

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

BARBARA CASTRO DO NASCIMENTO

**ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO EM SOLUÇÃO AQUOSA COM
PÓ DE SERRAGEM DE *Erismia uncinatum* Warm**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2016

BARBARA CASTRO DO NASCIMENTO

**ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO EM SOLUÇÃO AQUOSA COM
PÓ DE SERRAGEM DE *Erisma uncinatum* Warm**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, do Departamento Acadêmico de Construção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Curitiba – PR.

Orientadora: Prof. Dra. Karina Querne de Carvalho Passig
Co-orientadora: MSc. Jéssica Luiza Bueno Trevizani

CURITIBA
2016

FOLHA DE APROVAÇÃO

ADSORÇÃO DE AZUL DE METILENO EM SOLUÇÃO AQUOSA COM PÓ DE SERRAGEM DE ERISMA UNCITAUM WARM

Por

BARBARA CASTRO DO NASCIMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 02 de dezembro de 2016, pela seguinte banca de avaliação:

Orientadora – Karina Querne de Carvalho Passig, Dra.
UTFPR

Co-Orientadora – Jéssica Luiza Bueno Trevizani, MSc.
UTFPR

Profa. Celimar Azambuja Teixeira, Dra.
UTFPR

Prof. Fernando Hermes Passig, Dr.
UTFPR

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai José Osório do Nascimento Filho, à minha mãe Eliane Maria Castro do Nascimento, aos meus irmãos José Osório do Nascimento Neto e Antônio José Castro do Nascimento e ao Ami pelo apoio nos momentos de instabilidade, paciência e conselhos que foram fundamentais para que eu continuasse sempre firme na pesquisa e realização deste trabalho.

À Professora Doutora Karina Querne de Carvalho Passig pela orientação, condução, incentivo, por ter compartilhado do seu tempo e conhecimento, além de ter fornecido esta oportunidade de aprofundar os conhecimentos acerca deste conteúdo e ter dado todo o suporte necessário no decorrer do desenvolvimento deste estudo.

À minha co-orientadora Mestre Jéssica Luiza Bueno Trevizani pela sua dedicação, esforço, incansável ajuda e por ter sido sempre prestativa ao dispendir horas dos seus dias para me auxiliar.

Aos colegas de curso Ana Paula Mendes e Leonardo Tschá e aos colegas de Laboratório de Saneamento, em especial, à Danielle Thaise Maidel, Mayara Coletti e Nayara Romano por terem sido solícitos, prestativos, compreensivos nos momentos difíceis e terem ajudado na realização dos ensaios.

À UTFPR por ter cedido espaço, equipamentos e, principalmente, por ter fornecido uma estrutura de qualidade e professores capacitados que me deram uma excelente base e contribuíram para o enriquecimento da minha formação acadêmica e pessoal.

RESUMO

NASCIMENTO, Barbara Castro do. **Adsorção de azul de metileno em solução aquosa com pó de serragem de *Erisma uncinatum* Warm.** 2016. 61 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento Acadêmico De Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

A quantidade e diversidade de corantes presentes nos efluentes industriais têxteis lançados nos corpos hídricos geram impactos negativos no ambiente. Portanto, faz-se necessário realizar tratamentos a fim de minimizar estes efeitos prejudiciais. Uma das formas mais simples e com um menor custo é o processo de adsorção. O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência de remoção do corante azul de metileno, na concentração de 0,025 g/L, por meio do processo de adsorção com pó de serragem como material adsorvente alternativo ao carvão ativado. Inicialmente, foram realizados ensaios de densidade específica, densidade aparente, pH, teor de umidade e granulometria para caracterização do pó de serragem. Foi realizado um delineamento composto central rotacional como uma forma de planejamento de experimentos e com intuito de analisar a influência das variáveis temperatura e pH no processo de adsorção. A temperatura foi variada em 30 °C, 34 °C, 45 °C, 56 °C e 60 °C e o pH em 3, 4, 7, 10 e 11. Obteve-se caráter ácido para o pó de serragem (pH 5,59 (0,01)) e teor de umidade de 24%. Para todos os ensaios obteve-se, na média, remoção do corante acima de 80%. A maior média de eficiência de remoção nos ensaios de adsorção (87,03%) foi observada na temperatura 45 °C, e pH 11 com a utilização de 3 g de pó de serragem. E o melhor resultado de remoção de corante (88,56%) foi observado para o tempo de 5 minutos a temperatura de 45° C e pH 11. Para todos os ensaios realizados os dados experimentais se ajustaram melhor ao modelo de pseudo-segunda ordem, o que descreve uma adsorção química. De acordo com a estatística, os parâmetros pH e temperatura não influenciaram significativamente na adsorção. Desta forma, concluiu-se que a utilização de pó de serragem para remoção do corante azul de metileno é eficiente e satisfatória.

Palavras-chave: Adsorvente. Análise estatística. Corante. Cinética. pH. Temperatura.

ABSTRACT

NASCIMENTO, Barbara Castro do. **Adsorption of methylene blue in aqueous solution with sawdust powder of *Erisma uncinatum* Warm.** 2016. 61 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento Acadêmico De Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

The quantity and diversity of dyes present in industrial textile effluents discharged into the water bodies generate negative impacts on the environment. Therefore, it is necessary to carry out treatments in order to minimize the effects. One of the simplest and least expensive forms is the adsorption process. This paperwork aims to evaluate the removal of a methylene blue dye at a concentration of 0.025 g/L by adsorption process with sawdust powder as an alternative adsorbent to activated carbon. Initially, the specific density, apparent density, pH, moisture content and particle size tests were used to characterize the sawdust powder. A rotational central composite design was used as a way of planning experiments in order to analyze the impact of temperature and pH in the adsorption process. The temperature varied from 30 °C, 34 °C, 45 °C, 56 °C to 60 °C and pH from 3, 4, 7, 10 to 11. An acid characterization was obtained from the sawdust powder (pH 5.59 (0.01)) and the moisture content was 24%. For all assays, dye removal was above 80% on average. The best efficiency (87.03%) was obtained at a temperature of 45 ° C and pH 11 with 3 g of sawdust powder. And the best dye removal result (88.56%) was observed for the time of 5 minutes at 45 ° C and pH 11. For all the tests performed, the experimental data were better adjusted to the pseudo-second order model, which describes a chemical adsorption. According to the statistics, pH and temperature did not significantly influence the adsorption. Therefore, the conclusion is that the use of sawdust powder for the removal of methylene blue dye is efficient and satisfactory.

KEYWORDS: Adsorbent. Statistical analysis. Dye. Kinetics. pH. Temperature.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma das etapas de produção de uma indústria têxtil	16
Figura 2 - Estrutura molecular do corante azul de metileno	22
Figura 3 - Curva granulométrica do pó de serragem	39
Figura 4 - Curva analítica do azul de metileno	40
Figura 5 - Remoção de corante em função do tempo	43
Figura 6 - Gráfico de Pareto	48
Figura 7 - Gráfico da probabilidade normal dos resíduos.....	49
Figura 8 - Gráfico dos resíduos pelos números de ensaios	49
Figura 9 - Superfície de resposta (a) e curva de nível para remoção de corante (b)	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Consumo no Brasil de corantes e estimativas de não fixação	18
Tabela 2 - Consumo de água devido ao tingimento na produção têxtil.....	19
Tabela 3 - Características das águas residuárias de uma indústria têxtil.....	20
Tabela 4 - Caracterização de classes de corantes utilizadas na indústria têxtil	21
Tabela 5 - Processos físico-químicos de tratamento de efluentes têxteis	24
Tabela 6 - Estudos com pó de serragem para remoção de corante.....	27
Tabela 7 - Resultados de casos com utilização do azul de metileno	29
Tabela 8 - Estudos de caso com utilização de pó se serragem	29
Tabela 9 - Matriz do delineamento composto central rotacional	31
Tabela 10 - Ensaio e normas utilizadas.....	31
Tabela 11 - Caracterização do pó de serragem	37
Tabela 12 - Remoção de corante com variação de pH e temperatura	41
Tabela 13 - Parâmetros de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem	45
Tabela 14 - Delineamento experimental e variáveis respostas	46
Tabela 15 - Efeitos estimados para remoção de azul de metileno	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	13
2.1	OBJETIVOS GERAIS	13
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3	JUSTIFICATIVA	14
4	REVISÃO DE LITERATURA	15
4.1	INDÚSTRIA TÊXTIL	15
4.1.1	Etapas da indústria têxtil	16
4.1.2	Uso da água na indústria têxtil	18
4.2	CORANTES	20
4.3	TRATAMENTO DE EFLUENTE TÊXTIL	22
4.4	ADSORÇÃO	25
4.5	PÓ DE SERRAGEM	26
4.6	CINÉTICA DE ADSORÇÃO	28
4.7	ESTUDOS DE CASO	29
5	MATERIAIS E MÉTODOS	30
5.1	PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS	30
5.2	CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DE SERRAGEM	31
5.2.1	Determinação da densidade específica	31
5.2.2	Determinação da densidade aparente	32
5.2.3	Determinação do pH	33
5.2.4	Determinação do teor de umidade	34
5.2.5	Determinação da granulometria	35
5.3	ENSAIOS DE ADSORÇÃO	36
6	RESULTADOS	37
6.1	CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DE SERRAGEM	37
6.2	CURVA ANALÍTICA	40
6.3	VARIAÇÃO DO pH	41
6.4	VARIAÇÃO DA TEMPERATURA	42
6.5	ANÁLISE DO TEMPO	43
6.6	CINÉTICA DE ADSORÇÃO	45

6.7 ESTATÍSTICA.....	46
7 CONCLUSÃO	52
REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

A indústria tem papel fundamental na economia, uma vez que propicia empregabilidade e renda, além de estar ligada diretamente a outras áreas de serviços. As atividades industriais necessitam de recursos e matérias-primas que, após processadas, geram em sua maioria emissões nocivas ao ambiente. Para mitigar estas consequências, é preciso aperfeiçoar tecnologias para tratamento e redução dos resíduos industriais (Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, 1995).

Um dos principais tipos de indústrias geradoras de resíduos é a têxtil, na qual é consumida cerca de 15% da água utilizada nas atividades industriais. Boa parte desta água é consumida no processo de tingimento (52%) e no restante das demais operações como acabamento (1%), refrigeração (6%) e preparação (41%) (SANIN, 1997 *apud* SANTOS, 2010). Em virtude da não fixação total dos corantes nas fibras, na etapa de tingimento, estas indústrias geram efluentes indesejáveis (ROBINSON *et al.*, 2001; ABIQUIM, 2010; GROSSMAN *et al.*, 2012).

Além dos processos biológicos para tratamento dos efluentes têxteis, como os sistemas de lodos ativados e os filtros biológicos, há processos físicos-químicos, tais como utilização de carvão ativado e uso de terra “fuller”¹ e bauxita ativada para adsorção de corante dos despejos do tingimento, neutralização do ácido resultante do tingimento por meio da adição de cal e biológicos, dentre outros (BRAILE; CALVALCANTI, 1993).

A adsorção é um processo físico-químico no qual uma substância é atraída e aderida para a superfície de outra substância, sem, contudo, haver sua absorção. Uma das principais vantagens deste processo é a boa capacidade de adsorção de contaminantes orgânicos (DRINAN, 2000).

O material mais usado como adsorvente é o carvão ativado granular que tem eficiência na remoção de corantes, porém apresenta maior custo e superfície eletricamente positiva, inviabilizando a adsorção de alguns corantes como o azul de metileno (MONTANHER, 2011).

¹ Terra “fuller” é uma argila natural que tem como característica ser dura quando seca e semiplástica quando úmida. É composta por silicato de alumínio e argilominerais como a montmorilonita (CURBELO, 2002).

Desta forma, algumas pesquisas já foram realizadas a fim de avaliar resíduos da construção civil como alternativa ao uso do carvão, tais como pó de serragem (GARG *et al.*, 2004; HAMDAOUI, 2006; ANTUNES *et al.* 2010; IKENO, 2013; VALCARENGHI; RIBEIRO 2013; PASSIG *et al.*, 2014) e materiais que contenham argila (SILVA, 2005; ALVES 2013), como por exemplo, os blocos cerâmicos (SANTOS, 2010).

Nestes trabalhos, os autores observaram remoção de corante por adsorção de mais de 90% (SILVA, 2005); remoção de 100% de azul de metileno nas concentrações de 400 mg/L e 500 mg/L com argila montmorilonita (SANTOS, 2010) e 95,6% com caulinita (ALVES, 2013).

Garg *et al.* (2004) utilizaram resíduos de serragem de madeira rosa da Índia e observaram remoção por adsorção de 100% utilizando carvão ativado granular, 92% com serragem tratada com ácido sulfúrico (SDC) e 87,1% com serragem tratada com formaldeído em concentração de corante de 50 mg/L. Resultados similares obtiveram Valcarenghi e Ribeiro (2013) com remoção de 98,2% com pó de serragem de MDF, 97,9% com pó de serragem de madeirite e 100% com carvão ativado granular. Passig *et al.* (2014) obtiveram remoção de 94,6% e Ikeno (2013) de 81,8% utilizando pó de serragem do gênero *Pinus sp.*

De acordo com dados do Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Industriais do Estado do Paraná, fornecido pelo IAP, mais de 179 mil toneladas de resíduos foram geradas no ano de 2004 e este valor aumentou para mais de um milhão e meio de toneladas em 2009. A porcentagem de resíduos de madeira gerada em relação ao total de resíduos gerados é de 13,17%, ou seja, fica evidente que além do aumento considerável ao longo dos anos, grande parcela dos despejos é advinda das indústrias madeireiras, da construção civil e marcenarias. Portanto, faz-se necessário promover uma destinação final adequada de tais resíduos.

Dentro deste contexto, é proposta a avaliação da adsorção do corante azul de metileno em uma solução aquosa com o pó de serragem do gênero *Erismia uncinatum Warm* como material adsorvente, devido ao seu menor custo, disponibilidade e por ser passivo ambiental.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo geral deste trabalho é analisar a eficiência da utilização do pó de serragem do gênero *Erismia uncinatum* Warm na adsorção do corante azul de metileno em solução aquosa.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Determinar as características físico-químicas do material adsorvente;
- Avaliar a influência da variação da temperatura em 30 °C, 34 °C, 45 °C, 56 °C, 60 °C na remoção do azul de metileno em solução aquosa;
- Avaliar a influência da variação do pH em 3, 4, 7, 10 e 11 na remoção do azul de metileno em solução aquosa e;
- Analisar a cinética de adsorção do pó de serragem com variação de temperatura e pH com base nos modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem.

3 JUSTIFICATIVA

As indústrias têxteis são caracterizadas por utilizarem diversos corantes para a etapa de tingimento. Cerca de um milhão de toneladas de corantes são produzidas por ano mundialmente, sendo a maior parte destes corantes utilizada nas indústrias têxteis, que ao lançarem seus efluentes nos corpos hídricos causam alterações visuais, toxicidade, impedimento da fotossíntese das algas (SANTOS, 2005) e lançamento de metais pesados advindos da molécula do corante, os quais são prejudiciais à saúde (BELTRAME, 2000; SAGGIORO *et al.*, 2015).

De acordo com dados da Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT, 2013), a produção de têxteis e confeccionados cresceu 34% na última década na produção mundial. O Brasil participa com 3% de produção de têxteis sendo o quinto país em produção.

Segundo Karpinski (2009), embora a construção civil tenha importância na indústria e seja considerada como indicadora de crescimento social e econômico, a geração e a destinação de seus resíduos acarretam em impactos ambientais.

Tendo em vista a geração de resíduos na construção civil e o lançamento de efluentes têxteis contendo corantes, justifica-se a preocupação de aproveitamento destes resíduos, tais como o pó de serragem e materiais cerâmicos como adsorventes do corante, minimizando os impactos ambientais provenientes deste ramo industrial.

Neste trabalho visa à ampliação de desenvolvimento de pesquisas, na área de saneamento, realizadas com auxílio da infraestrutura fornecida pela UTFPR, além de proporcionar um incentivo para novas pesquisas.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 INDÚSTRIA TÊXTIL

A indústria têxtil passou por transformações ao longo dos anos, com desenvolvimento de tecnologias que permitiram ganho substancial em sua produtividade, bem como incrementou a importância do comércio entre os blocos econômicos. Com mudanças tecnológicas em setores que servem de base para a indústria têxtil, tais como o químico, com fibras e tecidos artificiais e sintéticos; o de bens de capital e o eletroeletrônico (equipamentos) foi possível obter avanços no setor têxtil (GORINI, 2000).

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), os custos com a fabricação de artefatos têxteis para uso doméstico somaram mais de 745.000 mil reais em 2005, 1.761.322 mil reais em 2010 e 2.807.889 mil reais em 2013 no Brasil, indicando que o ramo têxtil está cada vez mais expressivo.

Segundo dados da Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT, 2010), o consumo no Brasil de vestuário e têxteis será mais exigente independente de renda, etnia ou idade, elevando o volume per capita consumido. Ainda de acordo com os dados da ABIT (2010), o Brasil foi o quinto país no ranking de produção de têxteis com uma produção de 2.249 mil toneladas, o que representa 3% de toda a produção mundial. Em relação à produção de vestuários, o Brasil produziu 1.271 mil toneladas, valor esse que representa 2,8% da produção mundial em vestuário, em 2010. Com dados do Instituto de Estudo e Marketing Industrial (IEMI) é possível notar crescimento de 15,9% da produção de têxtil no país em 2016.

As etapas que compõem o ramo têxtil são fiação, tecelagem, malharia, acabamento e ou beneficiamento (GORINI, 2000). Nesta última etapa é realizado tingimento no qual ocorre a fixação do corante à fibra e lavagem em banhos para retirar o corante em excesso, sendo responsável pela emissão de poluentes no ambiente (GURATINI E ZANONI, 2000).

A quantidade de indústrias neste ramo cresceu 0,9%. Há um impacto social evidente com a quantidade de mais de 1,6 milhões de postos de trabalho gerados

em 2014, equivalente a 16,8% do número de funcionários que prestaram serviços na produção de indústrias, no âmbito nacional (SINTEX, 2015).

4.1.1 Etapas da indústria têxtil

As etapas do processo produtivo da indústria têxtil são divididas em matéria-prima, fiação, tecelagem ou malharia e beneficiamento, como pode ser observado na Figura 1.

O início do processo se dá com as fibras e filamentos, que são as matérias primas, as quais são transformadas em fios no processo de fiação (ALCÂNTARA; DALTIM, 1996; FORGIARINI, 2006; BEZERRA, 2014). As fibras têxteis podem ser divididas em naturais de origem animal como seda e lã; vegetal como algodão; mineral como o amianto; e não naturais sendo divididas em artificiais ou reagentes (viscose e acetato) e sintéticas (acrílico, elastano, poliamida, poliéster) (ALCÂNTARA; DALTIM, 1996).

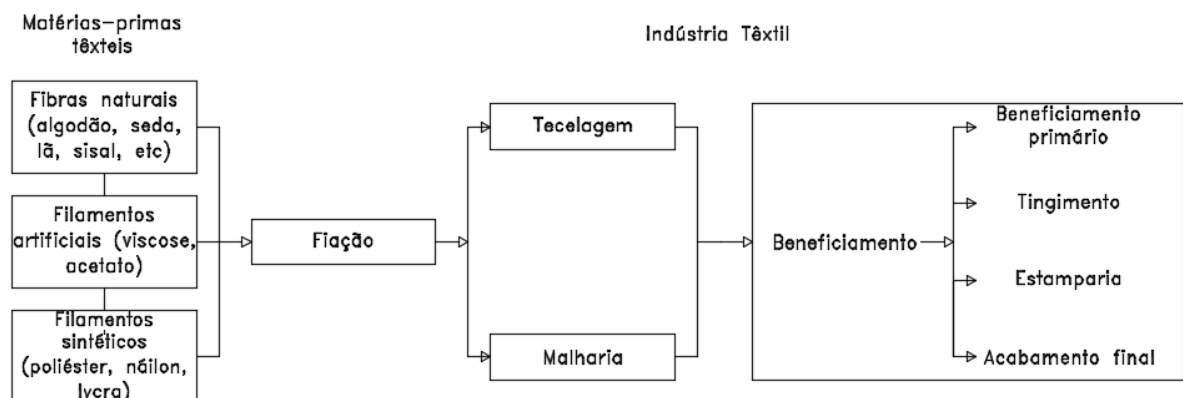


Figura 1 - Fluxograma das etapas de produção de uma indústria têxtil

Fonte: Elaborado com dados de Alcantara; Daltin (1996).

Após a fiação propriamente dita, é realizada a tecelagem que consiste em cruzar dois sistemas de fios paralelos (ALCÂNTARA; DALTIM, 1996), transformando os fios em panos (BRAILE; CALVALCANTI, 1993).

A etapa de beneficiamento consiste em sub-etapas tais como

beneficiamento primário em que é realizada a preparação do tecido (com processo de desengomarem, limpeza, mercerização e alvejamento químico) para posterior utilização no tingimento, estamparia e acabamento final (ALCÂNTARA; DALTIM, 1996).

O tingimento é a fase em que é proporcionada cor desejada ao tecido. Em função da variação de corantes e auxiliares utilizados no tingimento, esta etapa é uma das mais complexas. A exigência por diferentes tipos e combinações de cores, em diversos ramos em que se emprega o têxtil, é evidente até mesmo em têxteis utilizados dentro de interiores de carros como tons de azul e preto escuro (HARDCASTLE, 2001).

A seleção de cores deve levar em conta características como afinidade (em que o corante deve ser integrado à fibra); igualização, ou seja, deve haver uniformidade da cor no produto; solidez, ou seja, resistência à possíveis desbotamentos e economia (BELTRAME, 2000; ABIQUIM, 2010).

No tingimento de malhas e tecidos é utilizada grande quantidade de água e produtos químicos, que muitas vezes são lançados no ambiente sem prévio tratamento (BRAILE; CAVALCANTI, 1993; SILVA; LIMA, 2008; DASH *et al.*, 2012; CABRAL *et al.*, 2013).

A estamparia é a operação que ocorre por meio da aplicação de um desenho colorido no produto em questão. O acabamento é a fase em que irá conferir características como, por exemplo, brilho, resistência e aspecto (FREITAS, 2002). Todas as etapas de uma indústria têxtil contribuem com despejos para o ambiente (BRAILE; CAVALCANTI, 1993).

Um dos principais despejos é o volume de água utilizado nas etapas de lavagem para remoção do excesso de corantes que não reagiram e, portanto, não foram fixados nas fibras. Desta forma, são lançados nos corpos hídricos, o que provoca problemas ambientais (CARREIRA, 2006).

Na Tabela 1 são apresentados os corantes e respectivos valores de produção em toneladas, percentuais de perda, valores estimados máximos perdidos em toneladas e o grau de potencial poluidor no Brasil para o ano de 2002 (CARREIRA, 2006).

Tabela 1 - Consumo no Brasil de corantes e estimativas de não fixação

Corantes	Produção (ton)	(%) de perda	Valor estimado máximo perdido (ton)	Potencial Poluidor
Ácido	3,175	7 - 20	635	Baixo
Azóico	143	5 -10	14	Alto
Básico	424	2 – 3	13	Baixo
Direto	1.051	5 – 30	315	Alto
Disperso	1.507	5 – 20	301	Alto
Pré-metalizados	280	1 – 5	14	Alto
Reativo	4.614	5 – 50	2.307	Alto
Sulfurosos	2.390	30 – 40	956	Alto
Vat (tina)	499	5 – 20	100	Alto
Branqueador Óptico	31.486	-	-	-
Pigmentos orgânicos	5.872	1 -2	117	Baixo
Totalização	51.438	-	4.772	-

Fonte: CARREIRA, 2006.

4.1.2 Uso da água na indústria têxtil

A água utilizada na produção de têxteis tem sido avaliada não como um custo irrelevante, mas sim como um custo a mais no tingimento para as empresas (SILVA e LIMA, 2008). Para a Agência Nacional de Água (ANA), a quem detém a responsabilidade da cobrança do uso da água, o consumo da água também têm sido considerado como um fator a mais nos custos (ZAMORA, 2002; PAGAN, 2011).

Nos processos têxteis utiliza-se a água em diversas etapas seja diretamente como no tingimento, lavagem e amaciamento, quanto indiretamente para aquecer ou resfriar no beneficiamento. Como exemplo, tem-se como utilidade da água a condução e posterior remoção do excedente de produtos químicos. Uma parcela contida nos efluentes de contaminantes têm impurezas intrínsecas à matéria-prima, como por exemplo, a adição de produtos que venham a auxiliar facilitando na fiação e tecelagem, bem como também produtos químicos auxiliares e corantes (TWARDOKUS, 2004; ATIMTAY; SIKDAR, 2010; SILVA, 2011; CABRAL *et al.*, 2013).

Na Alemanha, o consumo de água na tinturaria é cerca de 80 L/kg de malha

beneficiada. Porém, em países da América Latina, mesmo com a utilização de tecnologia semelhante, mesmo substrato e corante, este consumo é em torno de 150 L/kg. Na Tabela 2 são apresentados dados do consumo de água e intervalos de variação em função dos diferentes tipos de matérias utilizadas para tingimento (HART, 1994 *apud* PAGAN, 2011).

Tabela 2 - Consumo de água devido ao tingimento na produção têxtil

Tingimento de	Consumo de água/massa produzida (L/kg)	Intervalo de variação (L/kg)
Fios acrílicos e <i>nylon</i>	130	80 - 170
Fios acrílicos, <i>nylon</i> e algodão	180	130 - 350
Malha de algodão	120	80 - 160
Malha de algodão e poliéster	110	90 - 170
Tecido plano de algodão	110	85 - 130
Tecido plano de seda e viscose	100	80 - 150

Fonte: HART, 1994 *apud* PAGAN, 2011.

Em função deste consumo, a indústria têxtil deve tomar as devidas providências para promover reciclagem, reutilização e tratamento desta água a fim de mitigar problemas ambientais que sejam gerados (ATIMTAY; SIKDAR, 2010).

Na Resolução 430/2011 (complementar à Resolução 357 de 2005) do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA estão dispostas as condições e os padrões que devem ser obedecidos para o lançamento de efluente seja qual for a fonte. Em conjunto com essas resoluções, a Lei Federal nº 9.433/97, referente à Política Nacional de Recursos Hídricos tem como objetivo assegurar às gerações futuras água com padrões de qualidade para o devido uso.

Na Tabela 3 a seguir estão expostos dados referentes à poluição orgânica gerada pela indústria têxtil bem como as cargas de DBO por unidade produzida e os equivalentes populacionais.

Tabela 3 - Características das águas residuárias de uma indústria têxtil

Tipo	Produção	Vazão específica de esgotos (m³/un)	Carga específica de DBO (kg/un)	Equiv. Popul. de DBO [hab/(un/d)]	Concentração de DBO (mg/L)
Algodão	1t	120-750	150	2.800	200-1.500
Lã	1t	500-600	300	5.600	500-600
Rayon	1t	25-60	30	550	500-1.200
Nylon	1t	100-150	45	800	350
Poliéster	1t	60-130	185	3.700	1.500-3.000
Lavanderia de lã	1t	20-70	100-250	2.000-4.500	2.000-5.000
Tinturaria	1t	20-60	100-200	2.000-3.500	2.000-5.000
Alvejamento de tecidos	1t	-	16	250-350	250-300

Fonte: VON SPERLING, 1995.

4.2 CORANTES

Corantes são compostos orgânicos complexos, geralmente aplicados em algum substrato, como as fibras, com o objetivo de imprimir determinada cor (ABIQUIM, 2010). Os corantes advindos dos efluentes industriais ou esgotos domésticos têm estrutura molecular complexa uma vez que há mistura de compostos. A coloração da água por sólidos dissolvidos restringe o uso desta água, causa impacto visual negativo, dependendo do tipo de corante, pode apresentar toxicidade, retarda a fotossíntese, inibe o crescimento da biota aquática e pode interferir na solubilidade de gases no corpo de água (PHILIPPI, 2005; HAMDAR, 2006).

Os corantes podem ser divididos conforme a aplicação a que se destinam (à tina, ácidos, azóicos, básicos, diretos, dispersos, reativos, dentre outros) e de acordo com a classe química: acridina, enxofre, azo, azóicos, metina e polimetina, dentre outros (ABIQUIM, 2010).

No Brasil, a maior parte dos corantes utilizados são os reativos para fibras celulósicas, correspondendo a 57% do consumo, enquanto os corantes dispersos

têm percentual de 35%, seguidos da poliamida com 3% e do acrílico com 2% (ABIQUIM, 2010).

A cor é um dos parâmetros usados para analisar a qualidade da água. A presença de corante no corpo hídrico, além de ser facilmente detectada e causar um aspecto estético negativo, impede a realização de fotossíntese pelos organismos presentes no meio, como também altera o quadro de solubilidade dos gases, afetando fauna e flora aquática (SILVA, 2011).

Em virtude da não fixação completa do corante à fibra (ABIQUIM, 2010; GROSSMAN *et al.*, 2012), uma vez que os corantes não são capazes de tingir todas as fibras, assim como há fibras que não são tingidas por todos os corantes, há um despejo destes no efluente (SILVA, 2011).

Na Tabela 4 podem ser observadas classes de alguns corantes utilizados na indústria têxtil, e as respectivas características, tipos de substratos, como ocorre a interação entre a fibra e o corante e métodos de aplicação (DASH *et al.*, 2012).

Tabela 4 - Caracterização de classes de corantes utilizadas na indústria têxtil

Classe	Característica	Substrato (fibra)	Interação fibra corante	Método de aplicação
Ácido	Agentes tensoativos aniônicos, solúveis em água	Nylon, lã, seda	Eletrostática, pontes de hidrogênio	Aplicado do natural para banhos de corante ácido
Básico	Catiônicos, solúveis em água	Nylon modificado e poliéster	Atração eletrostática	Aplicado para banhos de corantes ácidos
Direto	Agentes tensoativos aniônicos, solúveis em água	Algodão, seda artificial, couro, nylon	Forças intermoleculares	Aplicado a partir de natural ou banhos ligeiramente alcalinos que contêm eletrólitos adicionais
Disperso	Solubilidade muito baixa em água	Poliéster, poliamida, acetato, plástico, acrílico	Estado sólido hidrofóbico	Dispersões aquosas finas, muitas vezes aplicadas pela alta temperatura e pressão ou temperatura mais baixa
Reativo	Agentes tensoativos aniônicos, solúveis em água	Algodão, nylon, seda, lã	Ligação covalente	Local reativo no corante reage com grupo funcional na fibra para ligar covalentemente com corante sob a influência de calor e pH (alcalino)
Sulfuroso	Coloidal, insolúvel	Algodão e raíom	Ligação covalente	Substrato aromático e re-oxidados para produtos insolúvel contendo enxofre em fibras

Fonte: Adaptado de Dash *et al.* (2012).

O corante azul de metileno ($C_{16}H_{18}ClN_3S$), também conhecido como azul básico 9 trihidratado, é um corante classificado como básico, de acordo com a o tipo de fixação do corante à fibra,, é orgânico, catinônico, facilmente solúvel em água e com carga positiva descentralizada. Ainda que não seja considerado perigoso, este corante pode causar náusea e gastrite quando ingerido, além de causar problemas respiratórios quando inalados (ALMEIDA, 2005).

A estrutura do corante azul de metileno contendo um grupo amina secundário é apresentada na Figura 2.

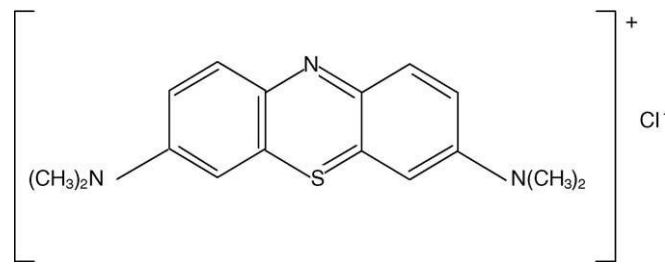


Figura 2 - Estrutura molecular do corante azul de metileno

Fonte: HAMDAOUI, 2006.

O azul de metileno é classificado como fenotiazina devido ao tipo do grupo cromóforo, que é responsável pela cor e está relacionado com a estrutura molecular química do corante (MONTANHER, 2011).

4.3 TRATAMENTO DE EFLUENTE TÊXTIL

O tratamento de efluentes industriais têxteis depende de uma série de fatores, tais como, tipos de corantes utilizados, natureza distinta dos corantes, qualidade exigida da água residuária para posterior reutilização, bem como também da qualidade mínima exigida para lançamento deste efluente tratado em corpos hídricos, dentre outros.

Em função da diversidade na natureza complexa dos efluentes, um

tratamento simples não é suficiente para tratar o efluente, sendo necessária utilização de mais de um tipo de método para se obter condições aceitáveis (CRINI, 2006).

Efluentes com corante podem ser tratados por métodos físico-químicos de floculação, coagulação, precipitação, adsorção, filtração em membrana, irradiação, ozonização e oxidação de Fenton (GROSSMAN *et al.*, 2012) e processos biológicos com sistemas de lodos ativados, filtros biológicos (BRAILE; CALVALCANTI, 1993; ZAMORA, 2002). Entretanto, nestes processos, o corante é apenas separado da fase líquida, permanecendo no lodo físico-químico ou biológico, ou então adsorvido no material adsorvente. Portanto, há necessidade de tratamento ou disposição final do lodo e do material adsorvente (KAMMRADT, 2004).

Os métodos físico-químicos de coagulação, floculação e decantação têm elevada eficiência para remoção de material em suspensão coloidal e particulado. Todavia, esta eficiência não é satisfatória para remoção de cor (KAMMRADT, 2004).

De acordo com Trevizani (2015), o processo por ozonização é eficiente uma vez que foi obtido percentual significativo de valores maiores que 90% na remoção do azo corante vermelho br para todas as variações de pH e concentração inicial de corante. No caso da ozonização, uma das principais desvantagens é a geração de subprodutos que podem ser até mais prejudiciais que os componentes de resíduos originais (MORAN, 1998).

Na classificação de tratamento secundário, os tratamentos do tipo biológico principais são sistemas de lodos ativados e filtros biológicos (BRAILE e CALVALCANTI, 1993; ZAMORA, 2002). Estudos anteriores demonstram que a digestão aeróbia utilizando lodo ativado não tem completa degradação do efluente têxtil, assim como também não reduz sua toxicidade. Após a degradação é necessário tratamento adicional como a oxidação (exemplo a ozonização), adsorção (por exemplo, com carvão ativado) e filtração. A oxidação é aplicada para remover cor e os agentes oxidantes comuns incluem o ozônio, peróxido de hidrogênio e o reagente Fenton. Tal descoloração é conseguida destruindo-se o cromóforo da molécula (MORAN, 1998).

No sistema de lodos ativados ocorre a geração de lodo com alta porcentagem de corante adsorvido, sendo desta forma necessária destinação adequada destes resíduos (ZAMORA, 2002).

Na Tabela 5 estão expostas as distintas formas de tratamento físico-químico

para remoção de corantes em efluentes têxteis, bem como suas principais vantagens e desvantagens.

Tabela 5 - Processos físico-químicos de tratamento de efluentes têxteis

Processos físico-químicos	Vantagens	Desvantagens
Reagente Fenton	Descoramento efetivo de corantes solúveis e insolúveis	Geração de lodo
Ozonização	Aplicado em fase gasosa: sem alteração de volume	Tempo de meia-vida curto (20 min)
Fotoquímico	Não há produção de lodo	Formação de sub-produtos
Destruição eletroquímica	Compostos gerados não são perigosos	Elevado custo de energia
Carvão ativado	Boa remoção de grande variedade de corantes	Custo alto
Pó de serragem	Boa capacidade de sorção para corantes ácidos	Requer longo período de retenção
Sílica gel	Efetiva para remoção de corantes alcalinos	Reações paralelas inviabilizam aplicação comercial
Filtração por membranas	Remove todos os tipos de corantes	Produção de lodo concentrado
Troca iônica	Regenerável: não há perda de adsorvente	Não efetiva para todos os corantes
Coagulação eletrocinética	Economicamente viável	Produção significativa de lodo

Fonte: Adaptado de Robinson *et al.* (2001).

O pó de serragem, assim como descrito na Tabela 5, tem como desvantagem, o fato de exigir um tempo de contato com o corante maior quando comparado, por exemplo, com o carvão ativado. Isto pode ser observado no trabalho de Valcarenghi e Ribeiro (2013), em que ao utilizarem pó de serragem MDF e madeirite, foi necessário um tempo maior de contato com o corante para se obter o mesmo percentual de remoção do corante obtido quando comparado com a utilização do carvão ativado.

O processo de adsorção é amplamente utilizado para remover certas classes de poluentes dos efluentes, em especial aqueles que não são facilmente biodegradáveis. Atualmente, uma combinação de tratamento biológico e de adsorção em carvão ativado é cada vez mais comum para remoção de corantes dos efluentes residuais (CRINI, 2006).

4.4 ADSORÇÃO

A adsorção é o processo de enriquecimento de adsorvatos sobre a superfície de um adsorvente, ou seja, é um processo em que há acúmulo do adsorvato sobre a superfície adsorvente. O adsorvente é o material que proporciona a superfície de adsorção e adsorvato é o material que será absorvido. O processo de adsorção foi provado como eficiente na remoção de uma variedade de solutos. Na adsorção moléculas ou íons são removidos da solução aquosa por adsorção em superfícies sólidas (WORCH, 2012).

Neste processo, a quantidade máxima de adsorção é proporcional à quantidade de superfície, ou seja, de área dentro poros que é acessível ao adsorvato (LETTERMAN, 1999). Desta forma, por ser um processo que depende da superfície de materiais, a área se torna um parâmetro importante a ser analisado (WORCH, 2012).

O carvão ativado é um dos principais adsorventes utilizados para tratamento de efluentes, uma vez que, em função das características da estrutura de poros e área superficial elevada, permite eficiente remoção de corantes (ROBINSON *et al.*, 2001; MONTANHER, 2011; WORCH, 2012; SAGGIORO *et al.*, 2015) e remoção de compostos orgânicos como o fenol e o bisfenol, os quais podem ser encontrados em tintas e resinas epóxis. A remoção destes compostos tóxicos foi de 96% para o carvão ativado de matriz carbonácea betuminosa e 91% para o carvão de matriz carbonácea vegetal (SAGGIORO *et al.*, 2015).

Entretanto, de acordo com os estudos de Crini (2006), a adsorção não aumenta sempre com a área de superfície, tendo em vista que além da estrutura física, a capacidade de adsorção de um dado tipo de carvão ativado depende também da natureza química da superfície, sendo que o caráter ácido ou básico do carbono influencia a natureza das isotermas do corante. Outro fator é que a capacidade de adsorção depende também da acessibilidade dos poluentes para a superfície do adsorvente, dependendo, portanto, do tamanho dos poros.

A adsorção pode ser classificada como física (fisiossorção) e química (quimiossorção) de acordo com o tipo de ligação, ou seja, da forma como os átomos e moléculas podem se aderir na superfície de um adsorvente (SCHMAL, 2010).

Na adsorção física, a interação das moléculas adsorvidas com a superfície

do material adsorvente é fraca, sendo essas forças da mesma ordem de grandeza das forças Van der Waals. Esse processo, em função da fraca energia de interação com o substrato, atinge rapidamente o equilíbrio, sendo um processo reversível e que ocorre em baixas temperaturas (SCHMAL, 2010).

A adsorção química é caracterizada por envolver interações fortes e ser um processo irreversível, onde ocorre a formação de ligação química entre o substrato adsorvente e o adsorvato. Neste processo, períodos longos ocorrem até ser atingido o equilíbrio, quando em altas temperaturas (SCHMAL, 2010).

A adsorção é um processo que tem um custo menor que outras formas de tratamento, não tem sensibilidade quanto às substâncias tóxicas, além de ser um processo simples no qual é de fácil operação (HAMDAOUI, 2006).

Trabalhos e pesquisas científicas têm sido desenvolvidos no ramo acadêmico sobre a adsorção de tipos diferentes de corante, entre eles o azul de metileno, nos quais se utilizaram materiais adsorventes de baixo custo, em substituição do carvão ativado de custo mais elevado (GARG *et al.*, 2004; VALCARENH; RIBEIRO, 2013; SAGGIORO *et al.*, 2015), tais como: pó de serragem (GARG *et al.*, 2004; ANTUNES *et al.*, 2010; IKENO, 2013; VALCARENH; RIBEIRO, 2013); lilito barro branco (ALMEIDA, 2005); materiais cerâmicos (SILVA, 2005; SANTOS, 2010; MENEGARO *et al.*, 2012; ALVES, 2013); mesocarpo de coco verde (MONTEIRO, 2010); cinza da casca de arroz (BLOSFELD, 2009).

4.5 PÓ DE SERRAGEM

De acordo com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2016), a madeira do gênero *Erismia uncinatum* Warm, também conhecida com o nome popular de cambará-rosa, pode ser encontrada em países da América do Sul, como Brasil, Guiana Francesa e Suriname.

Embora esta madeira não apresente superfície de acabamento boa, sua trabalhabilidade é ideal, uma vez que é fácil de lixar, serrar e aplinar, tendo ampla aplicabilidade no ramo da construção civil, como no uso de esquadrias, estrutural (como, por exemplo, as ripas), utilidade em geral (lambri, molduras, forros), uso

temporário (andaimes, formas para concreto, pontaletes, mobiliário, dentre outros usos).

Segundo a Resolução CONAMA 307, de 17 de julho de 2002, os resíduos da construção civil podem ser divididos em quatro classes: A, B, C e D. Os resíduos devem ser separados e destinados conforme a classificação de acordo com a sua natureza, a fim de reaproveitar ou reciclar.

A madeira é classe B, logo, este material pode ser vendido para organizações que possam utilizá-la como matéria-prima ou material energético; pode ser reutilizada na obra ou encaminhada para reaproveitamento (KARPINSKI, 2009). Somado a isto e à grande porcentagem de 13,17% de resíduos de madeira gerada em relação ao total de resíduos gerados (IAP, 2009), tem-se realizado estudos a fim de utilizar pó de serragem como material adsorvente (CRINI, 2006).

Nos trabalhos de Garg *et al.* (2004), Antunes *et al.* (2010), Ikeno (2013) e Valcarenghi e Ribeiro (2013) foram realizados ensaios sob condições diferentes tais como variação de dosagem de adsorvente, concentração inicial, pH e tempo de contato, para avaliar o maior percentual de remoção de corante. Os resultados destes estudos estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Estudos com pó de serragem para remoção de corante

Adsorvente	Adsorbato	Concentração do Adsorbato	% de remoção	Autores
Gênero não identificado	<i>Direct Green</i> 26	500 mg/L	78,8	Antunes <i>et al.</i> , ,2010
<i>Indian Rosewood</i> tratada com formaldeído	Azul de metileno	250 mg/L	73,7	Garg <i>et al.</i> , 2004
<i>Indian Rosewood</i> tratada com ácido sulfúrico	Azul de metileno	250 mg/L	82,2	Garg <i>et al.</i> , 2004
<i>Indian Rosewood</i> tratada com formaldeído	Azul de metileno	150 mg/L	90,6	Garg <i>et al.</i> , 2004
<i>Pinus sp.</i>	Azul de metileno	150 mg/L	81,8	Ikeno, 2013
Madeirite	Azul de metileno	150 mg/L	97,9	Valcarenghi e Ribeiro, 2013
MDF	Azul de metileno	150 mg/L	98,2	Valcarenghi e Ribeiro, 2013

4.6 CINÉTICA DE ADSORÇÃO

A cinética de adsorção é um estudo em que é possível conferir a influência de fatores como a temperatura, na velocidade de adsorção de um material adsorvente (HAMDAOUI, 2006).

O modelo cinético de pseudo-primeira ordem de Lagergren (1898) está expresso na Equação 1.

$$\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - \frac{k_1}{2,303} t \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

q_e = Capacidade de adsorção no equilíbrio (mg/g);

q_t = Capacidade de adsorção em um tempo qualquer t (mg/g);

k_1 = Constante cinética de pseudo-primeira ordem de adsorção (1/min).

O modelo cinético de pseudo-segunda ordem está expresso na Equação 2.

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 \times q_e^2} + \frac{1}{q_e} \times t \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

q_e = Capacidade de adsorção no equilíbrio (mg/g);

q_t = Capacidade de adsorção em um tempo qualquer t (mg/g);

k_2 = Constante cinética de pseudo-segunda ordem de adsorção (mg/g.min).

4.7 ESTUDOS DE CASO

O azul de metileno é um corante que tem sido utilizado, em pesquisas acadêmicas recentes, no processo de adsorção em que são utilizados substratos distintos, como se pode observar na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados de casos com utilização do azul de metileno

Adsorvente	Concentração	% de remoção	Referência
Pó de serragem	300 mg/L	99	Markandeya <i>et al.</i> , 2015
Argila natural	100 mg/L	95	Elmoubarki <i>et al.</i> , 2015
Pó de serragem: <i>Eucalyptus globulus</i>	12 g/L	98	Akrouit <i>et al.</i> , 2015
Bagaço de cana de açúcar	50 mg/L	97,03	Tavares <i>et al.</i> , 2015
Carvão ativado	50 mg/L	99,9	Gandolfi <i>et al.</i> , 2015

O pó de serragem tem sido utilizado, em pesquisas recentes, como adsorvente no processo de adsorção de diversos adsorbatos como azul de metileno, diclofenato de sódio e azul reativo como pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8 - Estudos de caso com utilização de pó de serragem

Adsorbato	Concentração	% de remoção	Referência
Azul de metileno	300 mg/L	99	Markandeya <i>et al.</i> , 2015
Azul de metileno	58 mg/L	98	Akrouit <i>et al.</i> , 2015
Diclofenaco de sódio	100 mg/L	86	Silva, 2015
Azul reativo	50 mg/L	88	Ratnamala <i>et al.</i> , 2016

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios para caracterizar o material adsorvente foram realizados nos laboratórios de Materiais e Agregados e de Saneamento do Departamento Acadêmico de Construção Civil (DACOC), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Curitiba, sede Ecoville.

O corante escolhido como adsorvato foi o azul de metileno, uma vez que é utilizado nas indústrias têxteis e já foi utilizado em outros trabalhos de adsorção (GARG *et al.*, 2004; SILVA 2005; HAMDAR, 2006; BULUT; AYDIN, 2006; SANTOS, 2010; IKENO, 2013; VALCARENGH; RIBEIRO, 2013) e porque sua estrutura é bem conhecida.

O material adsorvente utilizado foi o pó de serragem do gênero *Erismia uncinatum Warm*, o qual foi obtido em uma marcenaria no município de Curitiba, o qual foi armazenado até a sua utilização.

5.1 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Com o objetivo de otimizar resultados e analisar a influência de variáveis no processo de adsorção (fatores de tempo de ensaio, concentração inicial e pH na eficiência de remoção do azul de metileno) foi elaborado um delineamento composto central rotacional (DCCR) como planejamento dos experimentos.

Foi utilizado um software de estatística para realizar a análise estatística dos resultados obtidos nos ensaios realizados de acordo com o planejamento do delineamento composto central rotacional.

Na Tabela 9 está exposta a matriz do delineamento composto central rotacional com os níveis dos fatores analisados, as variáveis codificadas e as variáveis descodificadas.

Tabela 9 - Matriz do delineamento composto central rotacional

Ensaio	Variáveis codificadas		Variáveis descodificadas	
	Temperatura	pH	Temperatura	pH
1	-1	-1	34	4
2	+1	-1	56	4
3	-1	+1	34	10
4	+1	+1	56	10
5	-1,414	0	30	7
6	+1,414	0	60	7
7	0	-1,414	45	3
8	0	+1,414	45	11
9	0	0	45	7

5.2 CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DE SERRAGEM

As caracterizações físico-químicas foram realizadas com ensaios para determinação da densidade específica, densidade aparente, pH, teor de umidade e granulometria do pó de serragem conforme as normas descritas na Tabela 10.

Tabela 10 - Ensaios e normas utilizadas

Ensaio	Norma
Densidade específica	NBR NM 52/2009
Densidade aparente	NBR NM 52/2009
pH	ASTM D 3838-80/1999
Teor de umidade	ASTM D 2867/2004
Granulometria	NBR NM 248/2013

5.2.1 Determinação da densidade específica

A determinação da densidade específica do material pó de serragem foi

efetuada de acordo com a NBR NM 52/2009, em triplicada, no Laboratório de Saneamento.

Neste ensaio, utilizou-se um frasco de Le Chatelier com capacidade de 250 cm³, no qual foi adicionado querosene, por ser um líquido que não reage quimicamente com o material, até o nível compreendido entre as marcas correspondentes a zero e 1,0 cm³. Foi registrada a primeira leitura (V_1) medida em cm³, com precisão de 0,1 cm³. O ensaio foi realizado com as mesmas medidas utilizadas por Valcarengh e Ribeiro (2013). Os autores utilizaram um funil para colocar 25 g de pó de serragem no frasco a fim de deslocar o volume do líquido compreendido entre as marcas correspondentes de 18 cm³ e 14 cm³.

Em seguida, o frasco foi tampado e girado em posição inclinada até que não se verificasse bolhas de ar que subissem até a superfície do líquido. Por fim, foi feita a realização da leitura final (V_2), também com aproximação de 0,1cm³. A massa específica do material foi calculada pela Equação 3.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

ρ = Massa específica do material ensaiado (g/cm³);

M = Massa do material adsorvente (g);

V = Volume deslocado pela massa do material ensaiado ($V_2 - V_1$) (cm³).

5.2.2 Determinação da densidade aparente

A densidade aparente foi procedida em triplicada com base nos procedimentos descritos na NBR NM 52/2009.

Uma quantidade de amostra de pó de serragem, suficiente para atingir a marca de 250 cm³ em uma proveta PHOX (250 cm³), foi pesada em uma balança analítica Marte BL 3200H com de precisão de 0,01g e, então colocada em uma

estufa na qual permaneceu por durante 3 horas a 130°C.

Para que houvesse o resfriamento da proveta e da amostra e fosse atingida a temperatura ambiente, o conjunto foi colocado em um dessecador, para que em seguida pudesse ser possível determinar as massas na balança analítica.

Com auxílio de um bastão de plástico, as amostras foram compactadas dentro da proveta e, em seguida, anotado o volume referente ao nível atingido pelo pó de serragem. A densidade aparente será definida por meio da Equação 4.

$$\rho_a = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad \text{Equação 4}$$

Em que:

ρ_a = Densidade aparente (g/mL ou g/cm³);

M_1 = Massa da proveta (g);

M_2 = Massa do pó de serragem e massa da proveta (g);

V = Volume determinado após a compactação do pó de serragem (mL ou cm³).

5.2.3 Determinação do pH

A caracterização do potencial hidrogeniônico (pH) foi realizado em triplicata com base na ASTM D 3838-80 (1999).

Foram pesadas 10 g de pó de serragem em uma balança analítica Marte BL 3200H com de precisão de 0,01g. Esta massa foi colocada em um enlenmeyer de 250 mL com 100 mL de água destilada.

O conjunto foi agitado durante um tempo de 15 minutos e aquecido a 90°C no equipamento Banho maria bocas modelo 314DN para então posterior filtração em um papel filtro qualitativo. Logo após o resfriamento a temperatura de 50°C, foi possível medir o pH em um pHmetro de bancada modelo PHS-3E com exatidão da unidade eletrônica de 0,01 pH.

5.2.4 Determinação do teor de umidade

A determinação do teor de umidade foi realizada segundo a técnica descrita na norma ASTM D 2867-04.

Esta norma determina que quando a amostra passar pela peneira número 50, a qual é correspondente à abertura de 0,3 mm ou 48 *mesh*, de acordo com a ABNT/ASTM, que se deve pesar de 1 a 2 g desta amostra.

Quando as partículas do material forem maiores e não passarem por esta peneira, deve-se pesar de 5 a 10 g da amostra. Desta forma, pesou-se uma amostra, passante na peneira número 50, de 1,64g de pó de serragem, a qual foi colocada em um béquer de 50 mL, que foi previamente pesado em balança analítica e anotado seu valor. O conjunto amostra mais béquer também foram pesados. Feito isto, pode-se obter a massa do béquer, massa do conjunto béquer e pó de serragem e apenas a massa do pó de serragem.

Após determinadas as respectivas massas, o béquer foi colocado em uma estufa, onde permaneceu por durante 3 horas em uma temperatura de 150°C. Passado este tempo, o material foi retirado da estufa e colocado em um dessecador com o objetivo de que o material atingisse a temperatura ambiente e, desta forma, foi possível determinar novamente as massas e realizar o cálculo para determinar o teor de umidade conforme a Equação 5.

$$T_u = \frac{A-B}{A-C} \times 100$$

Equação 5

Em que:

T_u = Teor de umidade (%);

A = Massa do recipiente com a amostra no estado natural (g);

B = Massa do recipiente com a amostra seca (g);

C = Massa do recipiente (g).

5.2.5 Determinação da granulometria

A determinação da granulometria foi procedida conforme procedimentos descritos na NBR NM 248 (2003) em duplicata.

De acordo com a NBR NM 248 (2003), a quantidade de material a ser colocado nas peneiras não deve ser muita de maneira a formar uma camada espessa deste material em qualquer tipo de peneira. Desta forma, foram pesadas 50 g de pó de serragem as quais foram colocadas na estufa por tempo de 24 h em uma temperatura de 105° C.

Com as peneiras limpas, determinou-se a massa de cada uma das peneiras para posterior montagem, em que do topo para a base, a abertura das malhas diminui de tamanho.

Em seguida ao resfriamento do pó de serragem a temperatura ambiente, este material foi colocado na peneira de maior abertura (4,76 mm). As peneiras sobrepostas foram posicionadas dentro do peneirador eletromecânico durante período de 7 min. Decorrido este tempo, as peneiras foram retiradas do equipamento e com auxílio de uma balança, foram determinadas as massas de cada peneira e do pó de serragem que ficou retido em cada peneira.

A porcentagem referente a massa de pó de serragem que ficou retida em cada peneira foi determinado conforme a Equação 6.

$$R_a = \frac{A-B}{C} \times 100 + D \quad \text{Equação 6}$$

Em que:

R_a = Retenção acumulada (%);

A = Massa do recipiente com a amostra retida na peneira correspondente (g);

B = Massa do recipiente (g);

C = Massa total de adsorvente (g);

D = Porcentagem de retenção da peneira anterior (%).

5.3 ENSAIOS DE ADSORÇÃO

O ensaio de adsorção foi realizado em duplicata segundo o delineamento composto central rotacional como planejamento experimental e com base nas metodologias realizadas por Ikeno (2013) e Valcarengh e Ribeiro (2013).

A solução aquosa foi preparada com o corante azul de metileno ($C_{16}H_{18}N_3S$) em pó da marca Vetec Química Fina LTDA; $\lambda_{m\acute{a}x}$ = 693 nm na concentração de 0,025 g/L. Embora no trabalho de Valcarengh e Ribeiro (2013) os ensaios que apresentaram melhores eficiências de remoção tenham sido aqueles em que se utilizaram massas de 6 g, optou-se por utilizar massa de 3 g para que houvesse melhor contato entre a solução aquosa e o pó se serragem dentro dos erlenmeyers tendo em vista o afunilamento do frasco na região central.

Foram realizados 9 ensaios variando temperatura e pH conforme exposto na Tabela 5. Para avaliar o efeito da temperatura e do pH na remoção do azul de metileno, em cada ensaio de adsorção foram colocados 50 mL de solução com corante em erlenmeyers de 125 mL. Os materiais foram colocados em uma incubadora Shaker Orbital SL – 222 da marca Solab a temperatura de 30 °C, 34 °C, 45 °C, 56 °C e 60 °C com rotação de 120 rpm.

A variação do pH foi conforme determinado do delineamento composto central rotacional de 3, 4, 7, 10, 11. Foi utilizada em concentração de 0,3 M de solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) para diminuir o pH e solução de 0,00911 M de hidróxido de sódio (NaOH) para aumentar o pH.

De cada erlenmeyers foram coletadas alíquotas em intervalos de tempo de 1, 3, 5, 10, 15, 30, 45 e 60 minutos, para posterior análise do tempo com melhor eficiência de remoção.

A leitura de absorbância das amostras foi feita por meio de um espectrofotômetro Hach modelo DR 5000, com comprimento de onda de 693 nm.

6 RESULTADOS

Para melhor compreensão dos dados os resultados estão divididos em 7 itens: caracterização físico-química do pó de serragem, curva analítica, variação de pH, variação de temperatura, análise do tempo, cinética e análise estatística.

6.1 CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DE SERRAGEM

Os resultados das características físico-química do pó de serragem foram determinados de acordo com a média dos ensaios e estão expostos na Tabela 11.

Tabela 11 - Caracterização do pó de serragem

Ensaio	Valores
Densidade específica (g/cm ³)	1,40 (0,01)
Densidade aparente (g/cm ³)	0,23 (0,01)
pH	5,59 (0,01)
Teor de umidade (%)	24,00 (1,00)

Legenda: Os valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão

O valor de densidade específica de 1,48 g/cm³ foi próximo ao valor de 1,425 g/cm³ obtido para MDF e 1,401 g/cm³ obtido para madeirite nos trabalhos de Valcarenghi e Ribeiro (2013).

A densidade aparente obtida neste trabalho de 0,225 g/cm³ é inferior ao resultado de 1,45 g/cm³ obtido por Garg *et al.* (2004) e 0,36 g/cm³ verificado por Bulut e Aydin (2006). Entretanto, é similar ao resultado de 0,226 g/cm³ obtido para MDF por Valcarenghi e Ribeiro (2013). Ainda neste trabalho, os autores obtiveram valores de 0,152 g/cm³ para madeirite e 0,63 g/cm³ para o carvão ativado granular. Ikeno (2013) notou 6,15 g/cm³ para o pó de serragem e 4,15 g/cm³ para o carvão ativado.

O valor baixo de densidade aparente é coerente, uma vez que o pó de serragem é menos denso que a água, cujo valor de densidade aparente de 1 g/cm³.

O pH da amostra de pó de serragem resultou ácido de 5,59, o que também foi observado por Bulut e Aydin (2006) com 6,05 para casca de trigo; Antunes *et al.* (2010) com 4,4; Ikeno (2013) com 4,1 para pó de serragem; Valcarenghi e Ribeiro (2013) com 4,92 para MDF e 7,08 para madeirite; Passig *et al.* (2014) obtiveram 4,1 para pó de serragem de madeira do gênero *Pinus sp.* e, Akrouit *et al.* (2015) 6,2 para pó de serragem do gênero *Eucalyptus Globulus*. O carácter ácido e neutro também foram observados por Garg *et al.* (2004) com 6,5 a 7,5 para carvão ativado.

O pH neutro e alcalino são ideais quando se utiliza pó de serragem para remoção de azul de metileno, uma vez que a presença em grande quantidade de sítios ativos podem reagir com os íons do azul de metileno. Há facilidade de adsorção de cátions do corante para a área de superfície das partículas de pó de serragem carregada negativamente (AKROUIT *et al.*, 2015).

O teor de umidade obtido neste trabalho de 24% é superior ao valor de 3,82% obtido para pó de serragem tratada com ácido sulfúrico e de 3% para carvão ativado granular no trabalho Garg *et al.* (2004) e o valor de 6,4% obtido para a casca de trigo no trabalho de Bulut e Aydin (2006). Entretanto, é próximo ao obtido de 27,2% para a madeirite e superior ao valor de 12,7% obtido para o MDF e de 9% para o carvão ativado granular no trabalho de Valcarenghi e Ribeiro (2013). É um resultado superior também ao valor de 11% para o pó de serragem e 19% para o carvão ativado granular obtido por Ikeno (2013).

O maior teor de umidade obtido provavelmente pode ter sido influenciado pela forma de armazenamento do material em recipientes até a sua devida utilização. Este teor de umidade obtido significa que a amostra do pó de serragem tem maior capacidade de reter água, ou seja, é mais porosa e suporta maior quantidade de líquido quando comparado com os demais adsorventes citados de outros trabalhos.

Na Figura 3 é apresentada a curva granulométrica do pó de serragem com o percentual de material retido e as respectivas peneiras de 4,76 mm até 45 µm e o fundo.

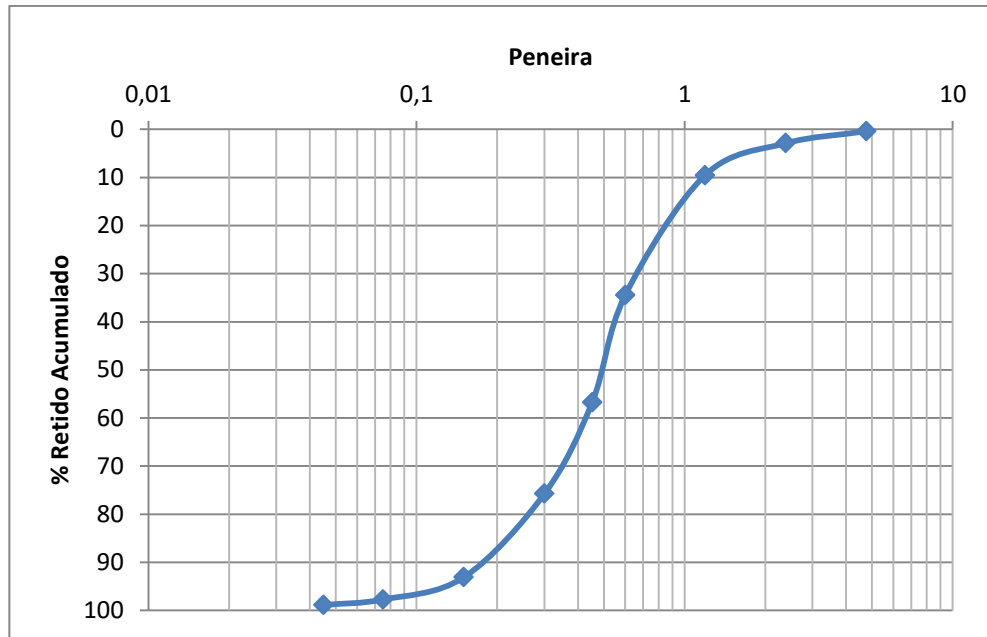


Figura 3 - Curva granulométrica do pó de serragem

O maior percentual de acumulação de material ficou entre as peneiras de 0,3 mm e 0,6 mm, em que se obteve um percentual de amostra retida de 34,50%, 56,76% e 75,74% nas peneiras de 600 μm , 425 μm e 300 μm , respectivamente. Nessa configuração, em que o maior percentual de pó de serragem retido acumulado ficou entre as peneiras de 0,3 mm e 0,6 mm, também foi obtida para a madeirite por Valcarenghi e Ribeiro (2013), em que o percentual de retenção foi em média de 34% e, já para o pó de serragem de MDF o maior percentual de retenção foi em média de 61% entre a peneira de abertura 0,15 mm e o fundo.

Antunes *et al.* (2010) identificaram que um valor de 55,3% da massa de pó de serragem correspondia à partículas com dimensões entre 75 e 300 μm . Os mesmos autores notaram que apenas 1,1% da massa de pó de serragem se caracterizava como dimensões inferiores a 50 μm . Este valor de 1,1% é similar ao resultado obtido neste trabalho de 1,14% de massa retida na peneira de abertura de 45 μm .

6.2 CURVA ANALÍTICA

A curva analítica (curva de calibração) foi determinada com auxílio do equipamento espectrofotômetro Hach modelo DR 5000. Uma quantidade de massa de 0,025g de azul de metileno foi diluída em 1 L de água destilada. Inicialmente, separou-se um pequeno volume de solução mãe suficiente para preencher o tubo para leitura do equipamento e, então foi determinada o comprimento de onda de 693 nm.

Foram determinados 7 pontos da curva de calibração, variando em 0, 5, 10, 15, 20, 30, 40 mL de solução mãe adicionados a 50, 45, 40, 35, 30, 20, 10 mL de água destilada, respectivamente.

A curva analítica do azul de metileno apresentou linearidade adequada uma vez que se obteve um bom resultado do coeficiente de correlação ($R=0,9984$).

Na Figura 4 está apresentada a curva analítica referente às concentrações do corante azul de metileno com as respectivas absorbâncias lidas pelo espectrofotômetro.

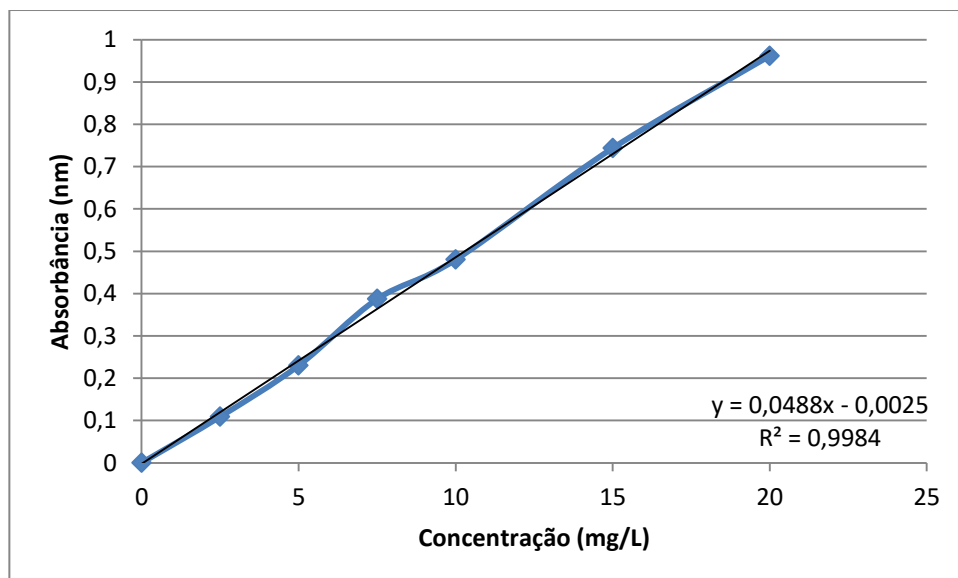


Figura 4 - Curva analítica do azul de metileno

6.3 VARIAÇÃO DO pH

Para analisar se há influência da variação do pH na remoção de azul de metileno foram realizados ensaios em 5 pH diferentes: 3, 4, 7, 10 e 11 com a utilização de massa de 3 g de pó de serragem. Os resultados obtidos com a variação de pH estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Remoção de corante com variação de pH e temperatura

Temp (°C)	pH	Tempo (min)							
		1	3	5	10	15	30	45	60
34	4	70,38	87,15	87,31	86,83	86,40	86,28	84,69	83,87
56	4	78,22	87,39	87,97	87,62	88,21	86,85	85,37	84,67
34	10	84,10	86,08	86,47	85,36	86,54	85,34	84,37	83,82
56	10	82,68	84,59	85,28	84,65	84,29	82,80	82,85	81,45
30	7	78,34	86,32	86,54	86,43	86,55	85,35	84,76	82,64
60	7	82,19	82,98	83,57	85,36	85,14	85,46	85,66	82,96
45	3	82,72	84,59	84,81	86,14	86,50	85,59	84,37	76,74
45	11	84,30	87,34	88,56	88,10	88,04	86,94	86,85	86,10
45	7	83,81	86,64	87,21	87,17	86,88	85,53	85,67	83,29

É possível observar na Tabela 12 que o melhor resultado de remoção de corante ocorreu para o valor de pH 11, com eficiência de remoção de corante de 88,56% para o tempo de 5 minutos. Em todos os ensaios realizados, o percentual de remoção de corante obtido foi acima de 70%, o que representa um excelente resultado de remoção tanto para os ensaios realizados em caráter ácido, neutro e básico.

No trabalho de Garg *et al.* (2004), o pH 7 foi o que apresentou melhor eficiência de remoção tanto para o carvão ativado quanto para o pó de serragem. Entretanto, os autores afirmam que a variação de pH não interferiu significativamente na eficiência de remoção de corante, uma vez que os valores dos resultados obtidos nos diferentes ensaios variando pH foram muito similares.

Monteiro (2010) utilizou pó de serragem e mesocarpo de coco verde para remoção de corante vermelho e violeta brilhante Remazol e em ambos os casos

notou melhores remoções para pH ácido (1 e 2). Ikeno (2013) obteve melhor remoção de corante de 79,5% no pH 7,5 e no tempo de 135 minutos. Valcarenghi e Ribeiro (2013) verificaram eficiência de 97,7% com pH 7,5 no tempo de 150 para o MDF, eficiência de 98,2% com pH 10,5 no tempo de 150 minutos para a madeirite.

Ratnamala *et al.* (2016) utilizaram concentração de corante azul reativo de 50 mg/L na remoção de pó de serragem da Malásia, no tempo de ensaio de 60 minutos e temperatura de 30 °C e observaram que o aumento de pH acarreta a uma redução de eficiência de remoção de corante. Os autores obtiveram eficiência de remoção de 90% quando a solução foi de pH 2 e de 32% quando realizaram o ensaio com pH 12. Desta forma, pode-se afirmar que a melhor eficiência do pH depende do tipo de material adsorvente e do tipo de adsorvato utilizado.

6.4 VARIAÇÃO DA TEMPERATURA

Para analisar a influência da variação da temperatura na remoção de azul de metileno foram realizados ensaios em cinco temperaturas diferentes: 30 °C, 34 °C, 45 °C, 56 °C, 60 °C, com a utilização de massa de 3 g de pó de serragem. Os resultados obtidos com a variação da temperatura estão apresentados na Tabela 12.

É possível observar na Tabela 12 que o melhor resultado de remoção de corante ocorreu para a temperatura de 45 °C, com eficiência de remoção de corante de 88,56% para o tempo de 5 minutos. Os resultados obtidos foram muito satisfatórios, uma vez que foi obtido, na maioria dos ensaios, percentual de remoção de azul de metileno acima de 80% para os ensaios com variação de temperatura. Isto representa que para os valores de temperatura da solução analisados de 30 °C, 34 °C, 45 °C, 56 °C, 60 °C o pó de serragem tem alta capacidade de adsorção.

Ikeno (2013) realizou ensaio de adsorção em 30 °C, 40 °C e 50 °C e obteve média de remoções de 60%, 72,1% e 74,8%, respectivamente. Portanto, o autor obteve melhores resultados para os ensaios com maior temperatura.

Bulut *et al.* (2006) em seus ensaios de adsorção de azul de metileno em casca de trigo a temperaturas de 30 °C, 40 °C e 50 °C obtiveram os resultados de quantidade de adsorção de corante de 16,56 mg/g, 20,83 mg/g e 21,50 mg/g, respectivamente. Ou seja, para o aumento da temperatura houve melhores

resultados de remoção de adsorbato.

Elmoubarki *et al.* (2015) prepararam ensaios de adsorção com a utilização de argila natural para remoção dos corantes azul de metileno, verde malaquita e laranja de metilo nas temperaturas de 10 °C, 20 °C, 30° C, 40° C e 50 °C. Para o corante azul de metileno atingiram uma quantidade adsorvida de 72,7 mg/g, 66,6 mg/g, 61,6 mg/g, 58,1 mg/g e 56,8 mg/g para as respectivas temperaturas citadas. Os autores notaram que com a utilização deste corante houve uma redução da quantidade de corante adsorvida com o aumento da temperatura e o inverso ocorreu com a utilização do corante verde malaquita, ou seja, houve aumento da quantidade adsorvida com o aumento da temperatura. Outro aspecto observado foi que para o azul de metileno, a influência da temperatura no processo de adsorção é menor quando comparado com os demais corantes.

6.5 ANÁLISE DO TEMPO

Na Figura 5 é apresentado o gráfico das médias de eficiência de remoção dos nove ensaios em função do tempo.

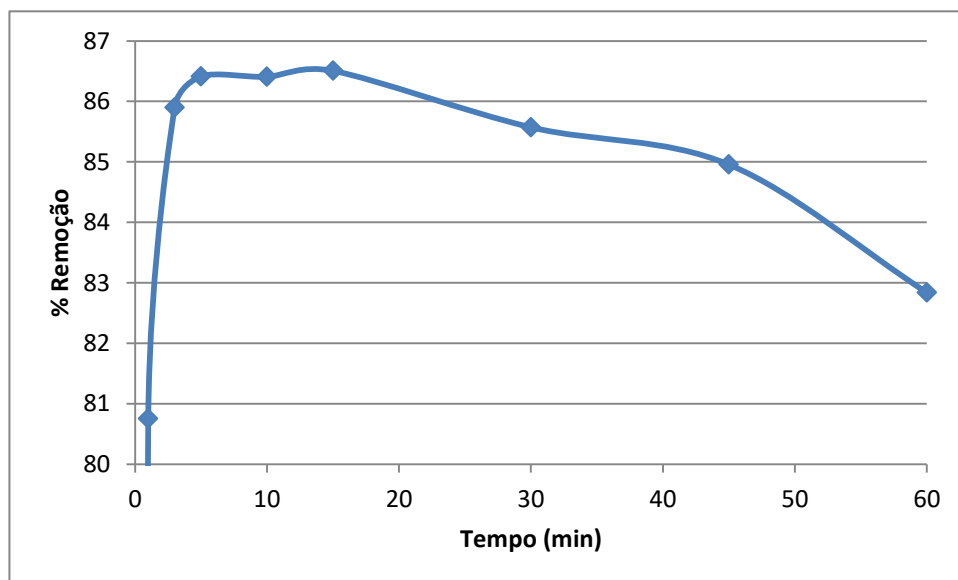


Figura 5 - Remoção de corante em função do tempo

Pode-se notar pela Figura 6 que a eficiência de remoção é crescente até o tempo de 15 minutos, em que ocorre o melhor tempo para o processo de adsorção, com uma média de remoção de 86,51% e, a partir deste instante os valores decrescem. Este fato ocorre em função do processo de dessorção.

De acordo com Almeida (2005), a dessorção é o processo inverso da adsorção em que sob certas condições como, por exemplo, com aumento de temperatura ou variação de pH, é possível obter corante e adsorvente separados. Outros fatores que influenciam esse processo é o tipo do sistema entre adsorvato e adsorvente e, em casos que há mais de um corante, a afinidade e maior seletividade de um adsorvente por um dos corantes.

O excelente resultado obtido no processo de adsorção pode ser observado na Figura 6, uma vez que mesmo em tempos curtos de realização de ensaio, como de 1 a 10 minutos, obteve-se uma média percentual de remoção de corante de aproximadamente 85%.

De acordo com Tavares *et al.* (2015) o menor tempo para se atingir o equilíbrio pode ser justificado em função do processo de adsorção ocorrer com maior facilidade para concentrações menores, uma vez que, no caso em que se utiliza concentrações maiores, a transferência de massa ocorre de forma mais lenta devido ao maior número de moléculas corante que está presente na solução.

Bulut *et al.* (2006) observaram que a adsorção do corante é rápida para os primeiros 25 minutos e em seguida procede a um ritmo mais lento e finalmente atinge a saturação. Os autores observaram que a temperatura não tem efeito no tempo de equilíbrio.

Ikeno (2013) verificou a ocorrência do processo de dessorção em todos os ensaios à temperatura de 50 °C e que houve comportamento constante da concentração do corante após 90 minutos.

Passig *et al.* (2014) utilizaram pó de serragem para adsorção do corante verde malaquita e também observaram o processo de dessorção a partir do tempo de 90 minutos.

6.6 CINÉTICA DE ADSORÇÃO

Na Tabela 13 estão apresentados os resultados obtidos para os parâmetros de pseudo-primeira ordem (k1), pseudo-segunda ordem (k2) e os coeficientes de correlação (R²) do modelo de Lagergren.

Tabela 13 - Parâmetros de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem

Ensaio	Temp (°C)	pH	Pseudo-primeira ordem		Pseudo-segunda ordem	
			k1 (1/min)	R ²	k2 (mg/g.min)	R ²
1	34	4	0,9297	0,9935	0,1105	0,9998
2	56	4	0,7124	0,7124	0,1552	0,9998
3	34	10	0,7271	0,8632	0,1026	0,9999
4	56	10	0,6399	0,8166	0,1775	0,9999
5	30	7	0,8546	0,9953	0,2610	0,9996
6	60	7	0,4532	0,6419	0,0621	0,9995
7	45	3	0,1864	0,7060	1,9380	0,9957
8	45	11	0,5705	0,8289	0,0452	0,9999
9	45	7	0,6800	0,8785	0,2121	0,9996

A partir da Tabela 13 pode-se observar que para todos os ensaios realizados os dados experimentais se ajustaram melhor ao modelo de pseudo-segunda ordem, visto que os valores dos coeficientes de correlação foram mais próximos de 1,0. O modelo pseudo-segunda ordem descreve uma adsorção química na qual envolve forças de valência através da partilha ou troca de elétrons entre o adsorvente e o adsorvato. Esta característica também foi verificada por Akrouit *et al.*

(2015), uma vez que notaram melhor valor de coeficiente de correlação (0,992) para este modelo quando comparado com o modelo de pseudo-primeira ordem.

No trabalho de Ikeno (2013) os dados experimentais também se ajustaram melhor ao modelo de pseudo-segunda ordem, sendo para o ensaio realizado a temperatura de 50 °C obtido valor de k_2 de 0,0211 (g/mg.min) e coeficiente de correlação R^2 de 0,999 e, para o modelo de pseudo primeira ordem k_1 de 0,0348 (1/min) e coeficiente de correlação R^2 de 0,827.

Elmoubarki *et al.* (2015) obtiveram para o ajuste de pseudo-primeira ordem valor de k_1 de 0,7 (1/min), com um coeficiente de correlação R^2 de 0,998 e, para o modelo de pseudo-segunda ordem um valor de k_2 de 0,130 (g/mg.min) e um coeficiente de correlação de R^2 0,998.

6.7 ESTATÍSTICA

Na Tabela 14 são apresentados o delineamento experimental e as variáveis respostas quanto à eficiência de remoção de corante para os ensaios no tempo de 15 minutos, uma vez que esse foi o tempo em que foram obtidos os melhores resultados.

Tabela 14 - Delineamento experimental e variáveis respostas

Ensaio	Temperatura (°C)	pH	% de remoção
1	34	4	86,40
2	56	4	88,21
3	34	10	86,54
4	56	10	84,29
5	30	7	86,55
6	60	7	85,14
7	45	3	86,50
8	45	11	88,04
9	45	7	86,88

Os efeitos estimados para remoção de azul de metileno são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Efeitos estimados para remoção de azul de metileno

Variáveis (%)	Parâmetros	Efeitos	Erro padrão 1	T	p-valor	Erro padrão 2
	Média/Intercepto	86,88012	1,267115	68,56532	0,000007	1,267115
	Temp (°C) (L)	-0,60853	0,896053	-0,67912	0,545764	0,448027
Remoção de corante	Temp (°C) (Q)	-1,13416	1,486089	-0,76319	0,500879	0,743044
	pH (L)	-0,40067	0,896053	-0,44715	0,685078	0,448027
	pH (Q)	0,29127	1,486089	0,19600	0,857138	0,743044
	Temp x pH	-2,03000	1,267115	-1,60206	0,207463	0,633557

A temperatura e o pH quadráticos não exerceram efeitos significativos (Tabela 14) ao nível de 5% de confiança para remoção de azul de metileno, dado que os valores do p-valor foram superiores a 0,05.

Para interpretar o valor t de Student exposto na Tabela 15, foi consultada a Tabela de t de Student (padrão estatístico). Desta forma, tem-se que para 1 grau de liberdade e grau de significância de 0,025, os parâmetros com valores maiores que 25,542 e menores que -25,542 são significativos.

Na Figura 7 está exposto o gráfico de Pareto, no qual está ilustrada a significância dos fatores na remoção do corante ao nível de significância de 95%.

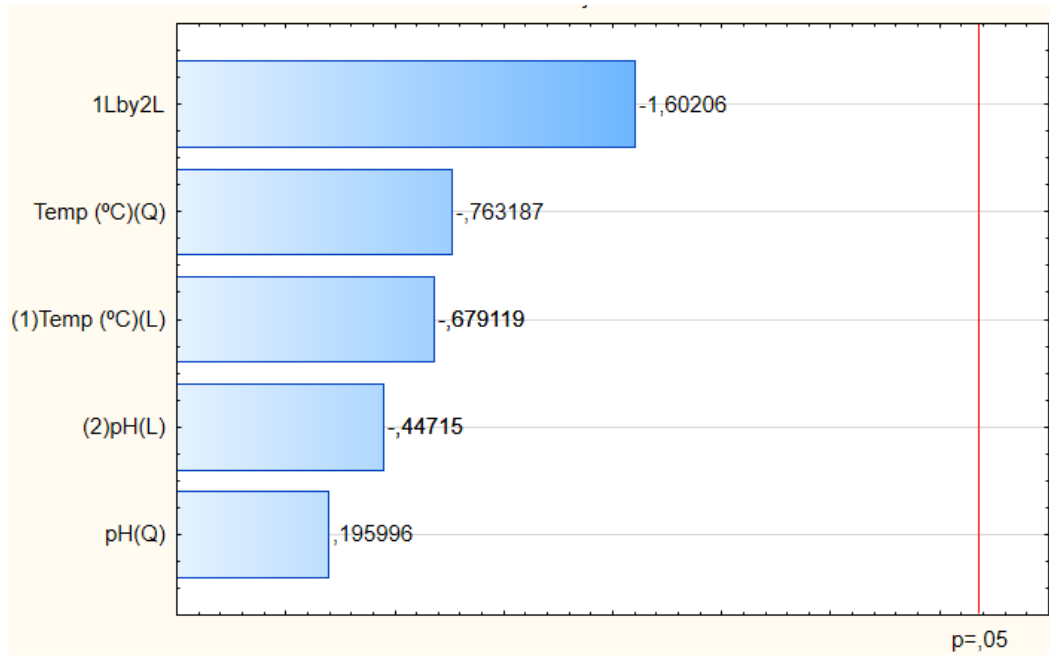


Figura 6 - Gráfico de Pareto

Na Figura 6, a linha em vermelho representa o p-valor e as barras horizontais em azul representam os fatores ao nível de significância de 5%. Como se pode observar, tem-se que nenhuma das colunas horizontais ultrapassou a linha em vermelho, o que representa que os fatores pH e temperatura não são significativos.

A probabilidade normal de resíduos em função das variáveis respostas está apresentada na Figura 7 e a distribuição dos resíduos em função dos números de ensaios está exposta na Figura 8.

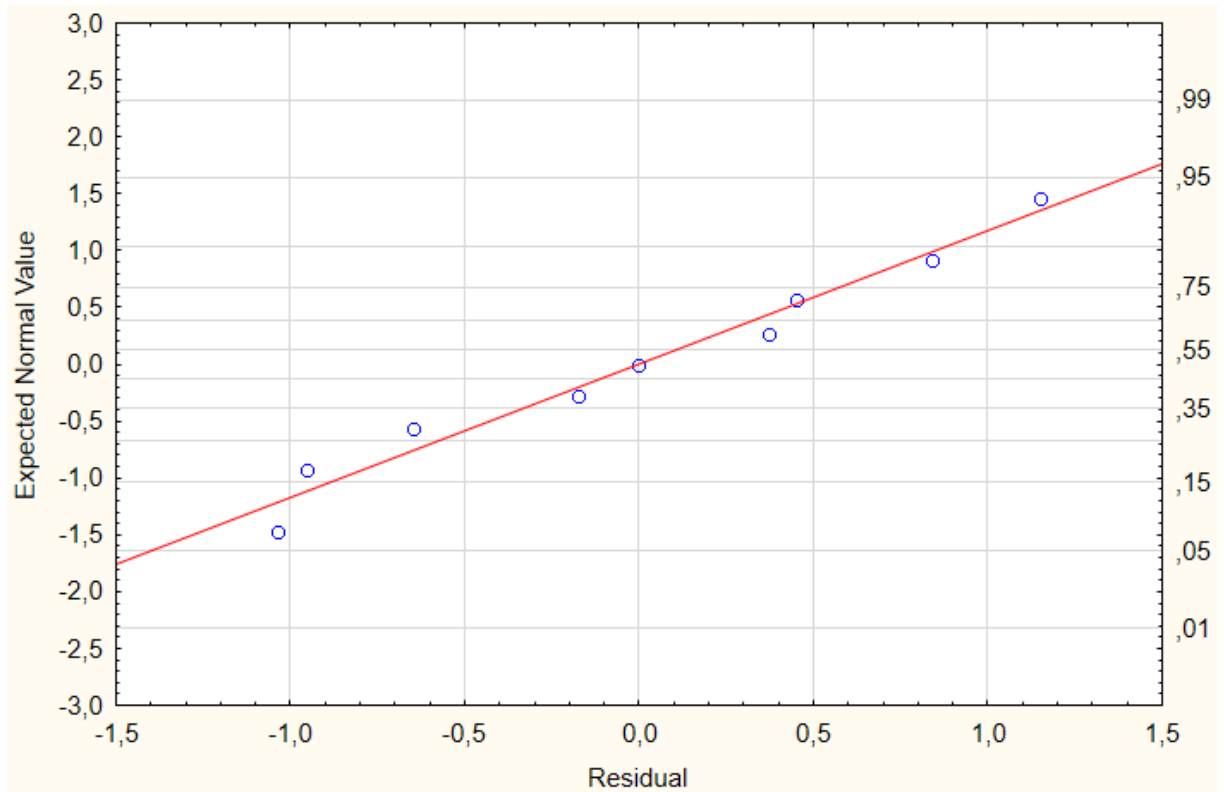


Figura 7 - Gráfico da probabilidade normal dos resíduos

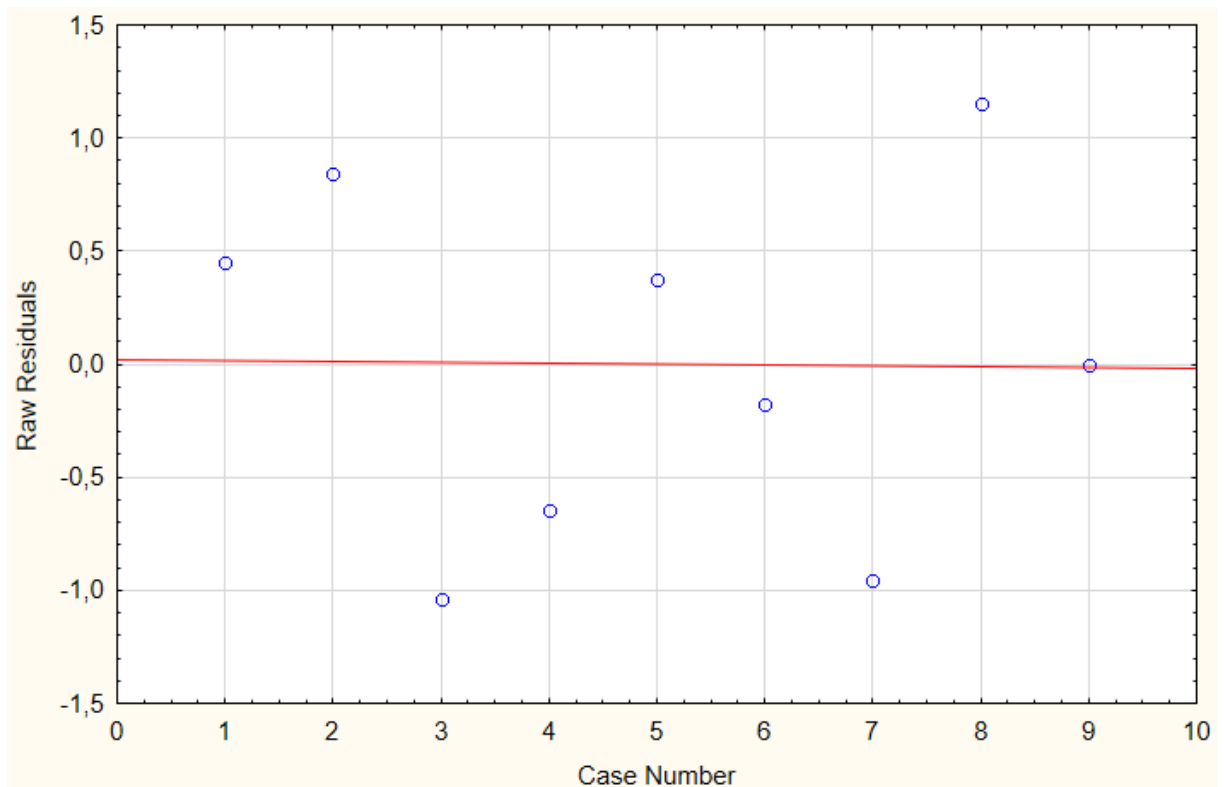
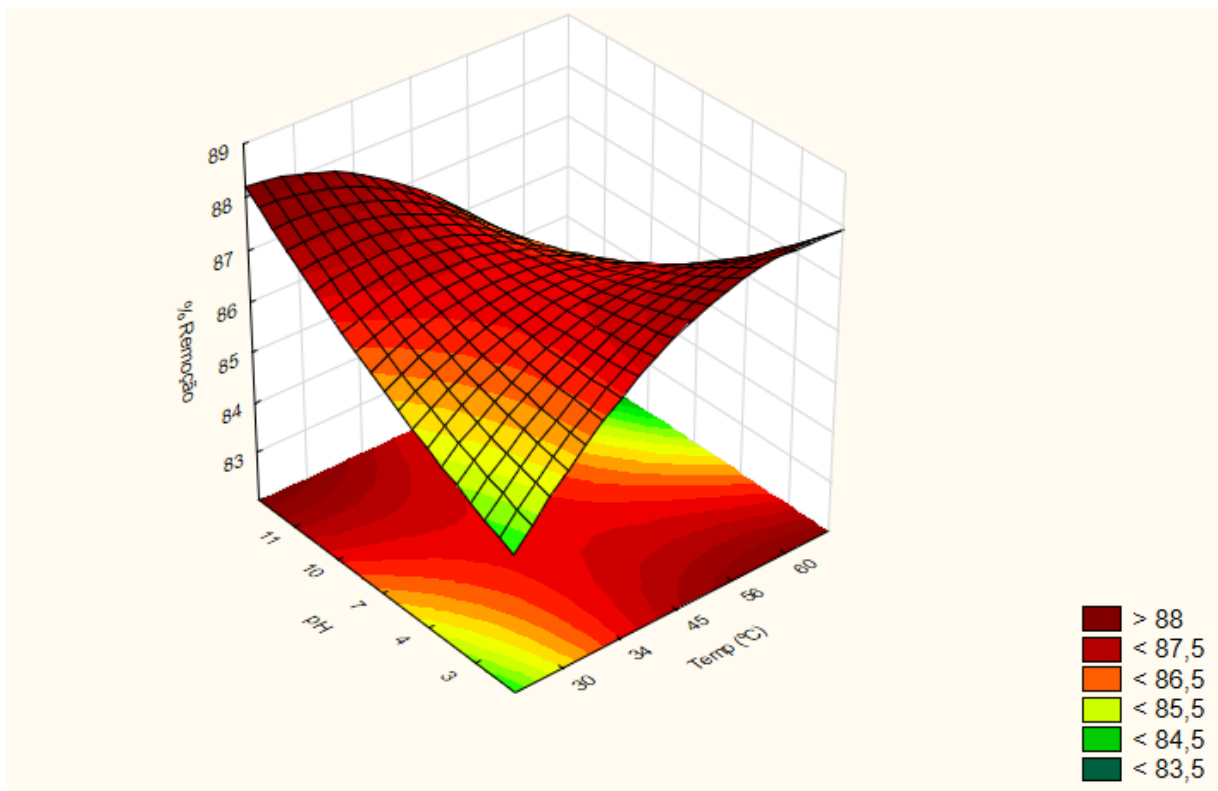


Figura 8 - Gráfico dos resíduos pelos números de ensaios

Na Figura 7, observa-se no gráfico da probabilidade normal dos resíduos que não há pontos afastados da reta para a variável de resposta analisada. Portanto, é atendida a hipótese do modelo estatístico.

No gráfico dos resíduos pelo número de ensaios (Figura 8) observam-se as distribuições aleatórias dos resíduos em função do número de ensaios para remoção de azul de metileno. Desta forma, tem-se que os erros foram distribuídos igualmente e que os erros foram independentes, o que significa que esta característica atende o exigido pelo modelo estatístico.

Na Figura 9 é apresentada a superfície de resposta (a) e a curva de nível para (b) remoção de azul de metileno.



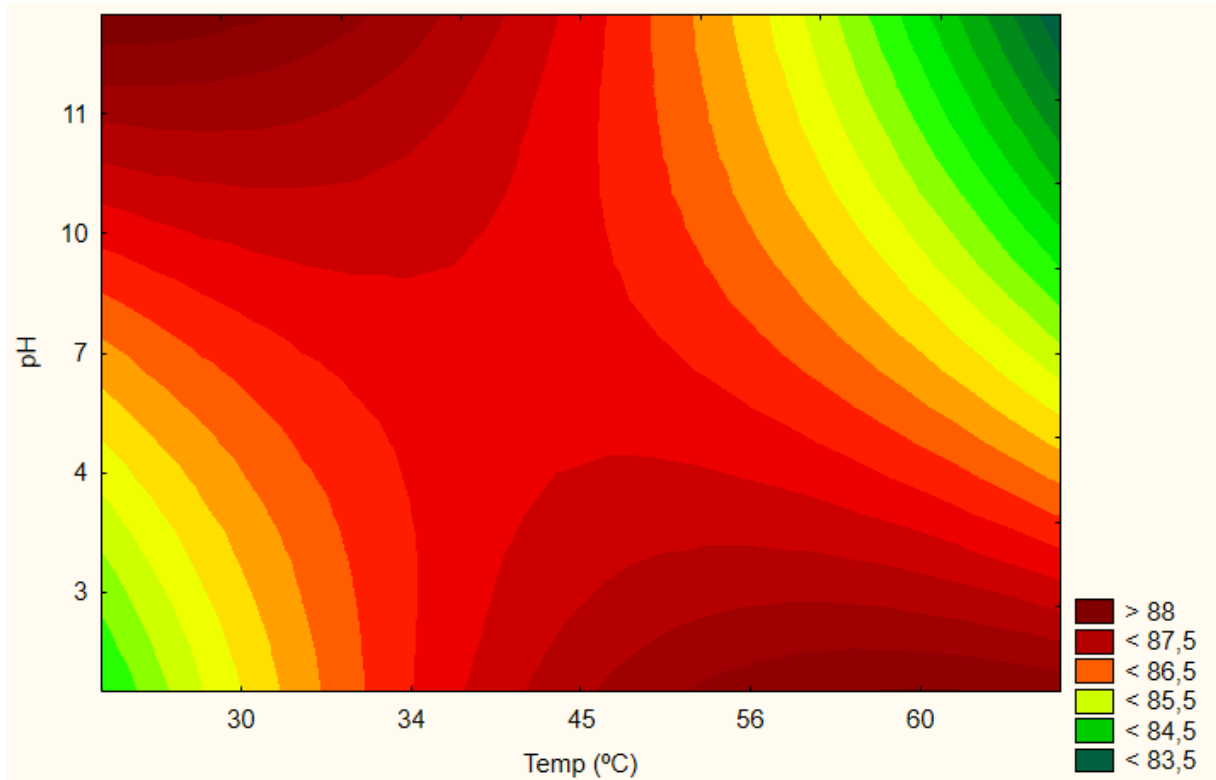


Figura 9 - Superfície de resposta (a) e curva de nível para remoção de corante (b)

Na Figura 9, as cores em vermelho indicam em quais circunstâncias se obtém maiores percentuais de remoção de corante. Pode-se observar que existe uma faixa de melhor desempenho para as combinações dos fatores temperatura e pH nas regiões em tons mais avermelhados

Desta forma, tem-se que para temperaturas menores e pH mais básico de solução tem melhores resultados. Assim como também é possível se obter resultados melhores para temperaturas mais elevadas e pH mais ácido.

7 CONCLUSÃO

Com base nos resultados dos ensaios, pode-se afirmar que o pó de serragem cambará rosa analisado é um material eficiente uma vez que se obtiveram excelentes resultados de remoção de azul de metileno para todos os tempos de ensaio realizados.

Além disto, a utilização do pó de serragem no processo de adsorção é viável em função da facilidade de acesso a obtê-lo, já que é um resíduo da indústria madeireira. Outra razão para sua escolha é em função da simplicidade e segurança em se realizar os experimentos.

A partir dos resultados obtidos da determinação das características físico-químicas, foi possível conhecer propriedades específicas do material adsorvente que auxiliam desta forma a compreender melhor o processo de adsorção. O pó de serragem utilizado tinha caráter ácido com pH de 5,59 (0,01).

O teor de umidade obtido foi de 24%. É um valor elevado quando comparado com os resultados obtidos em outros trabalhos realizados. Tem-se que quanto maior o teor de umidade menor será a capacidade de adsorção, uma vez que a água preenche os poros, os quais poderiam fornecer maior área de contato e, portanto, maior adsorção.

Para todos os ensaios realizados, verificou-se o crescente aumento do processo adsorativo até certo instante e então, a ocorrência do início do processo de dessorção. Na maioria dos ensaios, observou-se que este instante foi de 15 minutos, sendo esse o momento em que houve melhores percentuais de remoção. Sendo o melhor resultado de remoção de corante de 88,56% obtido para o ensaio a temperatura de 45° C e pH 11.

Para todos os ensaios realizados os dados experimentais se ajustaram melhor ao modelo de pseudo-segunda ordem, visto que os valores dos coeficientes de correlação foram mais próximos de 1,0, o que caracteriza o processo como um adsorção química.

Com base na análise estatística no delineamento do composto central rotacional, o pH e a temperatura não exerceram valores significativos ao nível de confiança de 5% para remoção do azul de metileno, pois apresentaram p-valores acima de 0,05. Em relação ao gráfico de Pareto, pode-se observar a mesma

tendência com relação à significância dos fatores analisados.

Pelas curvas de superfície de resposta e a curva de nível verificou-se a existência de condições para otimização do processo, em que para temperaturas maiores e soluções com pH mais ácido e para situações em que se tem o oposto, tem-se melhores resultados de remoção.

É importante que se conheça as características do material adsorvente com o corante adsorvido com o intuito de mitigar impacto ambiental negativo. Desta forma, é possível que se faça destinação adequada como, por exemplo, encaminhá-lo para um aterro ou realizar tratamento químico, mecânico ou térmico.

Como sugestões para trabalhos futuros, são indicados:

- analisar a aplicação dos estudos laboratoriais em escala real em efluentes industriais têxteis;
- analisar a capacidade de adsorção de outros corantes pelo pó de serragem;
- avaliar a eficiência de remoção e redução de outros fatores tais como metais, DQO e DBO pelo processo de adsorção com a utilização de pó de serragem;
- avaliar a variação de concentração de corante e variação de massa de material adsorvente para realizar o planejamento experimental e estudo estatístico;
- estudar as formas de tratamento e destinação final para o pó de serragem com corante adsorvido;
- realizar ensaios com adsorventes de granulometria mais fina e verificar se há aumento na eficiência de adsorção.

REFERÊNCIAS

ABIQUIM. Associação Brasileira de Indústria Química. **Atividades Setoriais: Corantes e pigmentos**. Disponível em: <http://abiquim.org.br/corantes/cor_aplicacoes.asp>. Acesso em 24 abr. 2016.

ABIT. Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção. **Indústria Têxtil e de Confecção Brasileira**, Brasília: junho. 2013. Disponível em: <http://www.abit.org.br/conteudo/links/publicacoes/cartilha_rtcc.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2016.

ABIT. Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção. **Estudo Prospectivo Setorial: Têxtil e Confecção**. In: Série Cadernos da Indústria ABDI. Vol XVIII, 2010, Brasília. **Anais eletrônicos** Brasília, 2010. Disponível em: <<http://www.abit.org.br/adm/Arquivo/Servico/114216.pdf>>. Acesso em: 23 abr. 2016.

AKROUT, Hane`ne; JELLALI, Salah; BOUSSELMI, Latifa. Enhancement of methylene blue removal by anodic oxidation using BDD electrode combined with adsorption onto sawdust. **Comptes Rendus Chimie** **18**. p. 110-120, 2015.

ALCÂNTARA, Maria Regina; DALTIM, D.; A Química do Processamento Têxtil. **Química Nova**. São Paulo, v. 19, n. 3, p 320-329. out. 1996.

ALMEIDA, Carlos Alberto Policiano. **Caracterização do lutito barro branco e avaliação de sua capacidade como adsorvente de corantes usando o azul de metileno como modelo**. 158f. Tese (Doutorado em Química), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

ALVES, F. C. **Estudo dos processos de adsorção utilizando argilas como adsorventes para remoção do corante verde de malaquita**. 2013. 104 f. Dissertação (Mestrado em Agroquímica), Universidade Federal de Lavras, Lavras, Brasil, 2013.

ANTUNES, Maria Lucia Pereira; CAMARGO, Stefan Rodrigues Guedes de; JESUS, Carolina Petrisin de; RUSSO, Ana Carolina. Estudo da utilização de Serragem de Madeira Como Adsorvente Para Tratamento de Efluentes Têxteis. Sorocaba. **Estudos Ambientais**. v. 12, n. 12 p 6-14, jul/dez. 2010.

ATIMTAY, Aysel T.; SIKDAR, Subhas K. **Security of Industrial Water Supply and Managemenet**. Ankara, Springer, 2010.

BELTRAME, Leocádia Terezinha Cordeiro. **Caracterização de Efluente Têxtil e proposta de Tratamento**. 161f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2000.

BEZERRA, Francisco Diniz. **Análise Retrospectiva e Prospectiva do Setor Têxtil no Brasil e no Nordeste. Informe Macroeconomia, Indústria e Serviços**. Fortaleza, Ano VIII, n. 2, 2014.

BLOSFELD, Ana Maria; BARCELOS, Ivonete Oliveira; CHIARELLO, Luana; GIOVANELLA, Rafael. Remoção de cor de soluções de corantes reativos com cinza de casca de arroz. **Dynamis Revista Tecno-Científica**. Vol. 15, Nº2, p.1-6, 2009.

BRAILE, Pedro Marcio; CAVALCANTI, José Eduardo W. A. **Manual de tratamento de águas residuárias industriais**. 1º ed. São Paulo: CETESB, 1993.

BRASIL. Câmara dos Deputados. **Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento: Agenda 21**. Brasília, 1995.

BRASIL. Lei nº 9433, de 8 de Janeiro de 1997, Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. **Diário Oficial**, 1997.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 357**, de 17 de março de 2005. Conselho Nacional do Meio Ambiente: CONAMA, Brasília, DF, 17 mar 2005.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 430**, de 13 de maio de 2011. Conselho Nacional do Meio Ambiente: CONAMA, Brasília, DF, maio de 2011.

BULUT, YASEMIN; AYDIN, HALUK. A kinetics and thermodynamics study of methylene blue adsorption on wheat shells. **Desalination** **194**. p. 259–267, 2006.

CABRAL, V. F.; RIBEIRO, F. R. G.; ANDREAUS, J.; CARDOZO-FILHO, L.; CROSCATO, G. S.; SILVA, A. B.; MORAES, M. R. **Alternativa sustentável de tingimento têxtil com líquido iônico**. In: International workshop advances in cleaner production, 4., 2013, São Paulo. Academic Work. São Paulo: International Workshop Advances In Cleaner Production, 2013. p. 1 - 9.

CARREIRA, Francisco Manoel. **Sistema de Tratamento de Efluentes Têxteis: Análise comparativa entre as tecnologias usadas no Brasil e na Península**

Ibérica. 2006. 674f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

CRINI, Grégório. Non-conventional Low-cost Adsorbents for Dye Removal: A Review. Besançon. **Bioresource Technology**. v. 97, n. 9, p.1061-1085, jun. 2006.

DASH, Rajesh Roshan; VERMA, Akshaya Kumar; BHUNIA, Puspendu. A review on chemical coagulation/flocculation technologies for removal of colour from textile wastewaters. **Journal of Environmental Management**, v. 93, n. 1, p. 154-168, 2012.

DRINAN, E. J. **Water and Waste Water Treatment a Guide for the Non Engineering Professionals**. CRC Press: Boca Raton, Florida, 2000.

ELMOUBARKI R.; MAHJOURI F.Z.; TOUNSADI H.; MOUSTADRAF J. ; ABDENNOURI M.; ZOUHRI A.; ELALBANI A. ; BARKA N. Adsorption of textile dyes on raw and decanted Moroccan clays: Kinetics, equilibrium and thermodynamics. **Water Resources and Industry**. 9. p. 16–29, 2015.

FORGIARINI, Eliane. **Degradação de corantes e efluentes têxteis pela enzima horseradish peroxidase (HRP)**. 110f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

FREITAS, K. R. **Caracterização e reúso de efluentes do processo de beneficiamento da indústria têxtil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2002.

GANDOLFI, O.R.R; JUNQUEIRA, P. B.; FERREIRA, A. M.; VIANA, B. M.; M.; AMARAL, V. W.; WELLINGTON, A. J. F.; NUNES, G.S. **Avaliação da capacidade de remoção de corantes orgânicos em meio aquoso por carvão ativado obtido a partir do caroço do umbu**. IN: 55º Congresso Brasileiro de Química, Goiânia, 2015.

GARG, Vinod K.; AMITA, Moirangthem.; KUMAR, Rakesh.; GUPTA, Renuka. Basic Dye (Methylene Blue) Removal From Simulated Wastewater By Adsorption Using Indian Rosewood Sawdust: A Timber Industry. Hisar. **Dyes and pigments**, v. 63, n. 2004, p. 243-250, nov. 2004.

GUARATINI, Cláudia C. I.; ZANONI, Maria Valnice Boldrin. Corantes Têxteis, **Química Nova**, v. 23 n.1, p.71-78, 2000.

SILVA, Gilson. Lima. **Redução de Corante em Efluente de Processo de Tingimento de Lavanderias Industriais por Adsorção de Argilas**. 116f. Tese (Engenharia Química) Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2005.

GORINI, Ana Paula Fontenelle. **Panorama do Setor Têxtil no Brasil e no Mundo: Reestruturação e Perspectiva**. Rio de Janeiro. BNDES Setorial, n. 12, p 17-50, set. 2000.

GROSSMAN, Matthew James., FRANCISCON, Elisangela; PASCHOAL, Jonas Augusto Rizzato, REYES, Felix Guillermo Reyes, DURRANT, Lucia Regina. **Decolorization and biodegradation of reactive sulfonated azo dyes by a newly isolated Brevibacterium sp. strain VN-15**. SpringerPlus, v. 1, n. 37, p. 1-10, 2012.

HARDCASTLE. Mike; FUNG. Walter. **Textiles in automotive engineering**. 1ªed. Lancaster: Woodhead Publishing, 2001.

HAMDAOUI, Oualid. Batch study of liquid-phase adsorption of methylene blue using cedar sawdust and crushed brick. **Journal of Hazard. Materials**. B 135, 264-273, 2006.

IAP: **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Industriais do Estado Do Paraná**. Paraná, 2009. Disponível em: <
http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Monitoramento/RESIDUOS_INDUSTRIAIS_INVENTARIO_RELATORIO_FINAL_200809.pdf >. Acesso em: 18 mar. 2016.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Industrial Anual – Produto, 2005**. Disponível em: <
<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/protabl.asp?c=5807&i=P&nome=on¬arodape=on&tab=5807&unit=0&pov=1&poc718=1&OpcTipoNiv=1&opn1=2&niv=0&orp=4&opv=1&opc718=1&pop=1&orv=2&orc718=3&sev=215&sec718=34520&opp=1&ascendente=on&sep=55483&orn=1&pon=1&proc=1&qtu1=1&cabec=on&decm=99> >. Acesso em: 23 abr. 2016.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Industrial Anual – Produto, 2010**. Disponível em: <
<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/protabl.asp?c=5807&i=P&nome=on¬arodape=on&tab=5807&unit=0&pov=1&poc718=1&OpcTipoNiv=1&opn1=2&niv=0&orp=4&opv=1&opc718=1&pop=1&orv=2&orc718=3&sev=215&sec718=34520&opp=1&ascendente=on&sep=55488&orn=1&pon=1&proc=1&qtu1=1&cabec=on&decm=99> >. Acesso em: 23 abr. 2016.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Industrial Anual – Produto, 2013**. Disponível em: <

<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/protabl.asp?c=5806&i=P&nome=on¬arodape=on&tab=5806&unit=0&pov=1&poc718=1&OpcTipoNiv=1&opn1=2&nivt=0&orp=4&opv=1&opc718=1&pop=1&orv=2&orc718=3&sev=215&sec718=34520&opp=f1&ascendente=on&sep=55519&orn=1&pon=1&proc=1&qtu1=1&cabec=on&decm=99>>. Acesso em: 23 abr. 2016.

IEMI. Instituto de Estudos e Marketing Industrial. **Alento para o setor têxtil**, 2015. Disponível em < <http://www.iemi.com.br/alento-para-o-setor-textil/> >. Acesso em: 23 abr. 2016.

IKENO, Daniel S. **Remoção de azul de metileno de efluente têxtil sintético por adsorção usando pó de serragem do gênero *Pinus sp.*** 2013. 60f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2013.

IPT. Instituto de pesquisas Tecnológicas. **Informações sobre madeiras**, 2016. Disponível em < http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/9.htm >. Acesso em: 21 maio. 2016.

KAMMRADT, P. B. **Remoção de cor de efluentes de tinturarias industriais através de processo de oxidação avançada**. 82f. Dissertação (Mestrado em engenharia de recursos hídricos e ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

KARPINSKI, Luisete Andreis; PANDOLFO, Adalberto; REINEHR, Renata; KUREK, Juliana; PANDOLFO, Luciana; GUIMARÃES, Jalusa. **Gestão Diferenciada de Resíduos da Construção Civil: Uma Abordagem Ambiental**. Porto Alegre: Edipucrs; 2009.

LETTERMAN, Raymond. **Water quality and treatment: A handbook of community water supplies**. 1ºed. McGraw-Hill Inc, 1999.

MARKANDEYA; SINGH A.; SHUKLA S.P.; MOHAN D.; SINGH N.B.; BHARGAVA D.S.; SHUKLA R.; PANDEY G.; YADAV V.P.; KISKU G.C. Adsorptive capacity of sawdust for the adsorption of MB dye and designing of two-stage batch adsorber. **Cogent Environmental Science**. p. 1-16, 2015.

MENEGARO, Diana Aurélio; MIGUEL, Thainá Fortunato; BETIOLI, Andrea Murilo; DOMINGUINI, Lucas. Cinética de adsorção de azul de metileno por resíduos de cerâmica vermelha. **Revista Técnico Científica (IFSC)**, Vol 3, Nº 1, 2012.

MONTANHER, Silvana Fernandes; Poggere, Paula Andreia; DAVIS Rafael; LOBO, Viviane Silva. **Azul de metileno: propriedades e tratamentos**. Encontro de divulgação científica e tecnológica. UTFPR, Toledo, 2011.

MONTEIRO, Monica Silva. **Mesocarpo de coco verde (*Cocos nucífera*) e pó de serragem da Tatajuba (*Bagassa Guianensis Aubl*) como adsorventes em meio aquoso**. 66f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2010.

MORAN, Claire. Reducing the toxicity of textile effluent. **Journal of the Society of Dyers and Colourists**, MPG Information Division, 114(April), 117-118, 1998.

PAGAN, Érika Viana. **Reúso da água industrial: estudos de casos em indústrias têxteis**. Fortaleza, 2011.

PASSIG, Fernando Hermes; Kreutz Cristiane; Carvalho, Karina Querne; Lunardi Martins Layane; Silva, Lívia Fernanda. **Utilização do pó de serragem como adsorvente alternativo na remoção de verde de malaquita**. IN: XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Florianópolis, 2014.

PHILIPPI JR, Arlindo. **Saneamento, Saúde e Ambiente: Fundamentos para um desenvolvimento sustentável**. Barueri, SP: Manole, 2005.

RATNAMALA, G. M.; DESHANNAVAR, U. B.; MUNYAL, S.; TASHILDAR, K.; PATIL, S.; SHINDE, A. Adsorption of Reactive Blue Dye from Aqueous Solutions Using Sawdust as Adsorbent: Optimization, Kinetic, and Equilibrium Studies. **Chemical engineering**. p. 333-344, 2016.

ROBINSON, T.; MULLAN, G.; MARCHANT, R.; NIGAM, P. Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. **Bioresource Technology**, v. 77, n. 3, p. 247-255, 2001.

SAGGIORO, Enrico Mendes; MACHADO, Carla Rênes de Alencar; CAMPOS, Juacyara Carbonelli; PEREIRA, Luiza Penna dos Santos; SILVA, Yuri Gomes Leite. Avaliação da adsorção de Fenol e Bisfenol A em carvões ativados comerciais de diferentes matrizes carbonáceas. **Revista Ambiente e Água**, Vol 10, Nº 4, p. 915-927, 2015.

SANTOS, Andressa dos. **Argilas montmorilonitas naturais e modificadas com surfactante aplicadas na adsorção do azul de metileno e p-nitrofenol em**

solução aquosa. 96f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, 2010.

SANTOS, André Bezerra dos; CERVANTES, Francisco Javier.; LIER, Jules Bernardus Van. **Impacto dos Medidores Redox na Remoção de cor de Corantes Azo e Antraquinônico por Lodo Granular Anaeróbico Sob Condições Mesofílicas e Termofílicas.** In. Encontro Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 23., 2005, Campo Grande. **Anais eletrônicos** Fortaleza – Universidade Federal do Ceará. Disponível em: < <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/abes23/II-082.pdf> >. Acesso em: 16 mar. 2016.

SCHMAL, M. **Cinética e reatores: aplicação na engenharia química.** Engenho de Dentro: Synergia, 2010. 572 p.

SILVA, Airton Marques da; LIMA, Nathália Ribeiro de; **Avaliação do reúso de efluentes de uma indústria têxtil de Fortaleza-CE.** In: 48º Congresso Brasileiro de Química, Rio de Janeiro, 2008.

SILVA, Lícia Aparecida. **Avaliação do uso de serragem de madeira tratada com ácido como bioadsorvente para a remoção de Diclofenaco de Sódio em meio aquoso.** 2015. 93 f. Dissertação (Mestrado em Química), Universidade Federal do Goiás, Catalão, 2015

SILVA, Maria Cristina. **Degradação de corantes e remediação de efluentes têxteis por extrato bruto de peroxidase de nabo.** 2011. 135f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

SINTEX. Sindicato das indústrias de fiação, tecelagem e do vestuário de Blumenau. **Sintex apresenta dados do setor têxtil e perspectivas para 2015.** Blumenau, jun. 2015. Disponível em < <http://www.sintex.org.br/noticia/2015/06/23/sintex-apresenta-dados-do-setor-textil-e-perspectivas-para-2015> > Acesso em: 23 abr. 2016.

TAVARES, Fernanda Peres; JORGE, Isabela Ribeiro; SANTOS, Kássia Graciele. **Remoção do corante azul de metileno no tratamento de efluentes por adsorção em bagaço de cana de açúcar.** IN: XXXVII ENEMP Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, São Carlos, 2015.

TREVIZANI, Jéssica Luiza Bueno. **Descoloração e degradação do azo corante vermelho br por ozonização.** 2015. 123f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná , Curitiba, 2015.

TWARDOKUS, Rolf. Guenter. **Reúso de água no processo de tingimento da indústria têxtil**. 136 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

VALCARENGHI, Gustavo; RIBEIRO, Luiz Felipe Prata. **Adsorção de azul de metileno de solução aquosa com utilização de pó de serragem de MDF e maderite e carvão ativado granular**. 2013. 48f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 1995. 126p. (Princípio do tratamento biológico de águas residuárias, v. 3).

WORCH, E. **Adsorption Technology in Water Treatment: Fundamentals, Processes, and Modeling**. De Gruyter, 2012.

ZAMORA, Patricio Peralta.; KUNZ, Airton; MORAES, Sandra Gomes.; DURÁN, Nelson. Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. **Química Nova**, Vol. 25, N°1, p. 78-82, 2002.