústria têxtil, necessita-se de grande volume de água, segundo Oliveira (2013), é preciso entre 80 a 150 litros de água para a fabricação de 1 kg de tecido. A produção é dividida em diversos momentos inter-relacionados, sendo basicamente composta por quatro partes: fiação, tecelagem, beneficiamento ou acabamento de tecidos e confecção.

A etapa de fiação é a fase em que acontece a preparação e produção dos fios que servirão de matéria prima para a tecelagem. A etapa de tecelagem é o período em que ocorre a transformação dos fios em tecidos. Em seguida, acontece a etapa de beneficiamento ou acabamento, que constitui operações que irão atribuir ao tecido propriedades como coloração, durabilidade, conforto entre outras características, e por fim, a etapa de confecção que é onde ocorre o desenho, desenvolvimento de moldes, corte e costura (HIRATUKA et al., 2008).

Na etapa de beneficiamento do tecido, umas das fases mais importantes é o tingimento, no qual irá conferir ao tecido a coloração desejada. Posterior a esta etapa, tem-se as lavagens, fazendo com que o corante que não se fixou ao tecido seja descartado junto com os efluentes (FERRARI, 2009).

Deste modo, estes efluentes apresentam forte coloração por conta da utilização de diversos corantes, como também apresentam características específicas devido o emprego de produtos químicos usados como auxiliares durante todo o processo (HONORIO, 2013).

2.1.1 Etapa de Tingimento

A etapa de tingimento é considerada um dos processos mais significativos para a produção têxtil e, para que o produto final apresente bons resultados quanto a coloração é preciso escolher corretamente o método e materiais empregados.

Esse processo é fundamental no sucesso nas vendas dos produtos gerados, além de padronização e beleza da coloração, o consumidor exige outras características como elevado grau de fixação em relação à luz, transpiração e lavagem tanto no início quanto após prolongado uso (GUARATINI E ZANONI, 2000).

Neste contexto, diversos corantes e substâncias auxiliadoras na fixação são estudadas e fabricadas ao longo dos anos, apresentando uma gama de diversidade de compostos químicos.

Essa variedade é justificada também, uma vez que cada fibra de tecido se relaciona com corantes de características próprias, fazendo com que a escolha desse composto colorido a ser utilizado dependa de fatores como a natureza da fibra têxtil, características estruturais, considerações econômicas, classificação dos corantes entre outros (OLIVEIRA, 2013).

No tingimento, geralmente a fixação do corante no tecido acontece a partir de uma solução aquosa, e esta fixação pode envolver diferentes interações tais como ligação iônica, interações de Van der Waals, interação de hidrogênio e interações covalentes (OLIVEIRA, 2013).

2.2 CORANTES TÊXTEIS

O interesse em utilizar substâncias que proporcionem coloração a tecidos e outros produtos não é recente, teve início há muitos anos com os corantes naturais que eram captados de fontes vegetais e animais.

Como exemplo, têm-se a utilização do Pau-brasil (*Caesalpinia echinata*) que foi significativa fonte de corante de coloração vermelha no século XVI (VELOSO, 2012).

O primeiro corante sintético a ser fabricado foi o Mauve ou Malva em 1856, por Willian H. Perkin. A coloração avermelhada chamou atenção do cientista que logo montou uma indústria para a fabricação do corante. Posterior a esta descoberta

começaram a surgir outros cientistas interessados em sintetizar novos corantes (ABIQUIM, 2014).

Atualmente os diversos corantes sintéticos já descobertos são aplicados em variados processos de fabricação, tais como em alimentos, cosméticos, fertilizantes e tintas.

2.2.1 Classificação dos Corantes

A molécula de corante possui dois componentes principais: o grupo denominado cromóforo (antraquinona, azo, nitro, carbonilas, etc), que proporciona a cor e o grupo responsável pela fixação do corante à fibra têxtil (OLIVEIRA, 2013).

A classificação pode acontecer tanto quanto ao modo de fixação quanto pelo grupo cromóforo. Em relação aos corantes classificados quanto ao modo de fixação tem-se alguns exemplos: corantes ácidos, corantes básicos, corantes diretos, corantes reativos e corantes sulforosos (HONORIO, 2013). No presente estudo foi utilizado o corante que é classificado como reativo.

A Tabela 1 apresenta alguns dos principais corantes classificados quanto ao modo de fixação e suas respectivas características.

Tabela 1 – Classificação de corantes têxteis, suas características e associações com fibras

| Classe | Característica | Substrato (Fibra) | Interação Corante/Fibra |
|-----------|----------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| Ácido | Aniônico, solúvel em água | Nylon, lã, seda | Eletrostática, ligação de hidrogênio |
| Básico | Catiônico, solúvel em água | Nylon modificado, poliéster | Atração eletrostática |
| Direto | Aniônico, solúvel em água | Algodão, rayon, couro, nylon | Forças intermoleculares |
| Reativo | Aniônico, solúvel em água | Algodão, nylon, seda, lã | Ligação covalente |
| Sulforoso | Coloidal insolúvel | Algodão, rayon | Ligação covalente |

Fonte: Adaptado de Honorio (2013, p.11)

Existem diversos tipos de corantes reativos, muitos deles apresentam como grupo cromóforo a função azo, denominados azocorantes, estes grupos são caracterizados por apresentarem um ou mais grupamentos –N-N- ligados a aromáticos (ALMEIDA, 2006).

Silva (2012) tendo como referência Moscofian (2009) ressalta que dentre as diversas classificações de corantes, os corantes reativos são os mais utilizados, pois apresentam alta solubilidade em água e possuem grupo reativo que irá formar ligações covalentes com a fibra ocasionando a alta estabilidade química e fotolítica, além de permitir a obtenção de várias tonalidades.

Nos corantes classificados como reativos, o grupo eletrofílico (reativo) forma ligações covalentes com diferentes grupos de determinadas fibras, tais como:

- Hidroxila das fibras celulósicas (algodão);
- Amino, tióis e hidroxila das fibras proteicas (lã, seda);
- Amino das poliamidas (nylon).

Proporcionando maior estabilidade, quando comparada a outros diferentes corantes (SILVA, 2012).

De acordo com Honorio (2013), os corantes reativos demonstram grau de fixação, entre 60 e 90%. O que, quando consumido em elevadas quantidades pode aumentar os problemas ambientais, visto que uma porcentagem do corante é fixada à fibra e outra parte é descartada juntamente com os efluentes têxteis que pode contaminar organismos vivos e corpos d'água.

2.2.2 Corante Amarelo Reativo B2R

O corante têxtil utilizado para estudo neste presente trabalho foi o corante Amarelo Reativo B2R ou também denominado Amarelo Reafix B2R obtido por doação da Empresa AGS Química.

A Tabela 2 apresenta as principais características deste corante.

Tabela 2 - Propriedades do corante Amarelo Reativo B2R

| Composição | |
|-----------------------------|---|
| Grupo cromóforo | Azo |
| Nome químico ou genérico | Sódio 7-[[2-[(aminocarbonil) amino]-4-[[4-[[5-amino-4-sulfo-2-[[4- sulfox)etil]sulfonil]fenil] azo]fenil]amino]-6-Cloro-1,3,5-triazin-2-il]amino]fenil]azo]-1,3,6-naftalenotrisulfonato |
| Propriedade físico-químicas | |
| Estado físico | Sólido |
| Cor | Castanho avermelhado |
| Odor | Inodoro |
| pH | 6,8 (20 gL ⁻¹) |
| Ponto de fusão | 400 °C |
| Solubilidade em água | 100 gL ⁻¹ a 30°C |

Fonte: Adaptado de FISPQ (2008)

Além do mais, em relação aos perigos quanto a este corante, destaca-se a nocividade para organismos aquáticos, podendo causar, em longo prazo, efeitos adversos (FISPQ, 2008).

2.3 EFLUENTES TÊXTEIS

Os efluentes têxteis são os fluidos residuais provenientes de etapas da produção, sua composição é diversificada o que dificulta muitas vezes o tratamento.

Como consequência da utilização de corantes durante o beneficiamento dos tecidos, as águas residuais apresentam forte coloração. Uma solução contendo 1 mgL⁻¹ já se torna visível ao olho humano, e tais efluentes podem atingir uma concentração de até 300 mgL⁻¹. A existência de corantes em corpos d'água, prejudica a transparência e ocasiona redução da penetração de luz na água, o que faz diminuir a eficiência da fotossíntese em plantas aquáticas apresentando efeito nocivo ao seu desenvolvimento (OLIVEIRA, 2013).

Dentre as modificações ocorridas num corpo d'água receptor através do lançamento de rejeitos têxteis, além da mudança de coloração, poderá apresentar também a formação de espumas na superfície, que ocasiona a limitação da capacidade do corpo d'água em autodepuração, pois, minimiza a proporção de oxigênio transmitido por meio da superfície da água (RODRIGUES FILHO, 2012).

A indústria têxtil é identificada como um dos setores industriais que mais consomem água em sua produção e as características dos resíduos líquidos variam de acordo com o tecido a ser fabricado, o corante aplicado, o processo de beneficiamento e equipamentos utilizados (RODRIGUES FILHO, 2012).

Honorio (2013) relata que as águas residuais contêm alta demanda química (DQO) e biológica (DBO) de oxigênio, sólidos totais dissolvidos (STD) e coloração intensa, o que pode afetar a vida aquática diretamente e também aos seres humanos.

Neste contexto, para que os efluentes têxteis sejam lançados em corpos d'água, são necessários procedimentos de tratamento que minimizarão os efeitos das substâncias tóxicas presentes no mesmo.

De modo geral, os tratamentos dos rejeitos industriais são realizados no sentido de atender às disposições da Resolução CONAMA nº 430 de 13 de maio de 2011, que “dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA”.

Em relação aos métodos convencionais de tratamento para os efluentes têxteis, segundo Schimmel (2008), diferentes procedimentos são empregados na remoção de corantes e compostos químicos, geralmente estes processos são baseados em tratamento biológico, via sistemas de lodo ativado, tratamentos químicos e físicos.

2.3.1 Tratamento Biológico

O tratamento biológico via lodo ativado, de acordo com Oliveira (2013), dispõe de diferentes microrganismos como, por exemplo, bactérias, para catalisar a degradação de corantes. Esse processo é bastante eficiente na diminuição de DBO em tempos consideravelmente pequenos.

Esse método consiste em agitação do efluente na presença de microrganismo e ar durante determinado período necessário para metabolizar e flocular porção considerável da matéria orgânica (SCHIMMEL, 2008).

Rodrigues Filho (2012) cita que o método biológico do tipo lodo ativado, é bastante aplicado em razão da estabilidade, do baixo custo de execução, bem como em função da redução da matéria orgânica, contudo, apresenta baixa eficiência na

retirada de cor quando os efluentes contêm corantes reativos, já que estes demonstram estabilidade química, sendo resistente a degradação biológica, além de que, todo o processo gera grande volume de lodo.

2.3.2 Tratamento químico

Os métodos químicos envolvem a adição de substâncias químicas ao efluente para que haja a degradação dos compostos poluentes. Essa metodologia abrange diversas técnicas, sendo as mais utilizadas: coagulação/floculação que são empregadas para a retirada de matéria orgânica, turbidez, material coloidal e também cor (RODRIGUES FILHO, 2012).

Essa técnica tem como desvantagem as elevadas dosagens de produtos químicos como floculantes e apresentam-se pouco degradáveis (RODRIGUES FILHO, 2012).

Para a retirada de cor, o processo químico de oxidação é comumente utilizado devido a simplicidade de aplicação. Os corantes mais modernos apresentam resistência a condições moderadas de oxidação, deste modo, maior parte de cor deve ser removida quando se aplica compostos oxidantes mais poderosos como o cloro, ozônio, UV/peróxido, UV/Ozônio entre outros. (OLIVEIRA, 2013).

Contudo, esses procedimentos de oxidação apresentam a desvantagem de serem relativamente caros e a acumulação de lodos concentrados, criando um problema no tratamento de resíduos (OLIVEIRA, 2013).

De acordo com Rodrigues Filho (2012), a técnica de ozonização, que é uma técnica química de oxidação, consiste na adição de ozônio ao efluente para que haja a decomposição dos compostos orgânicos. Esse procedimento se mostra efetivo na redução de cor, contudo é preciso grande quantidade de gás para obter a descoloração necessária e a degradação do corante pode resultar em metabólicos mais tóxicos que o corante original.

2.3.3 Tratamento físico

Os tratamentos físicos em sua maior parte realizam a depuração ou separação do poluente do efluente, não destruindo estes compostos, e sim, atuando na transferência de fase e redução de volume (OLIVEIRA, 2013).

De maneira geral, o tratamento Físico consiste na retirada de substâncias do efluente através de técnicas físicas de separação. De acordo com Oliveira (2013), os principais tratamentos físicos envolvem: separação de fases que incluem, filtração, centrifugação, sedimentação, decantação e flotação; transição de fases que compreende a destilação e cristalização; transferência de fases que envolve a extração por solventes e adsorção, e separação molecular que abrange a hiperfiltração, ultrafiltração, osmose reversa e diálise.

Segundo Rodrigues Filho (2012), dentre os principais métodos físicos utilizados na indústria têxtil, as principais técnicas que auxiliam na remoção de cor são: filtração por membranas (separação molecular) e adsorção (transferência de fases).

A filtração por membranas consiste na filtração utilizando membranas com específicos tamanhos de poros. Para a retirada de corantes reativos geralmente utiliza-se a nanofiltração (dimensões dos poros de 1nm) (RODRIGUES FILHO, 2012).

Honorio (2013), ressalta que a técnica de filtração por membranas é eficaz na retirada dos corantes, contudo pode apresentar algumas desvantagens tais como: alto custo da membrana, incrustação na superfície da membrana e considerável consumo de energia.

Por outro lado, a adsorção é uma técnica de equilíbrio entre duas diferentes fases: líquida-sólido ou gás-sólido. Esse método fundamenta-se no fenômeno físico de transferência de massa. A separação acontece quando a fase fluida (líquida ou gasosa) entra em contato com a fase sólida denominada adsorvente, que consegue reter um ou mais componentes contidos no fluido. O adsorvato (soluto adsorvido) mantém-se na superfície ou nos poros do sólido (adsorvente) (PIETROBELLI, 2012).

Segundo Schimmel (2008) um dos adsorventes mais utilizados industrialmente é o carvão ativado, cuja adsorção é significativa, no entanto representa alto investimento pela dificuldade de dessorção do mesmo.

Assim, uma vez que a adsorção é o processo em que as moléculas de um fluido se aderem a camada superficial do adsorvente, a dessorção é o processo inverso (PIETROBELLI, 2012).

Visto que o carvão ativado, composto mais utilizado na adsorção de corantes de efluentes, necessita-se de significativo investimento, diversos estudos são realizados (HONORIO, 2013; ZEFERINO et al.,2013; GUSMÃO, 2011; BRUNO, 2008; OLIVEIRA, 2013) em busca de novos materiais biossorventes que possam apresentar grande remoção, bem como, baratear o processo. O presente estudo utilizou como biossorvente o bagaço de cana-de-açúcar.

2.4 BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

O Brasil apresenta diversas atividades industriais agrícolas, e estas produzem volume significativo de resíduos que, em muitas vezes, são descartados sem aproveitamento. Neste sentido a utilização de rejeitos agrícolas como material biossorvente para a remoção de poluentes em efluentes industriais, pode ter impacto positivo em relação do ponto de vista econômico e ambiental.

A cana de açúcar é a principal matéria prima para a fabricação de etanol e açúcar. Produtos estes, muito utilizados no cotidiano da população.

Segundo Carvalho (2014, p. 27), a cana de açúcar é “uma gramínea pertencente à classe Monocotiledônea, ordem Cyperales, família Poaceae e gênero *Saccharum*, que abrange várias espécies”.

Conforme CETESB (2014), o maior produtor mundial de cana-de-açúcar é o Brasil, sendo o estado de São Paulo o principal fornecedor. E de acordo com IGBE (2013) na região sul do país, praticamente o estado do Paraná domina a cultura de cana-de-açúcar com 98% da produção de cana-de-açúcar.

Dentre os subprodutos gerados nos processos de obtenção de álcool e açúcar, o bagaço de cana é um subproduto da cana após a moagem, e sua produção é de aproximadamente 250 kg de bagaço para 1 tonelada de cana processada (CETESB, 2014).

Segundo Gusmão (2011), em geral, o bagaço de cana-de-açúcar apresenta aproximadamente 30% de massa da cana e uma umidade em torno de 50%. A composição química pode variar de acordo com o tipo de cana, tipo de solo,

métodos de colheita, mas em geral gira em torno de 50% de celulose, 27% de hemicelulose e 23% de lignina.

Dentre as aplicações para o bagaço de cana, a cogeração de energia é uma atividade cada vez mais comum no setor sucroalcooleiro (DANTAS FILHO, 2009).

Para Cardoso (2011 p. 08) “Cogeração consiste no processo de transformação de energia térmica de um combustível em mais de uma forma de energia útil”. Energia mecânica e elétrica são as formas mais frequentes dessa transformação.

Esta prática gera poluentes como o monóxido e dióxido de carbono, material particulado, óxidos de nitrogênio, e também cinzas residuais destinadas a aterros (CETESB, 2014).

Scheufele (2014) relata que aproximadamente 50% é utilizado como fonte de energia e o restante é armazenado, o que faz com que este excedente cause problemas de armazenamento e preocupações com questões ambientais.

Alguns estudos do uso de bagaço de cana-de-açúcar como biossorvente de diversos poluentes podem ser encontrados, tais como na utilização na biossorção de corantes básicos (HO; CHIU; WANG, 2005) e na remoção do corante azul reativo 5G (SCHEUFELE, 2014), ambos os trabalhos concluíram que o bagaço de cana-de-açúcar apresenta potencial na retirada destes poluentes, devido a capacidade de remoção apresentada como também por sua disponibilidade no ambiente.

Neste contexto, o bagaço de cana-de-açúcar que é um subproduto da agroindústria se apresenta como um adsorvente em potencial na remoção de poluentes, que no presente estudo é o corante Amarelo Reativo B2R.

2.5 BIOSSORÇÃO

O método de biossorção, em geral, não é definido somente por um único mecanismo e de acordo com Pietrobelli (2012) que teve como referência Volesky e Holan (1995) esses mecanismos se diferem em relação a origem da biomassa, espécie utilizada e o procedimento aplicado. A autora ainda descreve os principais mecanismos que a biossorção pode acontecer, são eles:

(1) complexação (formação de um complexo a partir da associação de duas espécies); (2) coordenação (ligação de um átomo central de um complexo com outros átomos por ligação covalente); (3) quelação (complexos formados por um composto orgânico unido ao metal por pelo menos dois sítios); (4) troca iônica (intercâmbio de íons formando espécies moleculares); (5) adsorção (através da superfície do tecido orgânico); (6) precipitação inorgânica (alteração no meio aquoso levando à precipitação (PIETROBELLI, 2012).

Para Oliveira (2013), um dos melhores métodos de tratamento de efluentes têxteis na remoção de corantes é a técnica de adsorção.

O método denominado biossorção, segundo Pietrobelli (2012), fundamenta-se na ligação de determinado componente presente em fase fluida (adsorvato) à um biossorvente (sólido) de origem natural, em geral biomassa.

Para Cardoso (2011, p. 09) que teve como referência NOS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) (2011), a definição de biomassa consiste em “qualquer matéria orgânica que possa ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica”, em relação a sua origem pode ser classificada como: florestal, agrícola (exemplo a cana-de-açúcar) e rejeitos urbanos e industriais.

Pietrobelli (2012) cita que, a biossorção não envolve energia metabólica ou transporte, embora quando utilizado biomassa viva, os dois processos podem acontecer simultaneamente, dado que a técnica de biossorção pode ocorrer com biomassa viva ou morta. No presente estudo a biomassa utilizada é classificada como morta.

O método de biossorção se torna interessante quando a biomassa estudada é de baixo custo e exige poucos tratamentos prévios.

Segundo Honorio (2013), um biossorvente de baixo custo é aquele que se apresenta em grande quantidade na natureza, necessita-se de poucos procedimentos ou é um subproduto industrial.

Além da viabilidade econômica, o estudo dos biossorventes ainda abrange, análise da capacidade máxima de sorção, cinéticas de sorção, tempo de contato, tamanho das partículas, bem como pH da solução, concentração da solução entre outros (PIETROBELLI, 2012).

O pH é uma das variáveis mais importantes, que pode influenciar a biossorção e também a solubilidade de corantes específicos pois, pode afetar a estrutura química do corante e a superfície do sólido (adsorvente) (BRUNO, 2008).

O tamanho das partículas do adsorvente refere-se à área de contato (superfície) do sólido, sendo um fator que se relaciona com a cinética de adsorção podendo afetar a eficiência da biossorção (HONORIO, 2013).

A cinética de adsorção e o tempo de equilíbrio são dois parâmetros muito importantes no estudo, visto que são utilizados para identificar características da reação que acontece no processo de sorção.

2.6 CINÉTICA DE ADSORÇÃO

Durante o contato do adsorvente/adsorvato, a concentração do componente poluente em solução aquosa tende a diminuir com o tempo e, em determinado momento alcança um valor em que não há mais variação, chegando-se a um estado de equilíbrio.

Honorio (2013) afirma que dois parâmetros são essenciais no estudo da adsorção, a cinética de adsorção e tempo de equilíbrio, a primeira determina a velocidade de adsorção das moléculas (adsorvato) ao adsorvente e a segunda define o tempo de residência necessário para a adsorção total.

Os modelos cinéticos são utilizados para determinar a taxa de adsorção do processo. A adsorção de um composto, como o corante, de uma solução aquosa em um adsorvente (sólido), pode apresentar cinética muitas vezes complexa, isso vai depender de características físicas e químicas do adsorvente bem como da transferência de massa do processo (GUSMÃO et al., 2012).

Diferentes modelos cinéticos são capazes de descrever o processo de adsorção. Craesmeyer (2013) relata que, é possível encontrar mais de 25 destes modelos na literatura, sendo cada modelo baseado em considerações teóricas e experimentais. Entretanto, no geral, as cinéticas de adsorção são descritas pelos modelos de pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem e difusão intrapartícula.

Segundo Pietrobelli (2012), os métodos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem adotam que a força motriz de adsorção é a diferença entre a concentração da fase sólida, em qualquer tempo do processo, e a concentração da fase sólida no equilíbrio, sendo que no caso pseudo-primeira ordem a taxa de adsorção global é proporcional à força motriz, e no caso pseudo-segunda ordem é proporcional ao quadrado da força motriz. Estes dois modelos descrevem que a

cinética de adsorção é controlada principalmente pela difusão externa, assumindo que a resistência à transferência de massa acontece na camada externa do sólido.

O método de difusão intrapartícula é derivado da Lei de Fick no qual segundo Pietrobelli (2012, p. 42) admiti que “a difusão do filme líquido que cerca o adsorvente é desprezível e a difusão intrapartícula é a única taxa que controla as etapas do processo de adsorção”.

2.6.1 Modelo Cinético Pseudo-primeira Ordem

De acordo com Craesmeyer (2013), a equação de pseudo-primeira ordem descrita por Lagergren (1898) foi a primeira equação cinética a descrever a adsorção em sistemas líquido-sólido, fundamentada na capacidade de adsorção do sólido. O autor Craemeyer (2013, p. 23) descreve que o pesquisador Lagergren “partiu do princípio que a velocidade de remoção do adsorvato em relação ao tempo é diretamente proporcional à diferença na concentração de saturação e ao número de sítios ativos do sólido”.

O modelo pseudo-primeira ordem é representada pela equação linear (1):

$$\log(q_{eq} - q_t) = \log(q_{eq}) - \left(\frac{K_1}{2,303} \right) t \quad (1)$$

Em que:

q_{eq} é a quantidade de poluente adsorvido no equilíbrio (mg g^{-1}).

q_t é a quantidade de poluente adsorvido (mg g^{-1}) no tempo t .

K_1 é a constante de velocidade de adsorção de pseudo-primeira ordem (min^{-1}).

Os valores da constante de velocidade K_1 e a quantidade de poluente adsorvido no equilíbrio q_{eq} podem ser obtidos com a inclinação e intersecção da reta do gráfico $\log(q_{eq} - q_t)$ *versus* t , respectivamente. (CRAESMEYER, 2013).

2.6.2 Modelo Cinético Pseudo-segunda Ordem

O modelo cinético pseudo-segunda ordem foi descrito por Ho e Mckay (1998) e, segundo Craesmeyer (2013, p. 25) a equação pseudo-segunda ordem foi

utilizada para “descrever a quimissorção envolvendo forças de valência por meio do compartilhamento ou troca de elétrons entre o adsorvente e o adsorvato”.

Na quimissorção ou adsorção química são formadas ligações químicas entre as moléculas de adsorvato e adsorvente, esse tipo de adsorção é irreversível e exotérmico e mais lento do que a adsorção física (fisissorção), que é a adsorção decorrente das forças intermoleculares de atração entre as moléculas do adsorvato e do adsorvente, nesse processo de adsorção física, não há formação nem quebra de ligações químicas. A adsorção física é considerada reversível e também exotérmica (PIETROBELLI, 2012).

Taffarel (2010) também descreve que o modelo de pseudo-segunda ordem fundamenta-se na suposição de que a adsorção química (quimissorção) é a etapa limitante da reação, podendo acontecer através do compartilhamento de elétrons entre o sólido e o corante.

O modelo pseudo-segunda ordem é representada pela equação linear (2):

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_{eq}^2} + \frac{1}{q_{eq}} t \quad (2)$$

No qual,

q_{eq} é a quantidade de poluente adsorvido no equilíbrio (mg g^{-1})

q_t é a quantidade de poluente adsorvido (mg g^{-1}) no tempo t .

K_2 é a constante de velocidade de adsorção pseudo-segunda ordem ($\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$).

Os valores da constante de velocidade K_2 e a quantidade de poluente adsorvido no equilíbrio q_{eq} podem ser obtidos com a intersecção e inclinação da reta do gráfico t/q_t versus t , respectivamente (CRAESMEYER, 2013).

2.6.3 Modelo Cinético Difusão Intrapartícula

Na adsorção de sólido-líquido, a transferência de massa do soluto pode ser descrita pela transferência de massa externa ou difusão intrapartícula ou os dois processos (CRAESMEYER, 2013).

Conforme descreve Pietrobelli (2012), o processo de transferência de massa que compõem a adsorção acontece em três fases:

1º - Difusão do soluto do íntimo da fase fluida para a superfície externa do adsorvente;

2º - Adsorção do soluto na face superficial do sólido (adsorvente);

3º - Difusão do soluto nos sítios (poros) do sólido (adsorvente).

A velocidade da adsorção é controlada pela fase lenta da reação. Em muitos casos de adsorção a terceira etapa pode ser tão rápida que a leva a ser desprezada. Contudo, quando acontece o inverso, ou seja, a etapa limitante é de difusão do soluto nos sítios do sólido, utiliza-se o modelo de difusão intrapartícula para descrever o comportamento. Esse modelo cinético denominado difusão intrapartícula foi descrito por Weber e Morris (1963) (CRAESMEYER, 2013).

O modelo de difusão intrapartícula é representado pela equação linear (3):

$$q_t = k_i t^{0,5} + C \quad (3)$$

Em que,

q_t é a quantidade de poluente adsorvido (mg g^{-1}) no tempo t .

K_i é a constante de velocidade de difusão intrapartícula ($\text{mg g}^{-1} \text{min}^{1/2}$)

C é o valor da intersecção da reta com o eixo q_t .

Os valores da constante de velocidade K_i e o valor de C podem ser obtidos com a intersecção e inclinação da reta do gráfico q_t versus $t^{0,5}$, respectivamente (CRAESMEYER, 2013).

Segundo Pietrobelli (2012), a difusão intrapartícula geralmente descreve a adsorção por materiais adsorventes com estrutura bastante porosa caracterizados por grande área superficial e estrutura interna bem desenvolvida.

2.7 ISOTERMAS DE ADSORÇÃO

O equilíbrio da adsorção permite avaliar a distribuição do adsorvato entre a fase fluida e a fase sólida (adsorvente), ou seja, a capacidade do adsorvente em remover uma unidade de massa do adsorvato, que é o poluente (PIETROBELLI, 2012).

As isotermas de adsorção, que são equações matemáticas, servem para definir a capacidade de adsorção teórica. É muito importante determinar experimentalmente essas isotermas, pois assim é possível estimar a quantidade de sólido (adsorvente) essencial para o determinado processo de sorção e também dimensionamento dos equipamentos a serem empregados (PIETROBELLI, 2012).

Dentre as isotermas de adsorção, as configurações mais comuns são mostradas na Figura 1.

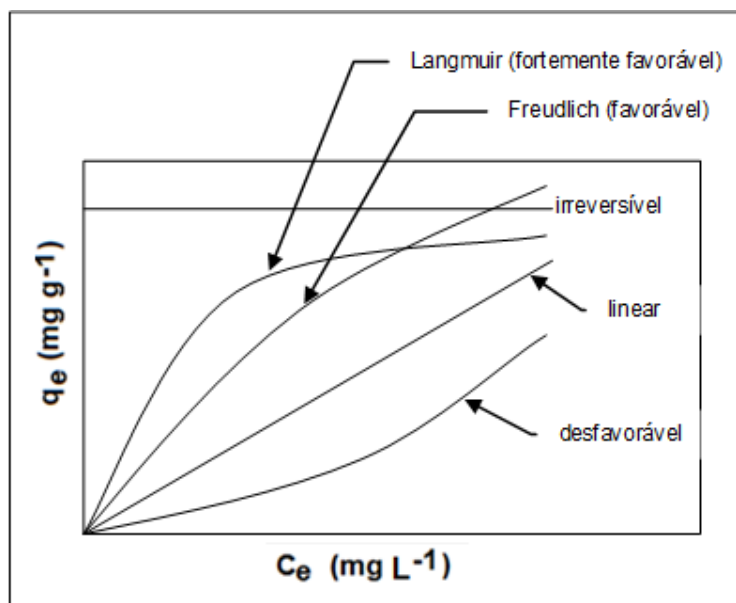


Figura 1- Isotermas de adsorção.
Fonte: Oliveira (2013 apud McCABE et al. 2001, p. 21)

O eixo x representa a concentração de adsorvato na fase fluida (C_e), e o eixo y representa a quantidade de adsorvato no adsorvente (q_e).

A isoterma que indica proporção entre a quantidade adsorvida e a concentração do fluido é a isoterma linear. A isoterma no formato côncavo é a isoterma que indica comportamento não favorável à adsorção. As isotermas convexas são favoráveis à adsorção, pois mesmo em pequenas concentrações de soluto na fase fluida, consegue-se alcançar valores altos de remoção (quantidade adsorvida). As denominadas isotermas irreversíveis acontecem quando a quantidade adsorvida não depende da concentração do soluto, sendo muito favoráveis (PIETROBELLI, 2012).

As isotermas mais utilizadas para descrever o equilíbrio do sistema nos métodos de sorção em tratamento de água e efluentes, são as isotermas de Langmuir (1916) e Freundlich (1906) (CRAESMEYER, 2013).

Para estes dois modelos, o valor da concentração de equilíbrio de cada partícula de poluente no adsorvente é dado pela Equação 4:

$$q_e = \frac{V(C_0 - C_{eq})}{m_s} \quad (4)$$

No qual,

m_s é a massa de biossorvente (g),

C_0 é a concentração inicial do poluente na solução (mg L^{-1})

C_{eq} é a concentração no equilíbrio do poluente (mg L^{-1})

V é o volume da solução utilizado (L)

2.7.1 Isoterma de Langmuir

A isoterma de Langmuir é classificada como extremamente favorável. Neste modelo considera-se que as forças atuantes no processo de adsorção são semelhantes às que abrangem combinação química considerando que:

(1) O sistema é ideal; (2) as moléculas são adsorvidas e aderem à superfície do adsorvente em sítios definidos e localizados, com adsorção em monocamada em superfície homogênea; (3) cada sítio pode acomodar uma, e somente uma espécie adsorvida; (4) a energia da espécie adsorvida é a mesma em todos os sítios da superfície e não depende da presença ou ausência de outras espécies adsorvidas nos sítios vizinhos, ou seja, apresenta interação desprezível entre as moléculas adsorvidas (PIETROBELLI, 2012 p.28).

A isoterma de Langmuir é representada pela equação (5):

$$q_{eq} = q_{\max} \left(\frac{b_L C_{eq}}{1 + b_L C_{eq}} \right) \quad (5)$$

A isoterma de Langmuir descrita pela equação (5) quando em formato linear é representada de acordo com a equação (6) (BRUNO, 2008):

$$\frac{C_e}{q_{eq}} = \frac{1}{q_{max} b} + \frac{C_e}{q_{max}} \quad (6)$$

Em que,

q_{eq} é a quantidade de poluente adsorvido em equilíbrio (mg g^{-1});

$q_{m\acute{a}x}$ é a quantidade máxima adsorvida de poluente (mg g^{-1});

b é constante de Langmuir relacionada com a energia de adsorção (L mg^{-1});

C_e é a concentração do poluente no equilíbrio (mg L^{-1}).

Os valores de $1/q_{m\acute{a}x}$ e $1/q_{m\acute{a}x} \cdot b$, são respectivamente coeficiente angular e coeficiente linear, obtidos pelo gráfico linear de C_e/q_{eq} versus C_e . (BRUNO, 2008).

Os parâmetros b e $q_{m\acute{a}x}$ apresentam relação com o material adsorvente, ou seja, o b indica a taxa de adsorção e dessorção, altos valores de b sugerem grande afinidade do corante pelos sítios do adsorvente, e o parâmetro $q_{m\acute{a}x}$ indica a saturação completa da superfície do adsorvente, ou seja, o número total de sítios do material biossorvente (PIETROBELLI, 2012).

Quando os dados experimentais obtidos não se ajustam adequadamente ao modelo de Langmuir, diz que o processo foi realizado em multicamadas, contudo pode também indicar que a reação de adsorção envolve mais de um tipo de ligação, covalente e iônica (PIETROBELLI, 2012).

2.7.2 Isoterma de Freundlich

O modelo de Langmuir considera que a adsorção ocorre em monocamada, e a Isoterma de Freundlich adota que a adsorção acontece em multicamadas o que a torna adequada para caracterizar processo com adsorvente de superfície heterogênea (BRUNO, 2008).

Quando a superfície do sólido é heterogênea, os sítios de adsorção apresentam diferentes energias e por isso nem sempre estão disponíveis, ou seja, a energia de adsorção sofre variação em função da cobertura da superfície (FERREIRA, 2011).

Além de considerar que a reação de adsorção foi realizada em multicamadas, a isoterma de Freundlich indica que esse processo não prevê a

saturação da superfície, ou seja, o modelo permite a existência de uma infinita cobertura superficial (PIETROBELLI, 2012).

A isoterma de Freundlich é representada pela equação (7):

$$q_{eq} = k_F C^{n_F} \quad (7)$$

A isoterma de Freundlich descrita pela equação (7) quando em formato linear é representada de acordo com a equação (8):

$$\log q_{eq} = \log k_F + \frac{1}{n_F} \log C \quad (8)$$

No qual,

k_F e n_F são constantes de Freundlich relacionadas com a capacidade de adsorção e intensidade de adsorção, respectivamente.

C é a concentração de poluente no equilíbrio (mg L^{-1});

q_{eq} é a quantidade de poluente adsorvido no equilíbrio (mg g^{-1});

Os valores de k_F e n_F podem ser obtidos pela intersecção e inclinação do gráfico linear de $\log q_{eq}$ versus $\log C$ (BRUNO, 2008).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e a metodologia experimental utilizada na análise de remoção do corante Amarelo Reativo B2R pelo bagaço de cana-de-açúcar. Esta seção é dividida em: Preparo da Biomassa, Teste preliminares, Teste Cinético, Teste de Equilíbrio e Caracterização do bioissorvente. A Figura 2 apresenta a sequência dos experimentos realizados e os locais onde foram efetuados os ensaios e utilizados os equipamentos foram os laboratórios da Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Ponta Grossa, abaixo descritos:

Laboratório de Métodos Instrumentais;

Laboratório de Iniciação Científica e Tecnologia;

Laboratório de Operações Unitárias;

Laboratório de Química Instrumental;

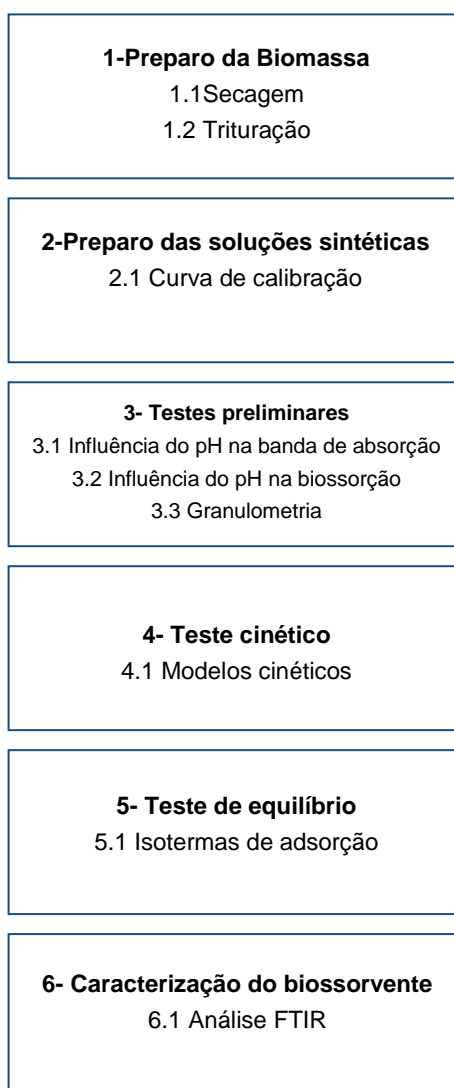


Figura 2 - Sequência dos experimentos realizados

3.1 PREPARO DA BIOMASSA

A biomassa utilizada no presente estudo foi o bagaço de cana-de-açúcar disponibilizada por comerciante de caldo de cana da cidade de Ponta Grossa/PR.

No preparo, a biomassa foi lavada em água corrente e em seguida com água destilada e cortada em pequenos pedaços de aproximadamente 6 cm cada. A Fotografia 1 ilustra a biomassa bagaço de cana-de-açúcar utilizado.



Fotografia 1 - Bagaço de cana-de-açúcar

Logo após, a biomassa foi seca a temperatura de 30°C em estufa com circulação e renovação de ar (SOLAB - SL 102) por um período de 144 horas. Em seguida, foi triturada em moinho de facas (Willey - MA340) com o objetivo de se obter partículas menores.

3.2 PREPARO DAS SOLUÇÕES E DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DO CORANTE

Para a realização dos experimentos foram preparadas soluções sintéticas de corante Amarelo Reativo B2R (diluição em água destilada).

A Fotografia 2 ilustra o corante utilizado para os experimentos realizados neste trabalho.



Fotografia 2 - Corante Amarelo Reativo B2R utilizado no estudo

O ajuste de pH foi realizado utilizando soluções de NaOH 20% e HCl 50%. As medições das concentrações de corante foram avaliadas em espectrofotômetro UV-Vis (Femto - 800 XI).

3.2.1 Curva de calibração

Para a construção da curva de calibração preparou-se soluções de corante Amarelo Reativo B2R com concentrações na faixa de 0 a 100 mgL⁻¹ (12,5; 25; 50; 75; 100 mgL⁻¹) e fez-se a varredura com comprimento de onda entre 300 e 1000 nm para identificar o comprimento de onda no qual o corante absorve maior quantidade de luz.

3.3 TESTES PRELIMINARES

Os testes preliminares foram realizados com o intuito de identificar parâmetros e faixas de estudo a serem aplicados nos testes cinético e de equilíbrio.

3.3.1 Influência do pH Sobre a Banda de Absorção do Corante

O experimento foi realizado para determinar a faixa de pH em que houvesse mudança na banda de absorção do corante quando em leitura no espectrofotômetro UV-Vis, essa alteração na concentração final pode ser devido a possíveis alterações na estrutura do corante.

Esse teste foi realizado em duplicata, em béqueres contendo 25 mL da solução de corante Amarelo Reativo B2R com concentração inicial de 75 mgL⁻¹ com

valores de pH ajustados em: 1; 1,5; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12 individualmente que se manteve em repouso por 24 horas. Ao final, amostras de cada recipiente foram retiradas e realizadas as leituras em espectrofotômetro UV-Vis. Neste teste foi verificado o valor de absorvância e o comprimento de onda de máxima absorção do corante e que seria utilizado nos posteriores testes.

3.3.2 Teste de influência do pH na biossorção

Após verificado em qual faixa de pH havia influência na banda de absorção do corante Amarelo Reativo B2R, foi realizado, nos valores que não houve grandes modificações, o teste de influência do pH na remoção do corante pelo bagaço de cana-de-açúcar.

Este teste teve como objetivo definir o pH ótimo em que acontece maior remoção do corante Amarelo Reativo B2R. Para isto, variou-se o valor do pH inicial da mistura e manteve-se constante a massa do bagaço de cana-de-açúcar 0,3 g, a concentração inicial da solução sintética de corante de 75 mgL^{-1} , o tempo de contato de 24 horas, a temperatura de 30°C e agitação de 110 rpm em *shaker* do tipo banho metabólico (Solab[®] - Dubnoff SL 157).

Ao final de cada ensaio, as amostras foram centrifugadas e em seguida realizadas as leituras das concentrações finais das soluções em espectrofotômetro UV-Vis.

3.3.3 Teste de granulometria

Este experimento teve como objetivo verificar a influência do tamanho da partícula do bagaço de cana-de-açúcar na capacidade de remoção do corante em solução aquosa.

Em primeiro momento houve o peneiramento do bagaço de cana-de-açúcar, que já estava triturado, em agitador de peneiras para análises granulométricas eletromagnético (BERTEL). As peneiras selecionadas para esta seção foram separadas com o intuito de se obter diferentes diâmetros médios. Essa operação separou a biomassa em três tamanhos distintos, e os testes foram realizados com estes diâmetros de partículas, como também, com a mistura de bagaço de cana-de-açúcar retirada logo após a moagem.

A Fotografia 3 ilustra o equipamento utilizado para o peneiramento.



Fotografia 3 - Agitador de peneiras para análises granulométricas eletromagnético.

O Tabela 3 apresenta os diâmetros médios para os valores de mesh das peneiras utilizadas.

Tabela 3- Diâmetros médios das partículas analisadas

| | Peneiras 1 e 2 | Peneiras 3 e 4 | Peneiras 5 e 6 |
|----------------------------|----------------|----------------|----------------|
| Mesh | 20 e 24 | 48 e 42 | 80 e 65 |
| Diâmetro médio (mm) | 0,78 | 0,327 | 0,196 |

O teste de granulometria consistiu em distintos erlenmeyers de 125 mL, contendo 0,3 g da biomassa nos tamanhos citados de diâmetros: 0,780; 0327; 0196 mm, como também cm a mistura proveniente do moinho de facas, dispostos separadamente, 50mL da solução de corante com concentração inicial de 65 mgL^{-1} , pH ajustado conforme resultado do teste de influência do pH, mantidos sob agitação constante de 110 rpm a 30°C por 24 horas em incubadora *shaker*.

Ao final de cada ensaio, as amostras foram centrifugadas e realizou-se a leitura da concentração final em espectrofotômetro UV-Vis.

3.4 TESTE CINÉTICO

Para determinar o tempo de contato necessário para o sistema atingir o equilíbrio foram realizados experimentos utilizando solução sintética com concentração inicial de 65 mgL^{-1} de corante. O método foi realizado em duplicata e constituiu em colocar em frascos erlenmeyers de 125 mL, 0,3 g do bagaço de cana-de-açúcar em contato com 50 mL da solução de corante Amarelo Reativo B2R valor de pH ajustado conforme resultado do teste de influência do pH, agitação constante em incubadora *shaker* a 110 rpm, temperatura de 30°C . Amostras foram retiradas em intervalos de tempo pré-determinados: de 5 a 3360 min.

Ao término, as amostras foram centrifugadas e analisadas, quanto a concentração final, em espectrofotômetro UV-Vis.

3.4.1 Modelos Cinéticos

As análises da cinética da bioadsorção indicam o comportamento da taxa de variação de captação do corante Amarelo Reativo B2R pelo bagaço de cana-de-açúcar. Os dados cinéticos contribuem para a identificação do mecanismo da bioadsorção e são necessários para o projeto de reatores de uma estação de tratamento.

Deste modo, ao final do ensaio cinético, os resultados foram comparados e ajustados de acordo com os modelos cinéticos: pseudo primeira-ordem proposto por Lagergren, modelo de pseudo segunda-ordem por Ho & McKay, e modelo intrapartícula descrito por Weber e Morris.

3.5 TESTE DE EQUÍLIBRIO

O teste de equilíbrio teve como objetivo verificar a quantidade de biomassa bagaço de cana-de-açúcar necessária para se atingir o equilíbrio de remoção do corante presente na solução sintética.

Os ensaios foram realizados em duplicata. Em frascos erlenmeyers de 125mL adicionou-se 50 mL de solução sintética de corante Amarelo Reativo B2R com concentração inicial de 65 mgL^{-1} em contato com diferentes quantidades de bioadsorvente pré-definidas de 0,2 a 0,9 g. O valor de pH foi ajustado conforme

resultados do teste de influência do pH. Os frascos foram mantidos sob agitação constante de 110 rpm em incubadora *shaker* a temperatura controlada de 30°C. O tempo de duração dos ensaios de equilíbrio foi de 24 horas.

Posterior a cada ensaio, as amostras foram filtradas e realizou-se a leitura da concentração final em espectrofotômetro UV-Vis.

3.5.1 Isotermas de adsorção

A aplicação dos resultados do teste de equilíbrio nas isotermas de adsorção, revela o possível comportamento do sistema quanto ao processo de captação do corante pelo bagaço. Deste modo, os modelos de Langmuir e Freundlich foram ajustados aos dados obtidos no teste de equilíbrio, e assim identificado um provável comportamento do sistema.

3.6 CARACTERIZAÇÃO DO BIOSSORVENTE

Durante a realização dos experimentos, o restante da solução que não era analisada em espectrofotômetro UV-Vis era filtrada e a fase líquida era separada do bagaço de cana contendo corante. Este bagaço de cana-de-açúcar com corante Amarelo reativo B2R bioissorvido foi seco em estufa de circulação e renovação de ar (SL 102 – SOLAB). Em seguida, amostras do bioissorvente puro, e do bioissorvente com corante foram enviadas para análise espectral FTIR.

As leituras foram realizadas na região de comprimento de onda de 400 a 500 cm^{-1} e a estrutura do bioissorvente antes e depois da remoção do corante foram comparadas para indicar os principais grupos funcionais que participaram desta bioissorção.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes a todos os ensaios descritos no item de materiais e métodos.

4.1 PREPARO DA BIOMASSA

A biomassa foi seca em estufa de circulação e renovação de ar, essa secagem durou 144 horas e os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4 - Dados preparo da biomassa

| Secagem Bagaço de cana-de-açúcar | | | | | |
|---|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Massa (g) | | | | | |
| Tempo (Horas) | Recipiente 1 | Recipiente 2 | Recipiente 3 | Recipiente 4 | Recipiente 5 |
| 0 | 64,2 | 60,84 | 51,18 | 49,03 | 46,61 |
| 88 | 29,33 | 25,76 | 26,54 | 24,39 | 25,94 |
| 120 | 24,26 | 25,46 | 26,28 | 24,21 | 25,73 |
| 144 | 24,25 | 25,44 | 26,27 | 24,19 | 25,72 |

A secagem foi finalizada quando se notou a pouca variação de peso, o que indicava que a biomassa estava seca. Em seguida, a biomassa foi triturada em moinho de facas com o objetivo de se obter partículas menores e acondicionada em recipiente plástico.

4.2 TESTES PRELIMINARES

A partir dos resultados dos testes preliminares foi possível definir condições operacionais do processo, estes resultados são apresentados a seguir.

4.2.1 Influência do pH sobre a banda de absorção do corante

O experimento foi realizado para determinar a faixa de pH em que houvesse mudança na banda de absorção do corante quando em leitura no espectrofotômetro UV-Vis. A concentração inicial da solução utilizada neste experimento foi de 75

mgL⁻¹ de corante. Os resultados obtidos neste teste de verificação da influência do pH sobre a banda de absorção do corante nos valores de pH de 1 a 12, são apresentados na Figura 3.

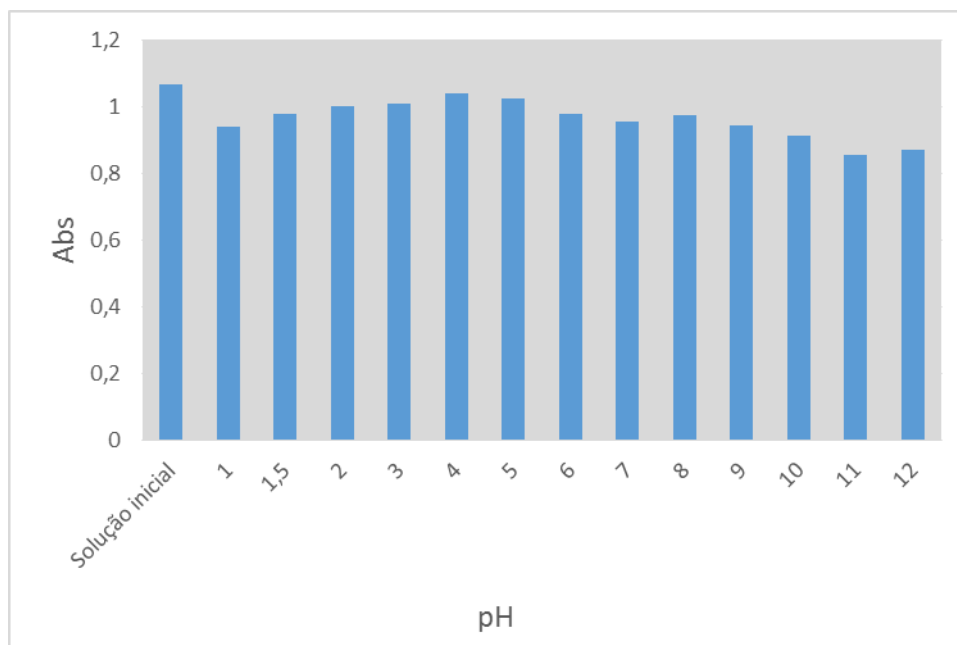


Figura 3 - Resultados teste de precipitação

Pela Figura 4 verificou-se pequenas alterações nos valores de absorbância entre o pH 1 ao 12 este fato pode ser explicado pela adição em quantidades diferentes de ácido e base para o ajuste dos valores de pH, o que pode ter alterado a concentração final e assim no valor de absorção.

Neste experimento foi possível observar também que em todos os valores de pH os picos se acentuaram no mesmo comprimento de onda da solução inicial utilizada como padrão. A Figura 4 mostra a leitura feita da solução inicial e o comprimento de onda que fora adotado para os posteriores testes.

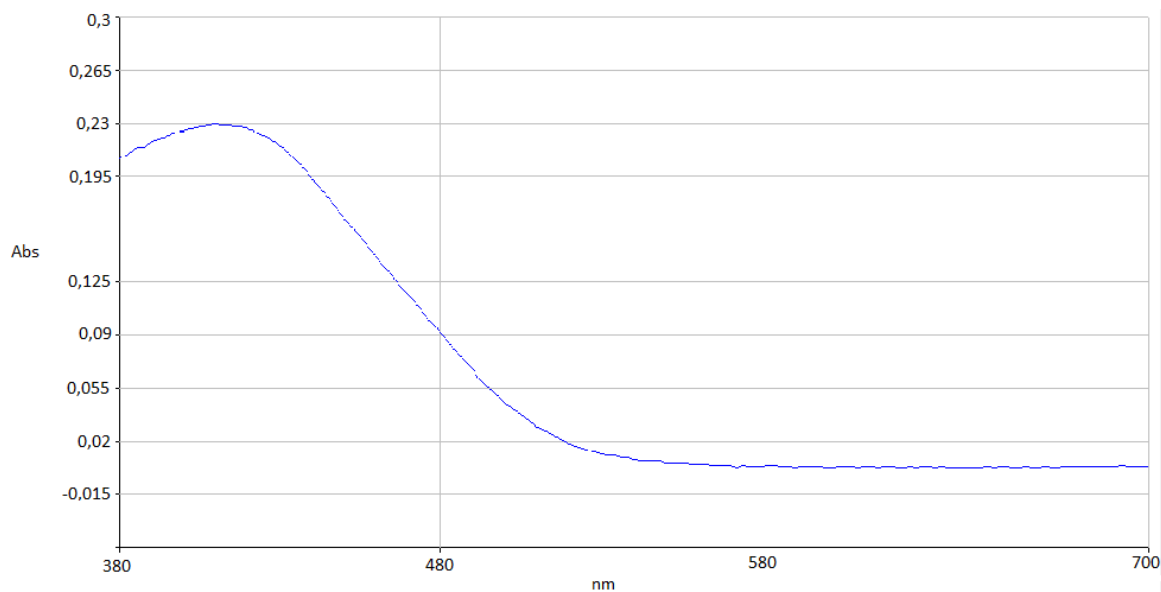


Figura 4 - Leitura da solução inicial realizada no espectrofotômetro UV-Vis

A partir deste experimento pôde-se fixar o comprimento de onda em 410 nm que fora utilizado para os testes seguintes.

4.2.2 Teste de influência do pH na bioissorção

Para avaliar o efeito do pH na bioissorção foram realizados experimentos utilizando solução com concentração inicial de 75 mgL^{-1} de corante em contato com 0,3 g de bagaço de cana por 24 horas, a 30°C com agitação constante de 110 rpm em incubadora *shaker*.

A influência do pH na remoção do corante Amarelo reativo B2R pelo bagaço de cana-de-açúcar é mostrada na Figura 5.

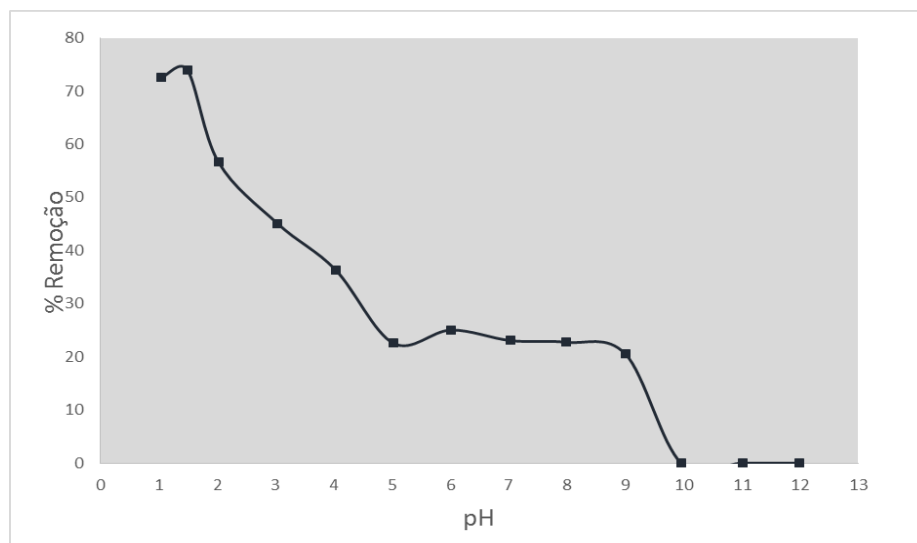


Figura 5 - Resultados teste de influência do pH da solução.

Pela Figura 5 verificou-se que o potencial de remoção do corante Amarelo Reativo B2R pelo bagaço de cana-de-açúcar aumenta com o decréscimo do pH, ou seja, em valores ácidos, acentuando em pH 1,5 em que a remoção se aproxima de 74%.

O pH é um parâmetro muito importante no estudo de biossorção, pois o pH da solução afeta a carga superficial do adsorvente (sólido) e o grau de ionização de diversos poluentes, como o corante. Quando acontece mudanças no pH da solução o processo adsorptivo é afetado por meio da dissociação de grupos funcionais existentes nos sítios ativos do adsorvente (SCHIMMEL, 2008).

Segundo Módenes *et. al.* (2011), com o decréscimo do pH o número de sítios ativos carregados negativamente na superfície do adsorvente diminui com o aumento de prótons disponíveis na solução do corante. Desta forma, a adsorção de ânions é favorecida, uma vez que os corantes reativos possuem caráter aniônico devido à presença do grupo sulfonato ($-\text{SO}_3^-$).

Neste ensaio, o corante Amarelo Reativo B2R é um corante de natureza aniônica, e quando o sistema foi colocado em pH ácido a superfície do adsorvente (bagaço de cana-de-açúcar) tornou-se carregada positivamente pela adsorção de íons H^+ da solução, deste modo, como o bagaço de cana-de-açúcar está carregado positivamente a atração eletrostática entre o corante (caráter aniônico) e o bagaço acontece significativamente, levando a máxima adsorção do corante pelo bagaço. E quando houve o aumento no pH do sistema, estes sítios carregados positivamente

no bagaço de cana-de-açúcar diminuíram o que desfavoreceu essa adsorção entre o corante e o bagaço de cana-de-açúcar.

Conforme o autor Scheufele et al. (2014), a biossorção do corante Azul reativo 5G pelo bagaço de cana-de-açúcar e os resultados do teste de pH indicaram que a maior remoção aconteceu no pH de valor 2, sendo que o comportamento do sistema foi semelhante em pH ácidos e básicos, ou seja, aumentou a remoção em pHs ácidos e diminuiu em pHs básicos.

Da mesma forma, Honorio (2013) observou em seu estudo de biossorção de diferentes corantes reativos pela casca de soja, em pH ácidos, especificamente entre 1 e 2 houve uma maior remoção do corante reativo, e também significativa redução em pH básico.

4.2.3 Teste de granulometria

O teste de granulometria verificou a influência do diâmetro médio das partículas na remoção do corante Amarelo Reativo B2R pelo bagaço de cana-de-açúcar nas seguintes condições: concentração inicial da solução sintética 65 mgL^{-1} , pH 1,5, temperatura 30°C agitação 110 rpm em incubadora *shaker* por um período de 24 horas. A tabela 5 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 5- Resultados teste de granulometria

| Diâmetro das partículas (mm) | % de Remoção |
|-------------------------------------|---------------------|
| 0,78 | 60,81 |
| 0,327 | 55,15 |
| 0,196 | 57,12 |
| Mistura | 58,97 |

A partir dos resultados obtidos verificou-se que o diâmetro superior testado apresentou melhor remoção do corante (60,81%), contudo, a diferença em relação a mistura é pequena (58,97%). Assim, considerando a facilidade e a eliminação de uma etapa (peneiramento) no estudo, a mistura das partículas da biomassa proveniente logo após a moagem foi utilizada para os experimentos seguintes realizados. Com isso, há um aproveitamento de todo bagaço de cana disponível.

4.3 TESTE CINÉTICO

Na determinação do tempo de contato necessário para o sistema atingir o equilíbrio foram realizados experimentos utilizando solução com concentração inicial de 65,8 ppm de corante conforme Tabela 6. Em contato, foram colocados 0,3 g de bagaço de cana e 50mL da solução do corante. Os frascos foram mantidos sob agitação constante de 110 rpm, temperatura controlada de 30°C e pH 1,5 em incubadora *shaker*.

Tabela 6 - Resultados teste cinéticos

| Tempo (h) | Concentração solução (mgL⁻¹) | % Remoção |
|------------------|--|------------------|
| 0 | 65,81 | 0 |
| 0,08 | 37,25 | 43,4 |
| 0,17 | 37,18 | 43,5 |
| 0,5 | 33,98 | 48,36 |
| 2 | 25,70 | 60,95 |
| 3 | 25,69 | 61,63 |
| 4 | 25,12 | 61,82 |
| 5 | 24,93 | 62,77 |
| 8 | 24,88 | 62,85 |
| 9 | 24,42 | 62,89 |
| 10 | 24,13 | 63,33 |
| 11 | 24,10 | 64,01 |
| 12 | 23,05 | 64,97 |
| 14 | 23,30 | 65,21 |
| 18 | 22,85 | 65,28 |
| 22 | 22,92 | 65,77 |
| 24 | 22,41 | 65,94 |
| 28 | 21,08 | 67,97 |
| 36 | 20,83 | 68,34 |
| 48 | 20,84 | 68,33 |
| 56 | 20,84 | 68,33 |

A Figura 6, mostra o perfil cinético de biossorção do corante Amarelo Reativo B2R pelo bagaço de cana-de-açúcar.

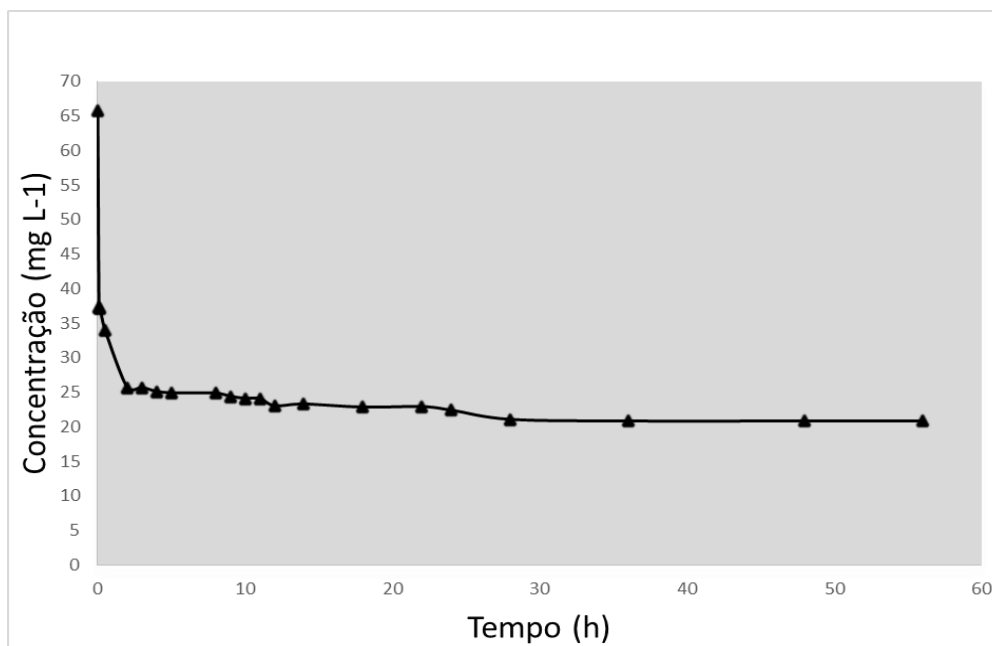


Figura 6 – Perfil cinético da bioadsorção do corante Amarelo Reativo B2R pelo bagaço de cana-de-açúcar

Observando a Figura 6 nota-se uma taxa de bioadsorção inicial, muito rápida, ou seja, próximo a 45% nas primeiras 0,0833 horas que corresponde a 5 minutos, logo em seguida o comportamento do sistema prossegue em um ritmo mais lento, até alcançar o tempo de equilíbrio em 36 horas, com concentração de 20,837 mg L⁻¹ em uma porcentagem de remoção de 68,34%.

No tempo de 2 horas a remoção do corante já se apresenta superior a 60% o que o torna próximo do valor encontrado com o de equilíbrio em 36 horas. Neste contexto, quando estes resultados são reproduzidos para possíveis aplicações reais no tratamento de efluentes têxteis, este tempo curto de 120 minutos pode-se mostrar interessante quando a remoção desejada for de 60% do corante.

Gusmão et al. (2012) em seu estudo na bioadsorção de corantes Methylene Blue (MB) e Gentian Violet (GV) utilizando bagaço de cana-de-açúcar verificou também comportamento semelhante ao mostrado neste estudo, remoção rápida num primeiro instante e em seguida comportamento mais lento até atingir equilíbrio em 6 horas para o corante MB e 20 horas para o corante GV

Módenes et al. (2011), em sua análise de bioadsorção do corante reativo 5G pela macrófita *Egeria densa*, verificou desempenho cinético do sistema similar ao descrito neste trabalho. O sistema apresentou remoção rápida já nos primeiros 15 minutos e atingiu o equilíbrio em 120 minutos.

Gusmão et al. (2012) e Módenes et al.,(2011) descrevem em seus trabalhos que esse comportamento, acontece devido ao fato de no início da biossorção, o adsorvente (bagaço de cana-de-açúcar) apresentar muitos sítios vazios, e conforme o tempo passa esses sítios são ocupados diminuindo os espaços vazios criando forças de repulsão e assim, ficando mais difícil de serem ocupado.

4.3.1 Cinética de adsorção

Com a finalidade de avaliar a cinética de adsorção do sistema, os modelos de pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem e difusão intrapartícula foram aplicados aos dados obtidos experimentalmente.

As equações lineares para os modelos cinéticos citados estão descritas na Tabela 7.

Tabela 7 - Modelos cinéticos estudados e suas respectivas equações lineares

| Modelo | Equação linear |
|------------------------|---|
| Pseudo- primeira ordem | $\log(q_{eq} - q_t) = \log(q_{eq}) - \left(\frac{K_1}{2,303}\right)t$ |
| Pseudo-segunda ordem | $\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_{eq}^2} + \frac{1}{q_{eq}}t$ |
| Difusão intrapartícula | $q_t = k_i t^{0,5} + C$ |

A avaliação dos resultados ocorreu pela comparação entre os valores dos coeficientes de correlação (R^2) dos modelos aplicados. A Tabela 8 apresenta, para cada modelo cinético estudado, os valores dos parâmetros e os valores dos coeficientes de correlação R^2 respectivamente.

Tabela 8 - Parâmetros cinéticos obtidos pelo ajuste dos dados experimentais aos modelos cinéticos pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem e difusão intrapartícula.

| Modelo cinético | Parâmetros | R^2 |
|------------------------|--|--------|
| Pseudo-primeira ordem | $q_{eq} = 1,8327 \text{ (mg g}^{-1}\text{)}$ $K_1 = -0,0009 \text{ (h}^{-1}\text{)}$ | 0,5163 |
| Pseudo-segunda ordem | $q_{eq} = 7,5233 \text{ (mg g}^{-1}\text{)}$ $K_2 = 0,0176 \text{ (g mg}^{-1} \text{ h}^{-1}\text{)}$ | 0,9997 |
| Difusão intrapartícula | $K_i = 0,068 \text{ (mg g}^{-1} \text{ h}^{1/2}\text{)}$ $C = 4,7873$ | 0,4402 |

Tendo em vista os valores da Tabela 8, verifica-se que o modelo cinético de pseudo-segunda ordem forneceu os melhores ajustes aos dados cinéticos obtidos experimentalmente, apresentando valor de coeficiente de correlação R^2 próximo a 1.

Ferreira (2011) em seu estudo sobre a adsorção do corante Reativo Preto 5 por zeólita de cinzas de carvão, verificou que o modelo cinético pseudo-segunda ordem também se ajustou melhor ao processo por ele estudado e deduziu que a reação pode envolver mecanismo de adsorção ativada ou adsorção química, sendo a adsorção ativada um tipo de adsorção que apresenta característica intermediária entre adsorção química e física.

Lima (2011) da mesma forma, constatou que o modelo pseudo-segunda ordem se adequou melhor aos dados experimentais obtidos quando estudou a sorção de íons de Cr (III) utilizando a macrófita aquática *lemna minor*. A autora escreveu que este ajuste pode significar, assim como descreveu Ferreira (2011), que a quimissorção seja a etapa controladora do processo.

Deste modo, os resultados do presente trabalho quando comparado aos estudos citados, em que os dados experimentais também se ajustaram ao modelo cinético pseudo-segunda ordem, sugere que no processo de remoção do corante Amarelo Reativo B2R a adsorção química pode estar envolvida.

Contudo, embora na literatura encontra-se autores que citam que o modelo pseudo-segunda ordem indica o envolvimento da quimissorção no processo de adsorção, como foi descrito anteriormente; Craesmeyer (2013) relata que não há evidência experimental fornecida por testes já realizados, que afirmem que a quimissorção esteja presente num processo de adsorção, quando o modelo de pseudo-segunda ordem se adequa ao sistema.

A Figura 7 apresenta o modelo pseudo-segunda ordem ajustado para o processo de biossorção do corante Amarelo Reativo B2R de acordo com a equação linear apresentada na Tabela 7. Os ajustes com os modelos cinéticos pseudo-primeira ordem e difusão intrapartícula não foram aqui apresentados por apresentarem valores de coeficiente de correlação inferior a 0,6.

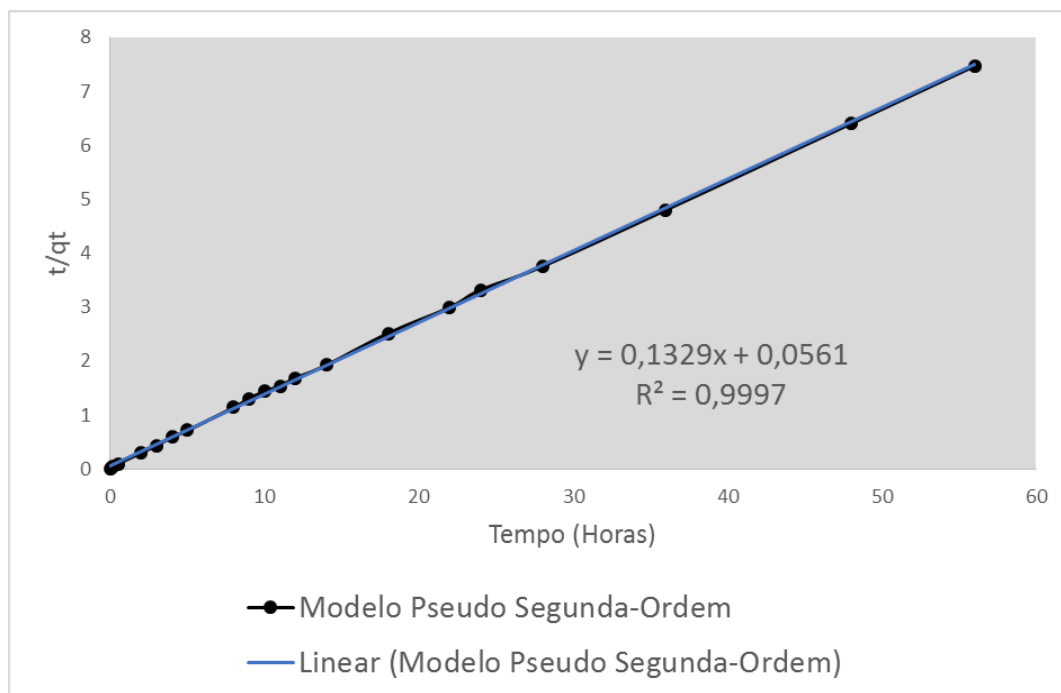


Figura 7 - Modelo cinético pseudo-segunda ordem ajustado aos dados experimentais

Em uma outra comparação, a Figura 8 apresenta a variação da quantidade de corante presente no bioissorvente (q) com o tempo. Nesta figura verifica-se que essa quantidade no equilíbrio (q_{eq}) foi de $7,49 \text{ mg g}^{-1}$ este valor é independente dos modelos cinéticos e sim obtido pelos dados experimentais.

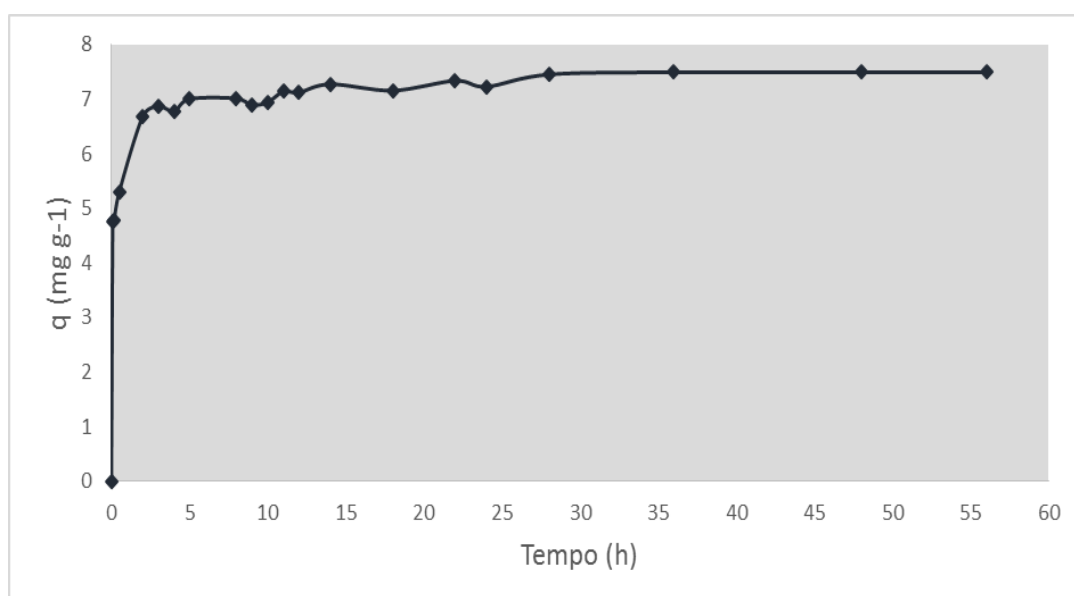


Figura 8 – Variação do q_{eq} no tempo

Comparando a Figura 8 com os valores da Tabela 8, nota-se que o comportamento dos dados experimentais atingiu um valor de q_{eq} ($7,49 \text{ mg g}^{-1}$)

próximo ao obtido pelo modelo de pseudo-segunda ordem que foi de 7,5233 mg L⁻¹ o que confirma também o melhor ajuste aos dados experimentais.

O não ajuste ao terceiro modelo cinético estudado, o de difusão intrapartícula, indicou que essa etapa de difusão não foi uma etapa determinante na velocidade de reação de remoção do corante Amarelo Reativo B2R pelo bagaço de cana-de-açúcar.

4.4 TESTE DE EQUILÍBRIO

Nesta etapa, foi realizado diferentes ensaios com quantidades de bagaço de cana-de-açúcar pré-determinados, a temperatura de 30°C, agitação de 110 rpm, pH 1,5 e um período de 24 horas, com solução de concentração 68,34 ppm. A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos

Tabela 9 - Resultados obtidos no teste de equilíbrio

| Massa (g) | Concentração (mg L ⁻¹) | % Remoção |
|-----------|------------------------------------|-----------|
| 0,2 | 28 | 59,03 |
| 0,3 | 22,25 | 67,44 |
| 0,4 | 13,76 | 79,87 |
| 0,5 | 11,81 | 82,72 |
| 0,7 | 8,49 | 87,57 |
| 0,9 | 6,99 | 89,76 |

4.4.1 Isotermas de Adsorção

As isotermas de adsorção de Langmuir e Freundlich foram utilizadas para a avaliação dos dados obtidos. As equações lineares para as isotermas de adsorção estudadas estão descritas na Tabela 10.

Tabela 10 - Equações lineares para as isotermas de adsorção: Freundlich e Lagmuir

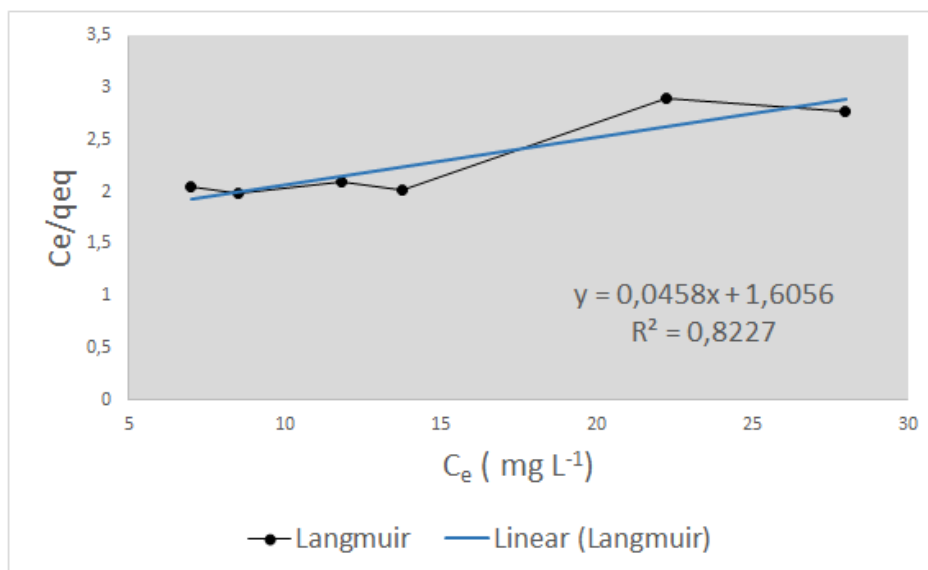
| Isoterma | Equação linear |
|------------|--|
| Freundlich | $\log q_{eq} = \log k_F + \frac{1}{n_F} \log C$ |
| Langmuir | $\frac{C_e}{q_{eq}} = \frac{1}{q_{max} b} + \frac{C_e}{q_{max}}$ |

Os gráficos com as equações lineares foram construídos e obteve-se os valores para os parâmetros dos dois modelos estudados como mostra a Tabela 11.

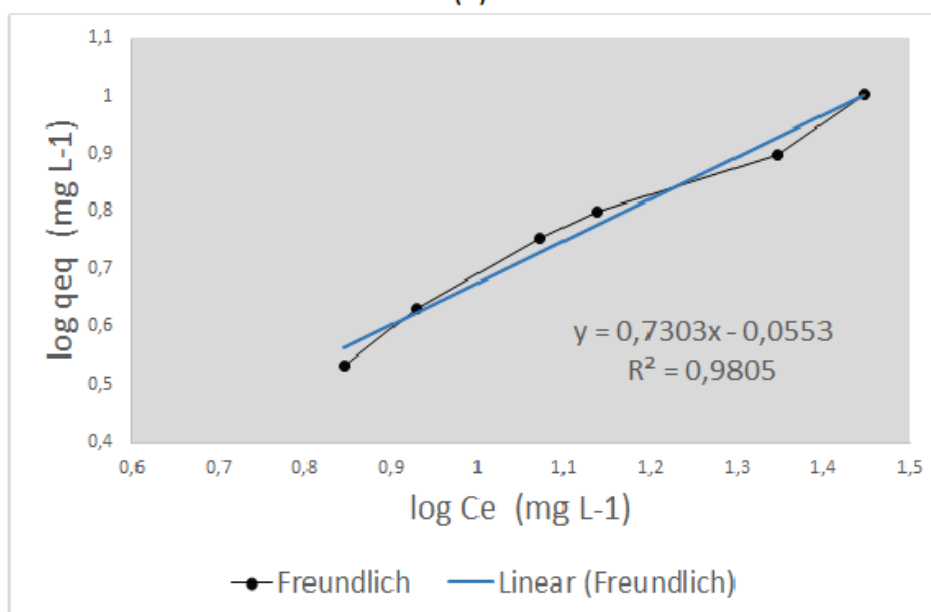
Tabela 11 - Parâmetros e coeficientes de correlação obtidos para as respectivas isotermas de adsorção

| Isoterma de adsorção | Parâmetros | Coefficiente de correlação (R^2) |
|----------------------|--|--------------------------------------|
| Freundlich | $K_F = 0,8804$ $1/n_F = 0,7303$ | 0,9805 |
| Langmuir | $b = 0,0285 \text{ (L mg}^{-1}\text{)}$ $q_{\text{máx}} = 21,8340 \text{ (mg g}^{-1}\text{)}$ | 0,8227 |

A avaliação dos resultados ocorreu pela comparação entre os valores dos coeficientes de correlação R^2 , que indica a adequação dos dados obtidos experimentalmente ao modelo proposto, quanto mais próximo de uma unidade for o coeficiente, mais próximo do modelo estudado os resultados estarão. Assim, o modelo que melhor se ajustou aos dados obtidos experimentalmente foi o modelo de Freundlich. A Figura 9 apresenta os dados ajustados ao modelo da isoterma de Freundlich e Langmuir.



(a)



(b)

Figura 9 -Dados experimentais ajustados as isotermas (a) Langmuir e (b) Freundlich

O melhor ajuste ter acontecido pelo modelo de Freundlich revela uma tendência da bioadsorção do corante Amarelo Reativo B2R pelo bagaço de cana-de-açúcar ter acontecido em multicamadas e que a bioadsorção aconteceu em superfície heterogênea.

Segundo Módenes et al. (2011), o modelo de Freundlich considera uma estrutura em multicamadas e não prevê a saturação da superfície do sólido baseada no processo de adsorção, deste modo, o modelo considera a existência de uma cobertura superficial infinita.

Além disso, quando analisados os parâmetros deste modelo de isoterma de adsorção, de acordo Gusmão (2011), o parâmetro n_F do modelo de Freundlich indica a intensidade de adsorção. Valores de $1/n_F$ que estiverem no intervalo entre 0 e 1 indica que a adsorção é favorável. Analisando a Tabela 11, verificou-se que pelo parâmetro $1/n_F$ o valor indica a favorabilidade de adsorção entre o bagaço de cana-de-açúcar e o corante Amarelo Reativo B2R.

O valor da constante de Freundlich K_F está relacionado à capacidade de adsorção. Quanto maior o valor de K_F maior demonstração de potencial para a remoção do adsorbato presente em solução (PIETROBELLI, 2012).

Neste estudo, a constante de Freundlich apresentou valor intermediário quando comparada a outros estudos tais como o de Rodrigues Filho (2012) que avaliou a remoção do corante amarelo reativo 200% por argila esmectita e verificou que quando utilizada o adsorvente in natura, este apresentou valor de K_F de 1,33.

Na análise de Bruno (2008) que pesquisou a utilização de zeólitas sintetizadas a partir de cinzas de carvão na remoção de corante em água, foi constatado que a isoterma de Freundlich se ajustou melhor ao estudo, tendo como valor de K_F de 0,738.

Nestes dois estudos citados houve conclusão de que o sistema tinha potencial na remoção dos corantes estudados e relacionando o valor de K_F obtido no presente trabalho, com a literatura verifica-se que este apresentou medida intermediária, indicando uma biossorção possivelmente favorável entre o corante Amarelo Reativo B2R e o bagaço de cana-de-açúcar.

4.5 CARACTERIZAÇÃO DO BIOSSORVENTE

A espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) foi usada para identificar os grupos funcionais presentes na biomassa. Os resultados desta análise são mostrados na Figura 10.

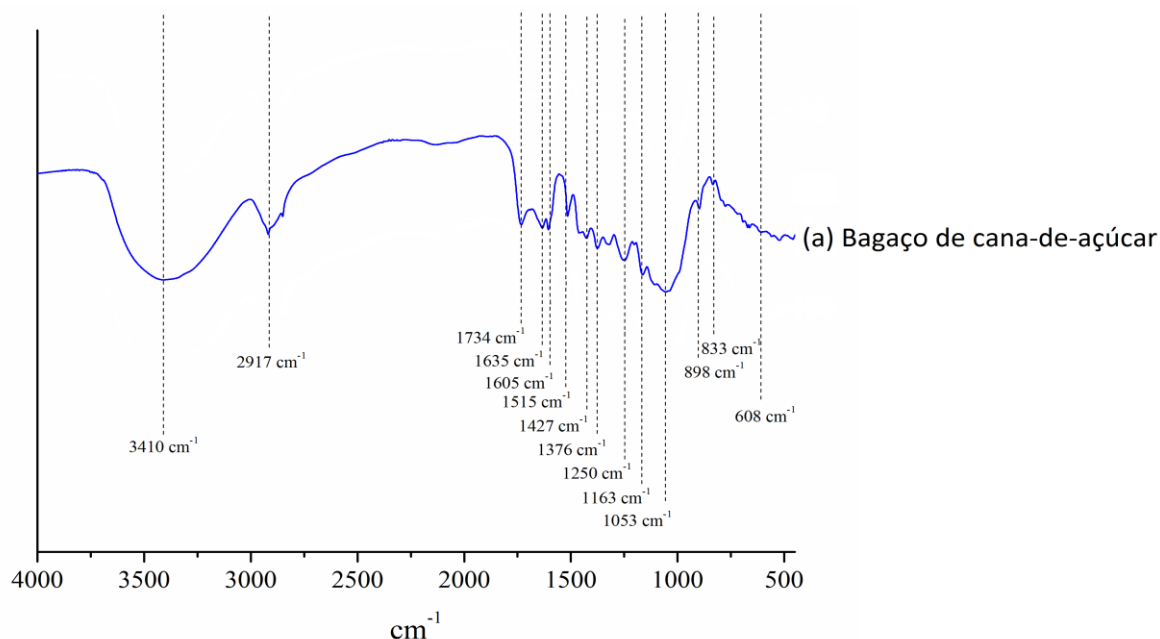


Figura 10 - Resultado análise FTIR para o bagaço de cana-de-açúcar

Para a identificação dos grupos funcionais nas bandas ao redor de 500 a 4000 cm^{-1} foi utilizado a Tabela 12.

Tabela 12 - Valores bases para as absorções de grupos funcionais

| Grupos funcionais | cm^{-1} |
|--------------------------|------------------|
| O—H | 3400 |
| C—H | 3000 |
| $\text{C}\equiv\text{N}$ | 2250 |
| $\text{C}\equiv\text{C}$ | 2150 |
| $\text{C}=\text{O}$ | 1715 |
| $\text{C}=\text{C}$ | 1650 |
| $\text{C}-\text{O}$ | 1100 |

Fonte: Adaptado de Pavia, Lampman e Kriz (2010)

A identificação das ligações presentes no biossorvente foi realizada por meio da análise visual da curva obtida na Figura 10 em comparação com a Tabela 12. Desta forma foram identificadas algumas bandas principais: da esquerda para a direita, o pico arredondado que ocorre na banda de 3410 cm^{-1} , indica presença de O-H. Em seguida, considerando o pico de 2917 cm^{-1} há a presença de ligações de C-H. Já o terceiro pico, em 1734 cm^{-1} indica a presença de C=O. A quarta e última ligação identificada foi C-O no pico próximo a 1163 cm^{-1} .

Após a identificação das ligações existente na biomassa foi realizada também, em análise visual, a comparação entre as curvas (a) e (b) como mostra a Figura 11. A curva (a) representa apenas a estrutura do bagaço de cana-de-açúcar e curva (b) bagaço de cana-de-açúcar com corante após ensaios experimentais realizados.

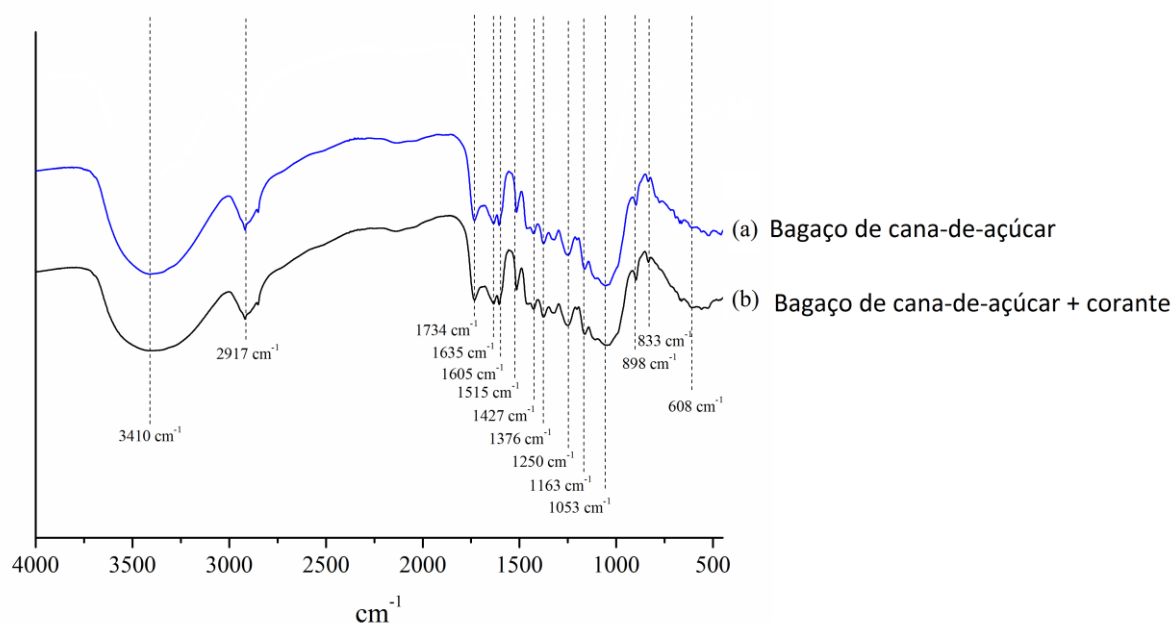


Figura 11 – Comparação das curvas obtidas em análise FTIR: (a) apenas bagaço de cana-de-açúcar e (b) bagaço de cana-de-açúcar com corante

Quando comparadas as duas curvas nota-se a diferença em alguns picos na curva (b), estas alterações foram evidenciadas na Figura 12.

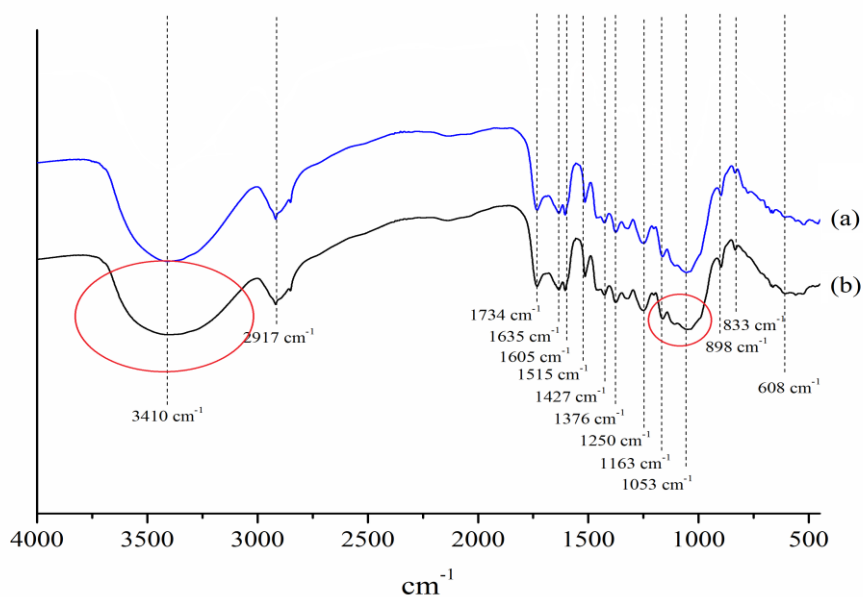


Figura 12 - Identificação das alterações na curva (b) de bagaço de cana-de-açúcar com corante

Na Figura 12 a primeira mudança identificada foi na banda próximo a 3410 cm^{-1} , observou-se uma diferença na abertura do pico, sugerindo que a ligação O-H participou no processo de bioissorção estudado. Do mesmo modo, a banda próxima a 1163 cm^{-1} apresenta uma diferença na intensidade da altura, indicando que a ligação de C-O provavelmente teve participação na bioissorção.

5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi avaliado a capacidade de remoção do corante Amarelo Reativo B2R pelo bagaço de cana-de-açúcar.

Em relação aos tamanhos das partículas da biomassa estudada, não houve variação significativa na remoção do corante da solução sintética, deste modo, pela facilidade e eliminação da etapa de peneiramento os experimentos foram realizados utilizando a mistura de partículas do bagaço de cana-de-açúcar.

O teste do efeito do pH revelou que o comportamento do sistema é mais eficaz em valores que indicam maior acidez, acentuando a remoção em pH 1,5. Em valores elevados, pHs básicos, o sistema apresentou pouca remoção ou nenhuma remoção, o que confirma a natureza aniônica do corante Amarelo Reativo B2R.

O tempo de equilíbrio do sistema estudado foi de 36 horas com capacidade de remoção de 68,34%, no entanto em 24 horas a remoção foi de aproximadamente 66%. Esta pequena diferença, bem como pela organização do cronograma dos ensaios, levou a realizar os testes de equilíbrio em 24 horas.

O modelo cinético em que melhor ajustou os resultados foi o modelo pseudo-segunda ordem, que apresentou coeficiente de correlação próximo a 1, e o valor da massa máxima adsorvida calculada foi condizente ao valor obtido experimentalmente.

O modelo da Isoterma de Freundlich representou melhor os dados obtidos experimentalmente no teste de equilíbrio. Por esse resultado supõe-se a heterogeneidade da superfície da biomassa, bem como a adsorção ter acontecido em multicamadas. O parâmetro $1/n_F$ apresentou valor entre 0 e 1 o que demonstra a favorabilidade da adsorção do corante pelo bagaço de cana-de-açúcar.

Pela análise FTIR foi possível identificar dois grupos funcionais que, provavelmente participaram no processo de biossorção, estudado no presente trabalho: O-H e C-O.

Através dos resultados obtidos experimentalmente neste estudo, pode-se afirmar que a biomassa bagaço de cana-de-açúcar quando em sistema com

condições favoráveis possui grande potencial para o tratamento de efluentes contendo corante Amarelo Reativo B2R.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Baseado nos resultados obtidos sugere-se:

- Aplicar a técnica de remoção do corante Amarelo reativo B2R com o bagaço de cana-de-açúcar em tratamento prévio de baixo custo.
- Aplicar a técnica em sistema contínuo e realizar a comparação.
- Estudar a capacidade do bagaço de cana-de-açúcar na remoção do corante Amarelo Reativo B2R utilizando efluente industrial.

REFERÊNCIAS

ABIQUIM. Associação Brasileira da Indústria Química. **HISTÓRIA**. Disponível em: <http://abiquim.org.br/corantes/cor_historia.asp>. Acesso em: 29 out. 2014.

ALMEIDA, Vitor de Cinque. **DESENVOLVIMENTO DE MÉTODOS ANALÍTICOS PARA DETERMINAÇÃO E EXTRAÇÃO DE CORANTES TÊXTEIS EM EFLUENTES INDUSTRIAIS**. 2006. 109 f. Tese (Doutorado) - Curso de Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2006.

BRUNO, Mariza. **Utilização de zeólitas sintetizadas a partir de cinzas de carvão na remoção de corante em água**. 2008. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2008.

CARDOSO, Tiago Fiori. **COGERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR: REVISÃO DE LITERATURA**. 2011. 23 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Gestão de Produção Sucroenergética, Universidade Federal de São Carlos, Sertãozinho, 2011.

CARVALHO, Fernanda Machado Mendes. **Caracterização ultraestrutural e hidrólise enzimática de cana-de-açúcar e bagaço pré-tratados quimio-mecanicamente**. 2014. 157 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências, Universidade de São Paulo, Lorena, 2014.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Câmara ambiental do setor sucroalcooleiro**: Contexto econômico, social e ambiental do setor sucroalcooleiro no Estado de São Paulo. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/tecnologia-ambiental/cas-em-atividade/56-camara-ambiental-do-setor-sucroalcooleiro>>. Acesso em: 13 nov. 2014.

CRAESMEYER, Gabriel Ramos. **Tratamento de efluente contendo urânio com zeólita magnética**. 2013. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Autarquia Associada à Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

DANTAS FILHO, Paulo Lucas. **Análise de Custos na Geração de Energia com bagaço de cana-de-açúcar: um estudo de caso em quatro usinas de São Paulo**. 2009. 175 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

FERRARI, Leila Denise Fiorentin. **REMOÇÃO DE CORANTE DE EFLUENTES DA INDÚSTRIA TÊXTIL UTILIZANDO PROCESSOS COM MEMBRANAS E ADSORÇÃO EM BAGAÇO DE LARANJA**. 2009. 142 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2009

FERREIRA, Patricia Cunico. **Estudos sobre a adsorção do corante reativo preto 5 de solução aquosa usando zeólita de cinzas de carvão**. 2011. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências na Área de Tecnologia Nuclear, Autarquia Associada à Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

FISPQ. **Ficha de informações de segurança de produtos químicos: Amarelo Reafix B2R**, n. 0222/08, out. 2008.

GUARATINI, Cláudia C. I.; ZANONI, Maria Valnice B. **CORANTES TÊXTEIS**. *Química Nova*, v. 23, p.71-78, 2000.

GUSMÃO, Karla Aparecida Guimarães et al. Application of succinylated sugarcane bagasse as adsorbent to remove methylene blue and gentian violet from aqueous solutions e Kinetic and equilibrium studies. **Dyes And Pigments**, Oxford, v. 92, n. 3, p.967-974, mar. 2012.

GUSMÃO, Karla Aparecida Guimarães. **Estudo de Adsorção em solução aquosa de dois corantes catiônicos e de uma eteramina usando bagaços de cana modificados quimicamente**. 2011. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

GUSMÃO, Lucas Luiz. **Tratamento de efluentes na indústria têxtil pelo processo de adsorção-fotooxidação empregando-se o compósito magnético Quitosana-TiO₂-Óxido de ferro**. 2014. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agroquímica, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014

HIRATUKA, Célio et al. **Relatório de acompanhamento setorial: Têxtil e confecção**. Campinas, 2008. 1 v. Disponível em: <[http://www.abdi.com.br/Estudo/textil e confeccao junho 08.pdf](http://www.abdi.com.br/Estudo/textil%20e%20confeccao%20junho%2008.pdf)>. Acesso em: 25 nov. 2014.

HO, Yuh-shan; CHIU, Wen-ta; WANG, Chung-chi. Regression analysis for the sorption isotherms of basic dyes on sugarcane dust. **Bioresource Technology**, p.1285-1291, 20 jan. 2005. Semanal.

HONORIO, Jacqueline Ferandin. **Emprego da casca de soja como adsorvente na remoção de corantes reativos têxteis**. 2013. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2013.

LEICHTWEIS, Wilian Adriel; MÓDENES, Aparecido N.; GERARDI, Claudinéia. Levantamento dos Dados Cinéticos de Adsorção do Corante Amarelo Reativo BF 3R Utilizando Pseudocaule de Bananeira (musa sp). **Iii Encontro Paranaense de Engenharia e Ciência**, Toledo, out. 2013.

LIMA, Livia Katia dos Santos. **ESTUDO DA SORÇÃO DE ÍONS DE CR(III) UTILIZANDO A MACRÓFITA AQUÁTICA LEMNA MINOR**. 2011. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

MÓDENES, Aparecido Nivaldo et al. UTILIZAÇÃO DA MACRÓFITA EGERIA DENSA NA BIOSORÇÃO DO CORANTE REATIVO 5G. **Engevista**, v. 13, n. 3, p.160-166, dez. 2011.

OLIVEIRA, Clélia Aparecida da Silva. **Tratamento de corante têxtil por eletrolise . fotolise e fotocatalise utilizando LED UV**. 2013. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2013.

PAVIA, Donald L.; LAMPMAN, Gary M.; KRIZ, George S.. **Introdução à espectroscopia**. 4. ed. Lariana: Cengage, 2010. 716 p.

PEREIRA, F. V.; GURGEL, L. V. A.; AQUINO, S. F.; GIL, L. F. Removal of Zn²⁺ from Electroplating Wastewater Using Modified Wood Sawdust and Sugarcane Bagasse. **Journal of Environmental Engineering-Asce**, v. 135, n. 5, p. 341-350, 2009.

PIETROBELLI, Juliana Martins Teixeira de Abreu. **Remoção dos íons Cádmio, Cobre e Zinco utilizando Macrófita Egeria Densa**. 2012. 125 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2012.

RODRIGUES FILHO, Geraldo Martins. **Adsorção do corante amarelo reativo BF-4G 200% por argila esmectita**. 2012. 203 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

SAID, Abd El-aziz A. et al. Application of Modified Bagasse as a Biosorbent for Reactive Dyes Removal from Industrial Wastewater. **Journal Of Water Resource And Protection**. p. 10-17. Julho 2013.

SCHEUFELE, Fabiano B. et al. **Aplicação do Bagaço de Cana-de-açúcar como material adsorvente na remoção do corante reativo azul 5G**. In: COBEQ, 20, 2014, Florianópolis, 2014. p. 1 - 3.

SCHIMMEL, Daiana. **ADSORÇÃO DOS CORANTES REATIVOS AZUL 5G E AZUL TURQUESA QG EM CARVÃO ATIVADO COMERCIAL**. 2008. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2008.

SILVA, Rene Pinto da. **Tratamento de corantes reativos em solução aquosa utilizando lodo de esgoto sanitário como biossorvente em reatores contínuos**. 2012. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Química, Universidade Federal da Paraíba, Joao Pessoa, 2012.

TAFFAREL, Silvio Roberto. **Mecanismos e parâmetros de adsorção de íons Mn^{2+} e dodecil benzeno sulfonato em zeólitas naturais modificadas**. 2010. 142 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Minas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

VELOSO, Luana de Andrade. **DOSSIÊ TÉCNICO: Corantes e Pigmentos**. 2012. Disponível em: <<http://www.respostatecnica.org.br/dossie-tecnico/downloadsDT/NTcwOA==>>. Acesso em: 28 out. 2014.

ZEFERINO, Livia Fiorotto; FREITAS, Patrícia Antonio de Menezes. **ESTUDO CINÉTICO DA ADSORÇÃO DO CORANTE INDIGO BLUE (2,2'- BIS - 2,3 - DIIDRO - 3 - OXOINDOLILIDENO) EM FIBRAS DE CASCA DE COCO VERDE (COCOS NUCIFERA L)**. 2013.