

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

LEANDRO VICENTE GONÇALVES

**TRATAMENTO ELETROQUÍMICO E FÍSICO-QUÍMICO PARA
EFLUENTE DE LAVANDERIA INDUSTRIAL TÊXTIL**

DISSERTAÇÃO

Londrina
2015

LEANDRO VICENTE GONÇALVES

**TRATAMENTO ELETROQUÍMICO E FÍSICO-QUÍMICO PARA
EFLUENTE DE LAVANDERIA INDUSTRIAL TÊXTIL**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de Concentração: Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Nagamine Costanzi
Coorientador: Prof. Dr. Alexei Lorenzetti Novaes
Pinheiro

Londrina
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca UTFPR - Câmpus Londrina

G634t Gonçalves, Leandro Vicente

Tratamento eletroquímico e físico-químico para efluente de lavanderia industrial têxtil/ Leandro Vicente Gonçalves. – Londrina: [s.n.], 2015.

153 f.: il.; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Nagamine Costanzi

Co-Orientador: Prof. Dr. Alexei Lorenzetti Novaes Pinheiro

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Londrina, 2015.

Bibliografia: f. 143-153.

1. Lavanderias e Tinturarias. 2. Resíduos Industriais. 3. Águas Residuais - Tratamento. I. Costanzi, Ricardo Nagamine, orient. II. Pinheiro, Alexei Lorenzetti Novaes, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. IV. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. V. Título.

CDD: 628



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
 Pró-reitora de Pesquisa e Pós Graduação
 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental
 Campus Apucarana/Londrina



TERMO DE APROVAÇÃO

TRATAMENTO ELETROQUÍMICO E FÍSICO-QUÍMICO PARA EFLUENTE DE LAVANDERIA INDUSTRIAL TÊXTIL

por

Leandro Vicente Gonçalves

Dissertação de mestrado apresentada no dia 26 de março de 2015 como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Campus Apucarana/Londrina, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O Candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho _____.
 (Aprovado ou Reprovado)

 Orientador: Prof. Dr. Ricardo Nagamine Costanzi

(UTFPR)

 Coorientador: Prof. Dr. Alexei Lorenzetti Novaes

Pinheiro

(UTFPR)

 Prof. Dr. Ajadir Fazolo - Membro Titular

(UTFPR)

 Prof. Dr. Benedito Martins Gomes - Membro

Titular

(UNIOESTE)

 Prof. Dr. Edson Fontes de Oliveira

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental

A Folha Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental.

AGRADECIMENTOS

Alegro-me em deixar aqui registradas as minhas sinceras manifestações de gratidão e reconhecimento aos que comigo colaboraram nesta jornada, principalmente:

Primeiramente a Deus, por ter me dado força, sabedoria, discernimento e inteligência para enfrentar as dificuldades.

Ao meu orientador e amigo Professor Dr. Ricardo Nagamine Costanzi pela orientação, paciência, confiança, companheirismo, incentivo, compreensão, e, sobretudo, integral apoio ao longo do caminho.

Ao meu coorientador e amigo Professor Dr. Alexei Lorenzetti Novaes Pinheiro pela orientação, paciência, confiança, companheirismo, por me aceitar em seu laboratório e pelo empréstimo de seus equipamentos de eletroquímica para a realização dos ensaios práticos.

Ao professor Dr. Ajadir Fazolo pela orientação e empréstimo de seus equipamentos.

A toda a minha família especialmente a minha esposa Lilian Aline Sala pela compreensão, amizade, incentivo, e ajuda.

A todos os professores do Departamento do Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela amizade e ajuda.

As novas amizades feitas durante o curso de mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela concessão de bolsa institucional.

A empresa Made In Japa Lavanderia Industrial pela disponibilização de efluentes e produtos químicos.

Ao Sr. Carlos Rodolfo Wolf da empresa TANAC S.A. pela doação de produto químico.

RESUMO

GONÇALVES, Leandro Vicente. Tratamento Eletroquímico e Físico-Químico para Efluente de Lavanderia Industrial Têxtil. 2015. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2015.

A lavanderia industrial têxtil é caracterizada pela variedade dos processos aplicados, pelo alto volume de efluentes gerados e pela carga poluidora. A caracterização física e química destes efluentes é de suma importância para determinação do tratamento apropriado, bem como para avaliação dos agentes poluentes e seus impactos potenciais. Desta forma, o desenvolvimento do presente estudo permite o aperfeiçoamento do conhecimento acerca dos processos eletroquímicos e físico-químico para a remoção de cor e carga orgânica em efluentes de lavanderia industrial têxtil. Os experimentos foram realizados em quatro processos: - 1: ensaios de eletrocoagulação / eletrofloculação / eletroflotação utilizando reator em escala de laboratório tipo tanque agitado, com o emprego de eletrodos de alumínio e carbono. - 2: ensaios físico-químicos utilizando o processo de flotação por ar dissolvido (FAD) em unidade de escala de bancada (flotatest) com o uso de tanino "Tanfloc SG". - 3: ensaios FAD com o uso de policloreto de alumínio (PAC) e polímero aniônico. - 4: ensaios FAD com o uso de sementes de Moringa *Oleífera*. A metodologia utilizada para os ensaios de todos os processos foram o planejamento experimental do delineamento composto central rotacional DCCR com dois parâmetros avaliados para cada processo: - 1: corrente elétrica, e tempo de eletrocoagulação; - 2: dosagem de coagulante tanino e pH da solução; - 3: dosagem de coagulantes PAC e polímero aniônico; - 4: dosagem de coagulante moringa e pH da solução. Após o término dos ensaios, amostras do efluente tratado foram analisadas para determinação da eficiência de remoção das variáveis cor aparente, turbidez, demanda química de oxigênio (DQO) e sólidos suspensos totais (SST). No processo 1, o eletroquímico foi obtido uma eficiência ótima para a remoção de cor aparente, turbidez, DQO e SST de 86%; 58,93%; 75,2% e 66,3%, respectivamente. Para os ensaios FAD, a eficiência máxima para a remoção de cor aparente, turbidez, DQO e SST foi de 90%; 96,90%; 61,4% e 94,1%, respectivamente, para o processo 2, de 93%; 93,65%; 71,8% e 88,8%, respectivamente, para o processo 3, e de 65%; 80,00%; 40,2% e 62,3%, respectivamente, para o processo 4. Os resultados obtidos indicaram que apenas o experimento utilizando o processo FAD com o coagulante moringa *oleífera* não foi uma opção viável por ultrapassar o padrão de qualidade da variável cor aparente exigido pela a resolução CONAMA 357. Os demais processos e coagulantes estudados neste trabalho podem ser utilizados como alternativas tecnicamente viáveis para a remoção de cor aparente, turbidez, DQO e SST de efluentes de lavanderia têxtil.

Palavras-chave: Lavanderia Industrial Têxtil, Processos Eletroquímicos, Tanino, Polímero Aniônico, Moringa *Oleífera*.

ABSTRACT

GONÇALVES, Leandro Vicente. Treatment Electrochemical and Physical-Chemistry Textile Industrial Laundry Wastewater. 2015. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2015.

The textile industrial laundry is characterized by the variety of existing processes, the large volume of wastewater and high polluting load. Physical and chemical characterization of these effluents is important to determine the appropriate treatment and to assess pollutants and their potential impacts. Thus, the development of this study allows contribute to the knowledge of the electrochemical processes and physical chemistry in order to remove the color and organic load in textile industrial laundry wastewater. The experiments were performed in four processes: - 1: electrocoagulation / electroflocculation / electrocoagulation tests using reactor at laboratory scale stirred tank with the use of aluminum and carbon electrodes. - 2: physico-chemical tests using process by dissolved air flotation (DAF) with a bench scale unit (flotatest) using tannin "Tanfloc SG". - 3: tests DAF using polyaluminum chloride (PAC) and anionic polymer. - 4: tests DAF using seeds of *Moringa oleífera*. The methodology used for the testing of all processes was the experimental design central composite rotational design (RCCD) with two parameters assessed for each process: - 1: electric current and electrocoagulation time; - 2: tannin dosage as coagulant and pH solution; - 3: PAC dosage as coagulant and anionic polymer; - 4: moringa dosage as coagulant and pH solution. At the end of the tests, samples of treated wastewater were analyzed to determine the removal efficiency of apparent color, turbidity, chemical oxygen demand (COD) and total suspended solids (TSS). In the process 1, optimal efficiency the electrochemical of process for the removal of apparent color, turbidity, COD and TSS 86%; 58.93%; 75.2% and 66.3%, respectively. For the DAF tests, the maximum efficiency for the removal of apparent color, turbidity, COD and TSS for process 2 was 90%; 96.90%; 61.4% and 94.1%, respectively, for process 3 was 93%; 93.65%; 71.8% and 88.8%, respectively; and for process 4 was 65%; 80.00%; 40.2% and 62.3%, respectively. The results indicated that only the experiment using the DAF process with the moringa *oleífera* coagulant was not a viable option, because it exceeds the quality standard of the apparent color required by the resolution CONAMA 357. The processes and coagulants studied in this work can be used as technically feasible alternatives to removal apparent color, turbidity, COD and TSS of textile industrial laundry wastewater.

Keywords: Textile Industrial Laundry, Electrochemical Processes, Tannin, Anionic Polymer, *Moringa Oleífera*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma dos ensaios realizados	23
Figura 2 – Equipamentos utilizados no tratamento eletroquímico: (a) Célula eletrolítica sobre o agitador magnético, multímetro; (b) Detalhe da célula eletrolítica; (c) Monitor, fonte D.C., CPU com placa de aquisição dos dados; (d) Gerador de rampa, potenciostato / galvanostato ..	26
Figura 3 - Procedimentos dos ensaios de eletrocoagulação/eletrofloculação/eletroflotação no processo 1	29
Figura 4 – Equipamentos utilizados no tratamento FAD: (a) Jar Test e câmara de saturação; (b) Detalhe da câmara de saturação; (c) Detalhe dos jarros e display de programação.....	30
Figura 5 - Procedimentos dos ensaios com flotatestes no processo 2.....	34
Figura 6 - Procedimentos dos ensaios com flotatestes no processo 3.....	36
Figura 7 - Procedimentos dos ensaios com flotatestes no processo 4.....	39
Figura 8 - Representação do potencial zeta e da dupla camada elétrica de uma partícula coloidal presente em águas industriais	49
Figura 9 - Interações dentro de um reator de eletrocoagulação / eletrofloculação / eletroflotação.....	52
Figura 10 - Hidrólise do alumínio em função do pH.....	58
Figura 11 – Ensaio Eletroquímico em função da corrente elétrica e tempo de coagulação: Curvas de contorno (a) e Superfície de resposta (b) para a resposta cor; Curvas de contorno (c) e Superfície de resposta (d) para a resposta turbidez; Curvas de contorno (e) e Superfície de resposta (f) para a resposta DQO; Curvas de contorno (g) e Superfície de resposta (h) para a resposta SST	85
Figura 12 – Ensaio FAD em função de concentração de tanino e pH: Curvas de contorno (a) e Superfície de resposta (b) para a resposta cor; Curvas de contorno (c) e Superfície de resposta (d) para a resposta turbidez; Curvas de contorno (e) e Superfície de resposta (f) para a resposta DQO; Curvas de contorno (g) e Superfície de resposta (h) para a resposta SST	101
Figura 13 – Ensaio FAD em função de concentração de PAC e Polímero: Curva de contorno (a) e Superfície de resposta (b) para a resposta cor; Curvas de contorno (c) e Superfície de resposta (d) para a resposta turbidez; Curvas de contorno (e) e Superfície de resposta (f) para a resposta DQO; Curvas de contorno (g) e Superfície de resposta (h) para a resposta SST	116
Figura 14 – Ensaio FAD em função de concentração de Moringa e pH: Curvas de contorno (a) e Superfície de resposta (b) para a resposta cor; Curvas de contorno (c) e Superfície de resposta (d) para a resposta turbidez; Curvas de contorno (e) e Superfície de resposta (f) para a resposta DQO; Curvas de contorno (g) e Superfície de resposta (h) para a resposta SST	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condutividade do efluente têxtil	55
Tabela 2 - Distância entre os eletrodos	56
Tabela 3 - Velocidades de ascensão para diversos tamanhos de bolhas	63
Tabela 4 - Hidróxido de alumínio e fórmulas químicas específicas	66
Tabela 5 - Eficiência de remoção de cor e turbidez de diferentes coagulantes	70
Tabela 6 - Parâmetros de qualidade do efluente bruto	73
Tabela 7 – Delineamento experimental com valores codificados e respostas quanto a eficiência da remoção do processo eletroquímico	73
Tabela 8 - Resultados da eficiência de remoção	74
Tabela 9 - ANOVA para a resposta cor reparametrizado	75
Tabela 10 - Coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta cor	76
Tabela 11 - Valores de remoção de cor experimentais, previstas pelo modelo e desvios para o DCCR	76
Tabela 12 - ANOVA para a resposta turbidez reparametrizado	77
Tabela 13 - Coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta turbidez	78
Tabela 14 - Valores de remoção de turbidez experimentais, previstas pelo modelo e desvios para o DCCR	78
Tabela 15 - ANOVA para a resposta DQO reparametrizado	79
Tabela 16 - Coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta DQO	80
Tabela 17 - Valores de remoção de DQO experimentais, previstas pelo modelo e desvios para o DCCR	80
Tabela 18 - ANOVA para a resposta SST reparametrizado	81
Tabela 19 - Coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta SST	82
Tabela 20 - Valores de remoção de SST experimentais, previstas pelo modelo e desvios para o DCCR	82
Tabela 21 - Parâmetros de qualidade do efluente bruto	89
Tabela 22 - Delineamento experimental com valores codificados e respostas quanto a eficiência da remoção do processo FAD utilizando Tanino	89
Tabela 23 - Resultados da eficiência de remoção	90
Tabela 24 - ANOVA para a resposta cor reparametrizado	91
Tabela 25 - Coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta cor	92
Tabela 26 - Valores de remoção de cor experimentais, previstas pelo modelo e desvios para o DCCR	93
Tabela 27 - ANOVA para a resposta turbidez reparametrizado	93
Tabela 28 - Coeficientes de regressão para a resposta turbidez	94
Tabela 29 - Valores de remoção de turbidez experimentais, previstas pelo modelo e desvios para o DCCR	94
Tabela 30 - ANOVA para a resposta DQO reparametrizado	95
Tabela 31 - Coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta DQO	96
Tabela 32 - Valores de remoção de DQO experimentais, previstas pelo modelo e desvios para o DCCR	96
Tabela 33 - ANOVA para a resposta SST reparametrizado	97

Tabela 34 - Coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta SST.....	98
Tabela 35 - Valores de remoção de SST experimentais, previstas pelo modelo e desvios para o DCCR.....	99
Tabela 36 - Parâmetros de qualidade do efluente bruto.....	104
Tabela 37 - Delineamento experimental com valores codificados e respostas quanto a eficiência da remoção do processo FAD utilizando PAC e Polímero	104
Tabela 38 - Resultados da eficiência de remoção	105
Tabela 39 - Coeficientes de regressão para a resposta cor.....	106
Tabela 40 - ANOVA para a resposta cor	107
Tabela 41 - Valores de remoção de cor experimentais, previstas pelo modelo e desvios para o DCCR.....	107
Tabela 42 - ANOVA para a resposta turbidez reparametrizado	108
Tabela 43 - Coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta turbidez ..	109
Tabela 44 - Valores de remoção de turbidez experimentais, previstas pelo modelo e desvios para o DCCR.....	109
Tabela 45 - ANOVA para a resposta DQO reparametrizado	110
Tabela 46 - Coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta DQO	111
Tabela 47 - Valores de remoção de DQO experimentais, previstas pelo modelo e desvios para o DCCR.....	111
Tabela 48 - ANOVA para a resposta SST reparametrizado.....	112
Tabela 49 - Coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta SST.....	113
Tabela 50 - Valores de remoção de SST experimentais, previstas pelo modelo e desvios para o DCCR.....	113
Tabela 51 - Parâmetros de qualidade do efluente bruto.....	119
Tabela 52 - Delineamento experimental com valores codificados e respostas quanto a eficiência da remoção do processo FAD utilizando Moringa.....	119
Tabela 53 - Resultados da eficiência de remoção	120
Tabela 54 - ANOVA para a resposta cor reparametrizado	121
Tabela 55 - Coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta cor	122
Tabela 56 - Valores de remoção de cor experimentais, previstas pelo modelo e desvios para o DCCR.....	122
Tabela 57 - ANOVA para a resposta turbidez	123
Tabela 58 - Coeficientes de regressão para a resposta turbidez	124
Tabela 59 - Valores de remoção de turbidez experimentais, previstas pelo modelo e desvios para o DCCR.....	124
Tabela 60 - ANOVA para a resposta DQO reparametrizado	125
Tabela 61 - Coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta DQO	125
Tabela 62 - Valores de remoção de DQO experimentais, previstas pelo modelo e desvios para o DCCR.....	126
Tabela 63 - ANOVA para a resposta SST.....	127
Tabela 64 - Coeficientes de regressão para a resposta SST	128
Tabela 65 - Valores de remoção de SST experimentais, previstas pelo modelo e desvios para o DCCR.....	128
Tabela 66 - Eficiência de remoção de cor aparente, turbidez, DQO, SST.....	134
Tabela 67 - Remoção do efluente bruto em unidade de cor aparente, turbidez, DQO, SST.....	135

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Métodos analíticos e análises realizadas na pesquisa	24
Quadro 2 - Valores codificados do DCCR, valores utilizados para a corrente elétrica e para o tempo de coagulação.....	28
Quadro 3 - Parâmetros de gradiente de velocidade e tempo de agitação.....	31
Quadro 4 - Valores codificados do DCCR, valores utilizados na dosagem de tanino e pH efluente.....	33
Quadro 5 - Valores codificados do DCCR, valores utilizados na dosagem de PAC e Polímero..	35
Quadro 6 - Valores codificados do DCCR, valores utilizados na dosagem de moringa e pH efluente.....	38
Quadro 7 - Produtos químicos auxiliares usados no tingimento de tecidos	45

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Remoção de cor reparametrizado pelo processo eletroquímico.....	76
Equação 2 - Remoção de turbidez reparametrizado pelo processo eletroquímico	78
Equação 3 - Remoção de DQO reparametrizado pelo processo eletroquímico	80
Equação 4 - Remoção de SST reparametrizado pelo processo eletroquímico.....	82
Equação 5 - Remoção de cor reparametrizado pelo processo FAD utilizando tanino.....	92
Equação 6 - Remoção de turbidez pelo processo FAD utilizando tanino	94
Equação 7 - Remoção de DQO reparametrizado pelo processo FAD utilizando tanino	96
Equação 8 - Remoção de SST reparametrizado pelo processo FAD utilizando tanino.....	98
Equação 9 - Remoção de cor pelo processo FAD utilizando PAC e polímero.....	106
Equação 10 - Remoção de turbidez reparametrizado pelo processo FAD utilizando PAC e polímero	109
Equação 11 - Remoção de DQO reparametrizado pelo processo FAD utilizando PAC e polímero	111
Equação 12 - Remoção de SST reparametrizado pelo processo FAD utilizando PAC e polímero	113
Equação 13 - Remoção de cor reparametrizado pelo processo FAD utilizando moringa	122
Equação 14 - Remoção de turbidez pelo processo FAD utilizando moringa.....	123
Equação 15 - Remoção de DQO reparametrizado pelo processo FAD utilizando moringa.....	126
Equação 16 - Remoção de SST pelo processo FAD utilizando moringa	127

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIT	Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
C.E.	Corrente Elétrica
DBO	Demanda Biológica de Oxigênio
DCCR	Delineamento composto central rotacional
DQO	Demanda química de oxigênio
F	Constante de Faraday
FAD	Flotação por ar dissolvido
F_{cal}	F calculado
FIEMG	Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais
F_{tab}	F tabelado
G_{ml}	Gradiente de velocidade mistura lenta
G_{mr}	Gradiente de velocidade mistura rápida
i	Intensidade de corrente
M	Massa molar do elemento predominante do eletrodo
m_{el}	Massa do eletrodo consumida
min	Minutos
n	Número de elétrons envolvidos na reação de oxidação
P	Potência consumida
P. A.	Para análise
PAC	Policloreto de alumínio
pH	Potencial Hidrogeniônico
P_{sat}	Pressão de saturação
R	Taxa de recirculação
SST	Sólidos suspensos totais
t	Tempo de aplicação da corrente
T.C.	Tempo de coagulação
T_a	Taxa de aplicação volumétrica média
T_{ml}	Tempo de agitação mistura lenta
T_{mr}	Tempo de agitação mistura rápida
UC	Unidade de cor
UI	Unidade Internacional
UNT	Unidade nefelométrica de turbidez
V	Tensão aplicada
V_f	Velocidade média de flotação aplicada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	19
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS	19
1.3 OBJETIVOS.....	20
1.3.1 Objetivo geral	20
1.3.2 Objetivos específicos	20
1.4 FORMA ORGANIZACIONAL.....	21
2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	23
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	23
2.2 ANÁLISES.....	24
2.3 PROCEDIMENTOS DE COLETA DAS AMOSTRAS DOS EFLUENTES LÍQUIDOS	25
2.4 ENSAIOS DE ELETROCOAGULAÇÃO, ELETROFLOCULAÇÃO E ELETROFLOTAÇÃO ..25	
2.4.1 Equipamentos utilizados.....	26
2.4.2 Parâmetros fixados	27
2.4.3 Roteiro dos ensaios	27
2.5 ENSAIOS COM FLOTATESTES	29
2.5.1 Equipamentos utilizados.....	30
2.5.2 Parâmetros fixados	31
2.5.3 Roteiro dos ensaios	31
2.5.3.1 Processo 2 - Utilização de Tanino.....	32
2.5.3.2 Processo 3 - Utilização de PAC e Polímero	35
2.5.3.3 Processo 4 - Utilização de Semente de Moringa Oleífera.....	37
3 REFERENCIAL TEÓRICO	40
3.1 INDÚSTRIA TÊXTIL.....	40
3.1.1 A água na indústria têxtil	41
3.1.2 Corantes.....	44
3.1.3 Produtos químicos auxiliares.....	45
3.2 TRATAMENTO DE EFLUENTE TÊXTIL	46

3.2.1 Coagulação e Floculação.....	47
3.2.1.1 <i>Mecanismos de coagulação</i>	48
3.2.2 Sistemas eletroquímicos	51
3.2.2.1 <i>Reações envolvidas no processo de eletrocoagulação</i>	57
3.2.2.2 <i>Aplicações da eletrofloculação</i>	58
3.2.3 Flotação por ar dissolvido	62
3.2.4 Coagulantes e Floculantes.....	64
3.2.4.1 <i>Tanino</i>	64
3.2.4.2 <i>Policloreto de alumínio e Polímero Aniônico</i>	66
3.2.4.3 <i>Moringa oleífera</i>	69
4. RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISE DO PROCESSO ELETROQUÍMICO	73
4.1 RESPOSTA COR APARENTE.....	75
4.2 RESPOSTA TURBIDEZ	77
4.3 RESPOSTA DQO	79
4.4 RESPOSTA SST	81
4.5 CURVAS DE CONTORNO E SUPERFÍCIE DE RESPOSTA PARA OS ENSAIOS ELETROQUÍMICOS.....	83
5. RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISE DO PROCESSO FAD COM COAGULANTE TANINO	89
5.1 RESPOSTA COR APARENTE.....	91
5.2 RESPOSTA TURBIDEZ	93
5.3 RESPOSTA DQO	95
5.4 RESPOSTA SST	97
5.5 CURVAS DE CONTORNO E SUPERFÍCIE DE RESPOSTA PARA O ENSAIO FAD COM TANINO.....	99
6. RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISE DO PROCESSO FAD COM COAGULANTE PAC E POLÍMERO	104
6.1 RESPOSTA COR APARENTE.....	106
6.2 RESPOSTA TURBIDEZ	108
6.3 RESPOSTA DQO	110
6.4 RESPOSTA SST	112
6.5 CURVAS DE CONTORNO E SUPERFÍCIE DE RESPOSTA	114

7. RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISE DO PROCESSO FAD COM COAGULANTE MORINGA	119
7.1 RESPOSTA COR APARENTE	121
7.2 RESPOSTA TURBIDEZ	123
7.3 RESPOSTA DQO	125
7.4 RESPOSTA SST	127
7.5 CURVAS DE CONTORNO E SUPERFÍCIE DE RESPOSTA	129
8. ANÁLISE DOS RESULTADOS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DE LAVANDERIA INDUSTRIAL TÊXTIL	134
8.1 COR APARENTE	135
8.2 TURBIDEZ	136
8.3 DQO	137
8.4 SST	138
9 CONSIDERAÇÕES FINAIS	140
9.1 CONCLUSÕES	140
9.2 RECOMENDAÇÕES	141
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	143

1 INTRODUÇÃO

Um amplo número de substâncias químicas com toxicidades variáveis tem sido utilizado em produtos novos nas mais variadas áreas, tais como agricultura, indústria e saúde. Conforme Colborn et al. (2002), nos últimos 50 anos, os produtos químicos aumentaram em concentração, tanto no ambiente quanto nos organismos vivos, por causa da gama de insumos que estão disponíveis no mercado e pelo seu uso intensivo.

Esse aumento de substâncias no ambiente tem como destino fim a água, que pode conter impurezas em quantidade e natureza acima de padrões especificados, inviabilizando seu uso para consumo humano, agrícola ou industrial. Ou seja, a poluição hídrica proporcionada pelo lançamento dos efluentes líquidos nos recursos hídricos é um problema, principalmente no que se refere às condições de saúde pública e do meio ambiente.

Nesse contexto, o setor têxtil apresenta grande relevância, primeiramente, pelo porte do seu parque fabril instalado no Brasil e, também, pelo grande volume de efluentes produzidos.

O Brasil está no 5º lugar no ranking mundial do setor têxtil, sendo o quinto maior produtor mundial, e tendo o quinto maior parque industrial têxtil. Possui em torno de 33.148 empresas que oferecem 1,62 milhões de empregos diretos, sendo o único país das Américas a manter toda a cadeia ativa. Hoje, o investimento total do parque industrial têxtil brasileiro com equipamentos e maquinário é na faixa de R\$ 215 bilhões (FIEMG – CIRCUITO ABIT, 2014).

Nos processos da indústria têxtil, principalmente as etapas de tingimento e acabamento, além de utilizarem grande volume de água geram efluentes com vários produtos químicos de alta complexidade tais como corantes, dispersantes, detergentes, umectantes, ácidos, bases, oxidantes, sais. Os efluentes têxteis gerados caracterizam-se pela coloração intensa por causa de corantes não fixados na fibra, elevada demanda química de oxigênio (DQO), pH alcalino e alta condutividade elétrica por causa do teor de sais inorgânicos (KUNZ et al., 2002; HENRIQUES, 2004). No caso das lavanderias industriais têxteis, que realizam as operações de desengomagem, lavagem, estonagem, amaciamento, tingimento em

roupas novas, por exemplo, as características dos efluentes são semelhantes às dos têxteis.

As indústrias têxteis estão entre as indústrias que mais consomem água, sendo o setor de tingimento aquele que mais a utiliza. Assim, existe a necessidade de um aumento da eficiência hídrica nos processos têxteis, pois na década de 1990, era necessário em torno de 100 L de água para tingir 1 Kg de tecido. Atualmente, com as novas tecnologias, é possível tingir 1 Kg de tecido com 10 L de água (BERGNA et al., 1999; TOLEDO, 2004; RESENDE, 2012).

O tratamento convencional para remoção de cor dos efluentes têxteis é realizado pela coagulação e precipitação destes corantes com a adição de auxiliares químicos que produzem uma quantidade grande de lodo composto por corantes, sulfato de alumínio e/ou sulfato ferroso, cal e polímeros (ANDRADE, 2003).

Atualmente, têm-se utilizado coagulantes associados a polímeros. O policloreto de alumínio (PAC) é um coagulante inorgânico catiônico pré-polimerizado amplamente utilizado por causa de sua eficiência e pelo baixo custo. Vários estudos relacionados com a eficiência de tratamento de águas residuais e efluentes industriais têxteis propõem que os produtos PAC proporcionam floculação mais rápida e forte do que o sulfato de alumínio com uma dosagem equivalente (GREGORY e ROSSI, 2001; PIOLTINE e REALI, 2011; VERMA et al. 2012).

Em vários casos, o PAC é considerado um coagulante superior ao sulfato de alumínio, visto que, na eliminação de substâncias coloidais apresenta eficiência superior em 2,5 vezes, para a mesma dosagem de Al^{3+} , em relação a outros sais de alumínio utilizados frequentemente (PAVANELLI, 2001; SRIVASTAVA et al., 2005).

Os polímeros são utilizados na separação líquido/sólido nos sistemas de decantação e flotação. Sua função é a de gerar pontes entre as partículas já coaguladas gerando flocos com diâmetro maior (WATANABE e USHIYAMA, 2000). Pesquisas com diversos tipos de efluentes industriais têm sido investigados com resultados satisfatórios na remoção de poluentes (QUARTAROLI et al., 2014; SANTOS et al., 2014).

A escolha do processo e do coagulante para realizar o tratamento do efluente têxtil depende de múltiplos fatores, como as características do efluente, a qualidade exigida do efluente após o tratamento, a disponibilidade de área, disponibilidade tecnológica e os custos (HASSEMER, 2000).

Assim, uma alternativa para remoção de cor de efluentes de indústria têxtil é a utilização de coagulantes denominados como naturais: tanino e moringa *oleífera*.

O tanino é extraído da Acácia Negra (*Acacia mearnsii*). O produto Tanfloc SG é uma marca comercial da empresa TANAC (Brasil). O produto é um polímero orgânico-catiônico de baixo peso molecular à base de tanino que atua como coagulante e floculante. Tanfloc SG é efetivo em uma ampla faixa de pH e é recomendando nas seguintes áreas de aplicação: efluentes de metalurgia, papel e papelão, curtumes, alimentícias, têxteis, químicas; petroquímicos, cerâmica, abatedouros de aves, tratamento de água de abastecimento (CASTRO-SILVA et al., 2004; MARTÍN et al., 2010; TANAC, 2015). Os pesquisadores (Martín et al., 2010; Junior et al., 2013; Ströher et al., 2013) em pesquisas de efluentes têxteis utilizando produtos à base de tanino, obtiveram eficiências altas na remoção de contaminantes dos efluentes.

A Moringa *oleífera* é uma árvore pertencente à família das *Moringaceae*, nativa da Índia, que se espalhou nos trópicos do mundo todo e que está tendo evidência no tratamento de água potável (KARADI et al., 2006). As sementes possuem atividade coagulante por causa das proteínas catiônicas solúveis em água, e o seu principal mecanismo de coagulação é a adsorção e a neutralização de cargas (BHATIA et al. 2007). O uso da moringa *oleífera* como agente coagulante é uma opção viável para a substituição dos sais de alumínio, pois não altera expressivamente o pH e a alcalinidade da solução após o tratamento, gera menor volume de lodo, sendo este biodegradável (NDABIGENGESERE e NARASIAH, 1998; GHEBREMICHAEL et al., 2005; GALLÃO et al., 2006; NKURUNZIZA et al., 2009; NWAIWU e LINGMU, 2011). Nas pesquisas de Heredia et al., 2009; Pritchard et al., 2010; Ströher et al., 2012; Veeramalini et al., 2012; Ströher et al., 2013 foram relatadas um bom percentual de remoção de cor dos efluentes têxteis utilizando a moringa oleífera como coagulante.

A tecnologia de tratamento pelos processos de eletrocoagulação / eletrofloculação / eletroflotação é uma alternativa eficaz para o atendimento as legislações ambientais. Estes processos são submetidos às reações de oxidação e redução o que podem propiciar a ocorrência de processos de floculação e seguidos da flotação de parte da carga poluidora existente, resultando em um aumento da eficiência do processo de tratamento.

O processo eletroquímico utiliza princípios similares ao da coagulação e floculação, com a adição de oxigênio e hidrogênio pelas reações de eletrólise o que proporciona um fluxo de micro bolhas que interagem com todo efluente contido no reator eletroquímico.

As tecnologias eletroquímicas têm causado grande interesse, pois oferecem meios eficazes para solucionar os problemas ambientais dos processos industriais. Estas técnicas têm sido investigadas para a descoloração e degradação de corantes em soluções aquosas (soluções de corantes sintéticos e águas residuais) por vários grupos de cientistas (HUITLE et al., 2012). Nas pesquisas de Ciardelli et al., 2001; Silva et al., 2000; Kobya et al., 2003; Cerqueira, 2006; Daneshvar et al., 2006; Zaroual et al., 2006; Merzouk et al., 2011, utilizando o processo eletroquímico no efluente têxtil, os resultados mostraram eficiente remoção de cor, turbidez e DQO.

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O tema da pesquisa foi centrado em estudos com efluente proveniente de lavanderia industrial têxtil utilizando ensaios eletroquímicos com eletrodos de alumínio e carbono e ensaios físico-químicos pelo processo de flotação por ar dissolvido empregando os coagulantes e floculantes (polímero aniônico, policloreto de alumínio, tanino “Tanfloc SG” e *moringa oleífera*).

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

A problematização deste trabalho consiste em identificar, por meio de uma análise estatística, a eficiência de tratamentos de efluente de lavanderia industrial têxtil por processos eletroquímicos e físico-químicos convencionais (policloreto de alumínio e polímero aniônico), bem como uso de coagulantes naturais (tanino “Tanfloc SG” e *moringa oleífera*). A partir da análise e avaliação de variáveis resposta para cada tipo de tratamento proposto, estabelecer parâmetros ótimos

associados a melhores concepções de tratamento. Isto possibilita ao setor avaliar a possibilidade de mudança e alteração dos sistemas de tratamento atuais visando viabilizar novos processos associados ao reuso e/ou a minimização de impactos hídricos ambientais.

A pesquisa possui as seguintes premissas:

1 – de que as indústrias somente podem descartar seus efluentes após tratamento que visa possibilitar o enquadramento dos os parâmetros DQO, cor aparente, turbidez, sólidos suspensos totais conforme as resoluções específicas;

2 – tratamentos eletroquímicos com eletrodos de alumínio e carbono e ensaios físico-químicos pelo processo de FAD utilizando (polímero aniônico, policloreto de alumínio, tanino “Tanfloc SG” e moringa *oleífera* como coagulantes e floculantes) são mais eficientes que o tratamento de efluentes de lavanderia industrial têxtil que utiliza como coagulante o sulfato de alumínio.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo principal comparar os métodos de tratamento eletroquímico e físico-químico para remoção de cor aparente, turbidez, DQO e SST do efluente de lavanderia industrial têxtil para avaliar o potencial de redução da carga poluente.

1.3.2 Objetivos específicos

- ✓ Estimar os resultados ótimos a partir de variáveis resposta corrente elétrica e tempo de eletrocoagulação para os ensaios de eletrocoagulação, eletrofloculação e eletroflotação.
- ✓ Estimar os resultados ótimos a partir de variáveis resposta tipo e dosagem de coagulante e floculante (polímero aniônico, policloreto de alumínio, tanino

“Tanfloc SG” e moringa *oleífera*); e pH do efluente para os ensaios de flotação por ar dissolvido utilizando *flotateste*;

- ✓ Comparar a eficiência do tratamento eletroquímico com o tratamento físico-químico.

1.4 FORMA ORGANIZACIONAL

A organização desse trabalho foi realizada em 10 capítulos:

Capítulo 1 – Introdução: aborda a delimitação do tema, problemas e premissas, objetivos, justificativa, bem como a forma organizacional do trabalho.

Capítulo 2 – Procedimentos Metodológicos: descreve o procedimento utilizado no desenvolvimento da pesquisa.

Capítulo 3 – Referencial Teórico: apresenta uma revisão bibliográfica baseada nas principais questões do trabalho: a indústria têxtil, o tratamento de efluente têxtil pelos processos eletroquímicos e por flotação por ar dissolvido, características e estudos sobre os coagulantes tanino, policloreto de alumínio, polímero aniônico e moringa *oleífera*.

Capítulo 4 – Resultados Obtidos e Análise do processo eletroquímico: são apresentados e analisados os resultados alcançados na pesquisa do processo eletroquímico.

Capítulo 5 – Resultados Obtidos e Análise do processo FAD com tanino: são apresentados e analisados os resultados alcançados na pesquisa do processo FAD com tanino.

Capítulo 6 – Resultados Obtidos e Análise do processo FAD com PAC e polímero: são apresentados e analisados os resultados alcançados na pesquisa do processo FAD com PAC e polímero.

Capítulo 7 – Resultados Obtidos e Análise do processo FAD com moringa: são apresentados e analisados os resultados alcançados na pesquisa do processo FAD com moringa.

Capítulo 8 – Análise dos Resultados de Tratamento de Efluentes de Lavanderia Industrial Têxtil: os resultados obtidos no estudo são analisados comparativamente em conjunto com todos os tipos de processo e coagulante usado.

Capítulo 9 – Considerações Finais: resultados obtidos na realização do trabalho, bem como propostas de ações e recomendações de trabalhos futuros.

Capítulo 10 – Referências Bibliográficas: encontram relacionadas a consulta das referências bibliográficas.

2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Nessa seção serão apresentados os procedimentos efetuados para a coleta das amostras dos efluentes líquidos, os equipamentos e produtos químicos utilizados, os parâmetros fixados, os roteiros dos ensaios, os métodos analíticos, os exames e análises realizados durante a pesquisa.

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste trabalho foram realizados quatro processos metodológicos, em conformidade com a representação da Figura 1.

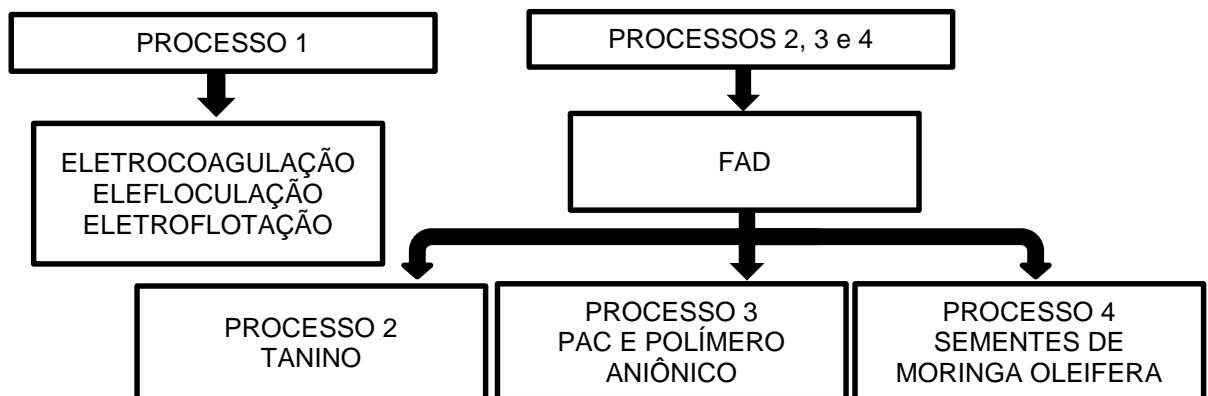


Figura 1 - Fluxograma dos ensaios realizados
Fonte: Autoria própria.

No primeiro processo foram realizados os ensaios de eletrocoagulação / eletrofloculação / eletroflotação em escala de laboratório pelo uso de uma célula eletrolítica.

No segundo, terceiro e quarto processos, foram realizados ensaios de flotação por ar dissolvido (FAD) em unidade de escala de bancada (*flotatestes*) no laboratório de saneamento da UTFPR. Os processos foram subdivididos em: - processo 2: uso de Tanino como coagulante; - processo 3: uso de PAC como coagulante e polímero aniônico como floculante; - processo 4: uso de sementes de Moringa Oleífera como coagulante.

O desempenho dos tratamentos realizados foi avaliado com base na remoção dos seguintes parâmetros: cor aparente; turbidez; demanda química de oxigênio (DQO) e sólidos suspensos totais (SST).

Antes de todos os ensaios, foi realizada a caracterização físico-química do efluente, de acordo com os procedimentos indicados no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1998), analisando os parâmetros: cor aparente; turbidez, sólidos suspensos totais, DQO, pH, condutividade. Os métodos analíticos empregados para a realização das análises estão expostos no Quadro 1.

Parâmetro	Descrição do método
Cor aparente	Standard Methods 2120 C – Método de espectrofotometria
Turbidez	Standard Methods 2130 B – Método nefelométrico
Sólidos suspensos totais	Standard Methods 2540 D – Sólidos Suspensos Totais seco em 103-105 ° C
DQO	Standard Methods 5220 D – Método colorimétrico, Refluxo fechado
pH	Standard Methods 4500-H+ B - Método eletrométrico
Condutividade	Standard Methods 2510 B – Método de Laboratório
Temperatura	Standard Methods 2550 B – Método de Laboratório e campo

Quadro 1 - Métodos analíticos e análises realizadas na pesquisa
Fonte: APHA (1998).

2.2 ANÁLISES

As análises de normalidade, Anova, R^2 , curvas de contorno, superfície de resposta e os resíduos foram gerados pelo programa Statistica Versão 12.0.1133.15.

Para verificar a normalidade dos dados foi utilizado o teste estatístico Kolmogorov-Smirnov. Foi calculado o valor crítico (D_n) e comparado com o valor tabelado (D_{tab}). Quando $D_n < D_{tab}$ não existem evidências para rejeitar a hipótese de normalidade dos dados (ESTATCAMP).

Para verificar se o modelo é estatisticamente significativo foi utilizado o teste da razão F. Foi calculado o F (F_{cal}) e comparado com o valor tabelado (F_{tab}) pela tabela de limites unilaterais da distribuição F de Fisher-Snedecor ao nível de 10% de probabilidade. Quando $F_{cal} > F_{tab}$ indica que os efeitos principais ou de interação correspondentes no modelo são estatisticamente representativo (LEVIN, et al., 2012).

A porcentagem de variação explicada, também chamado de coeficiente de determinação (R^2) foi calculado para verificar a variância das respostas nos ensaios. Foi calculado o R^2 e comparado com o valor crítico da tabela t student ao nível de 10% de significância. Quando o R^2 for maior que o valor crítico tabelado aceita-se a hipótese de pesquisa e pode-se inferir que o modelo é significativo (LEVIN, et al., 2012).

2.3 PROCEDIMENTOS DE COLETA DAS AMOSTRAS DOS EFLUENTES LÍQUIDOS

O efluente objeto de estudo é um efluente de lavanderia industrial têxtil situada na cidade de Apucarana / PR, o qual é proveniente do processo de lavagem, tingimento e amaciamento de tecidos, calças e camisas. O ponto de coleta foi o tanque de equalização afluente à ETE através do sistema secundário da tubulação que conduz a água bruta do tanque até a entrada da ETE.

O Tanque de equalização é o local onde os efluentes da produção são homogeneizados. O processo é realizado para garantir uma maior eficiência do sistema de tratamento.

Foram coletados 350 litros de efluentes com frascos de polietileno de capacidade de 50 L e adotada preservação em refrigeração a 4°C.

2.4 ENSAIOS DE ELETROCOAGULAÇÃO, ELETROFLOCULAÇÃO E ELETROFLOTAÇÃO

Este tópico apresenta informações referentes aos ensaios de eletrocoagulação, eletrofloculação e eletroflotação: 1. Equipamentos utilizados; 2. Parâmetros fixados; 3. Roteiro dos ensaios.

2.4.1 Equipamentos utilizados

O equipamento utilizado para o sistema eletroquímico é composto por um reator de batelada com capacidade para 450 mL de efluente no qual é inserido verticalmente uma célula unitária construído com duas placas de carbono/alumínio (célula eletrolítica). O potencial elétrico e a corrente elétrica foram controlados por um gerenciador de fonte DC.

Os eletrodos utilizados possuem uma área geométrica de 24 cm² com as seguintes características: 6 cm de altura; 4 cm de largura e espessura de 10 mm. A distância entre as placas dos eletrodos foram mantidas a uma distância de 1 cm por espaçadores.

Após a inserção da célula eletrolítica no sistema e a adição do efluente, a agitação foi mantida constante por meio de agitador magnético.

A descrição dos equipamentos utilizados para os ensaios são (Figura 2): Agitador magnético com aquecimento – Modelo: LS59-110P; Marca: IOGEN; Célula Eletrolítica; Fonte D.C. – Modelo: HP 6632A, Interface GPIB; Marca: HP; Potenciostato / Galvanostato – Modelo: M173; Marca: EG&G PAR; Gerador de rampa de potencial – Modelo: M175; Marca: EG&G PAR; Aquisição dos dados – Modelo: Placa DAQ; Marca: National Instruments; Multímetro – Modelo: ET2076; Marca: Minipa.

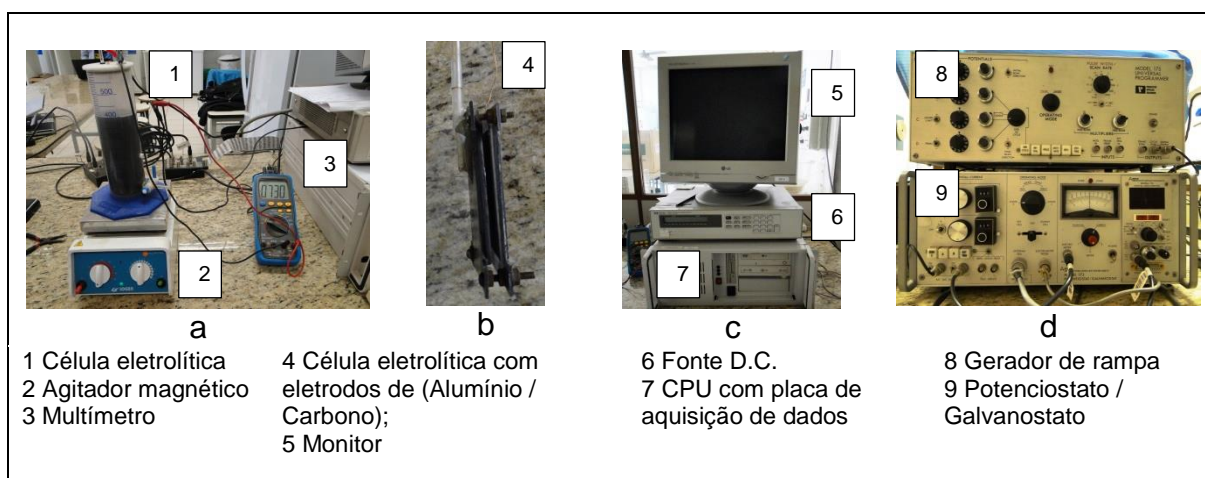


Figura 2 – Equipamentos utilizados no tratamento eletroquímico: (a) Célula eletrolítica sobre o agitador magnético, multímetro; (b) Detalhe da célula eletrolítica; (c) Monitor, fonte D.C., CPU com placa de aquisição dos dados; (d) Gerador de rampa, potenciostato / galvanostato
Fonte: Autoria própria.

2.4.2 Parâmetros fixados

Para o desenvolvimento dos ensaios de eletrocoagulação, eletrofloculação e eletroflotação os seguintes parâmetros foram fixados: pH do efluente = 7,84; condutividade de 7,04 mS.cm⁻¹; tempo de eletroflotação de 15 minutos, tempo de repouso de 10 minutos; material dos eletrodos (Alumínio / Carbono); velocidade de agitação de 250 rpm; temperatura do efluente de 24 ± 2°C.

2.4.3 Roteiro dos ensaios

Após a fixação dos parâmetros, foi realizado o planejamento experimental para duas variáveis independentes utilizando a metodologia do delineamento composto central rotacional (DCCR). De acordo com o método foi realizado um fatorial completo 2², incluindo 4 pontos axiais e 4 repetições no ponto central, totalizando 12 ensaios. Os ensaios 1 ao 4 representam o fatorial completo; os ensaios 5 a 8 são pontos axiais; e os ensaios 9 a 12 são as repetições no ponto central.

Os parâmetros independentes utilizados no DCCR foram a corrente elétrica (C.E.) e tempo de coagulação (T.C).

Após o término dos ensaios foram realizadas análises físico-químicas: cor aparente, turbidez, DQO, SST.

O quadro 2 apresenta os valores codificados do DCCR e os valores utilizados para a corrente elétrica e para o tempo de coagulação. As condições de ensaio do ponto central foram determinadas a partir de pré-ensaios associados à pesquisa bibliográfica com valores reportados em bibliografia (Silva et al., 2000; Ciardelli et al., 2001; Kobya et al., 2003; Cerqueira, 2006; Daneshvar et al., 2006; Zaroual et al., 2006; Daneshvar et al., 2007; Merzouk et al., 2011).

Ensaio	Valores codificados do DCCR		(x1) Corrente Elétrica (mA)	(x2) Tempo de coagulação (minutos)
	x1	x2		
1	-1	-1	287,87	8,46
2	1	-1	712,13	8,46
3	-1	1	287,87	15,54
4	1	1	712,13	15,54
5	-1,4142	0	200	12
6	1,4142	0	800	12
7	0	-1,4142	500	7
8	0	1,4142	500	17
9	0	0	500	12
10	0	0	500	12
11	0	0	500	12
12	0	0	500	12

Quadro 2 - Valores codificados do DCCR, valores utilizados para a corrente elétrica e para o tempo de coagulação

Fonte: Autoria própria.

O roteiro dos ensaios é apresentado na Figura 3.

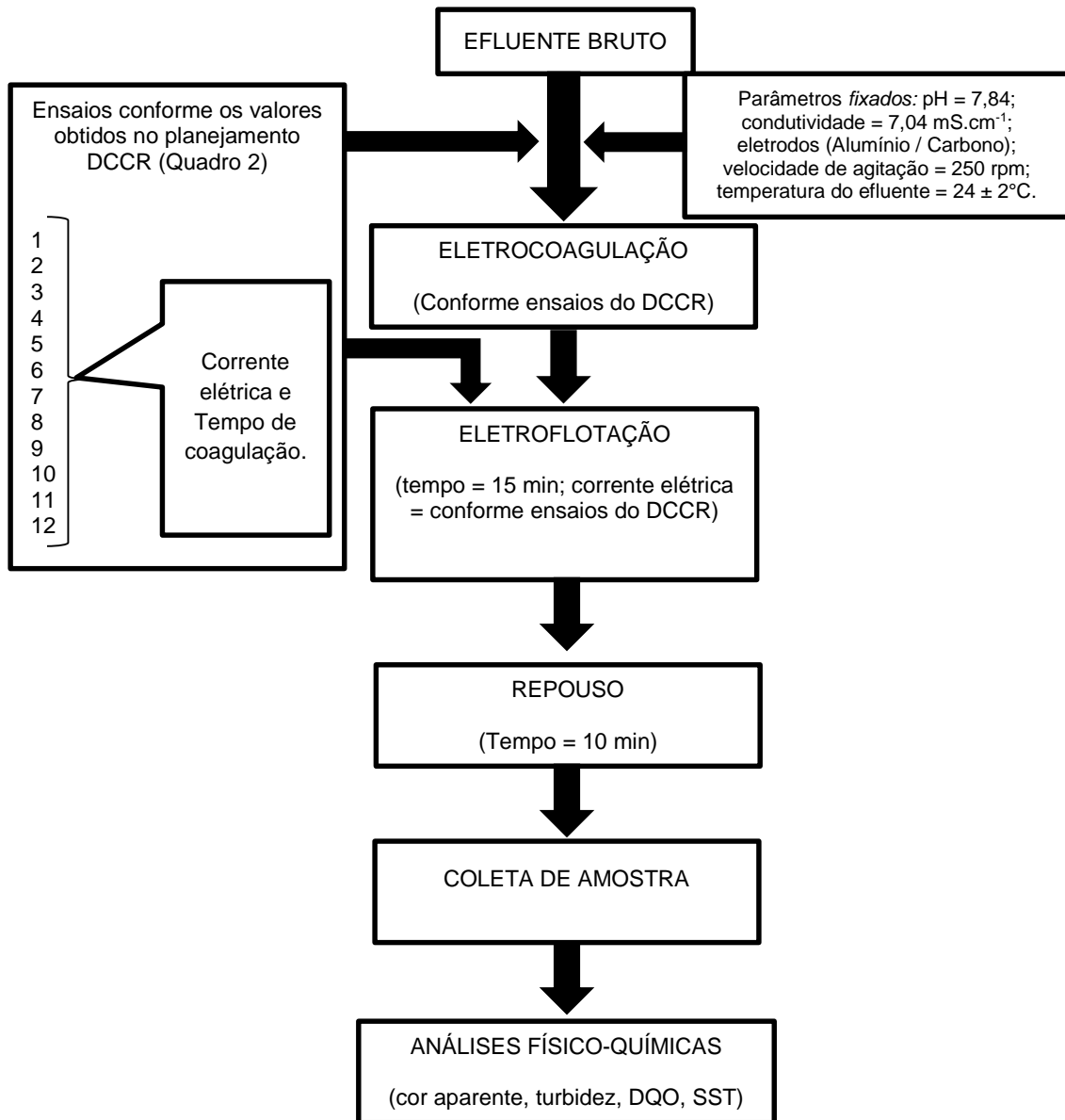


Figura 3 - Procedimentos dos ensaios de eletrocoagulação/electroflocculação/electroflotação no processo 1
Fonte: Autoria própria.

2.5 ENSAIOS COM FLOTATESTE

São apresentadas as informações referentes aos ensaios de FAD o qual utilizou como coagulantes e floculantes: Tanino (Processo 2), PAC e polímero aniônico (Processo 3) e sementes de Moringa Oleífera (Processo 4). Este tópico se divide em: 1. Equipamentos utilizados; 2. Parâmetros fixados; 3. Roteiro dos ensaios.

2.5.1 Equipamentos utilizados

Os ensaios de variação de dosagens de coagulantes e floculantes foram realizados em escala de laboratório pelo uso do *flotateste*. Este equipamento é constituído por um conjunto de colunas de flotação interligadas à câmara de saturação. Para efetuar o processo de mistura rápida e floculação, cada vaso possui agitador próprio. Para efetuar a operação de flotação, existe uma interligação com uma câmara de saturação associada a um compressor de ar.

Na Figura 4, têm-se os detalhes do equipamento utilizado, um jarro de teste modificado com capacidade de 2 litros cada, associados a um sistema de distribuição do ar dissolvido com uma câmara de saturação de ar com capacidade de até 8 Bar. A descrição dos equipamentos utilizados para os ensaios são descritos a seguir: Jar Test – Modelo: 218; Marca: Multitec; Câmara de Saturação; Compressor de ar – Modelo: Moto Press Wind 7,8; Marca: Pressure.

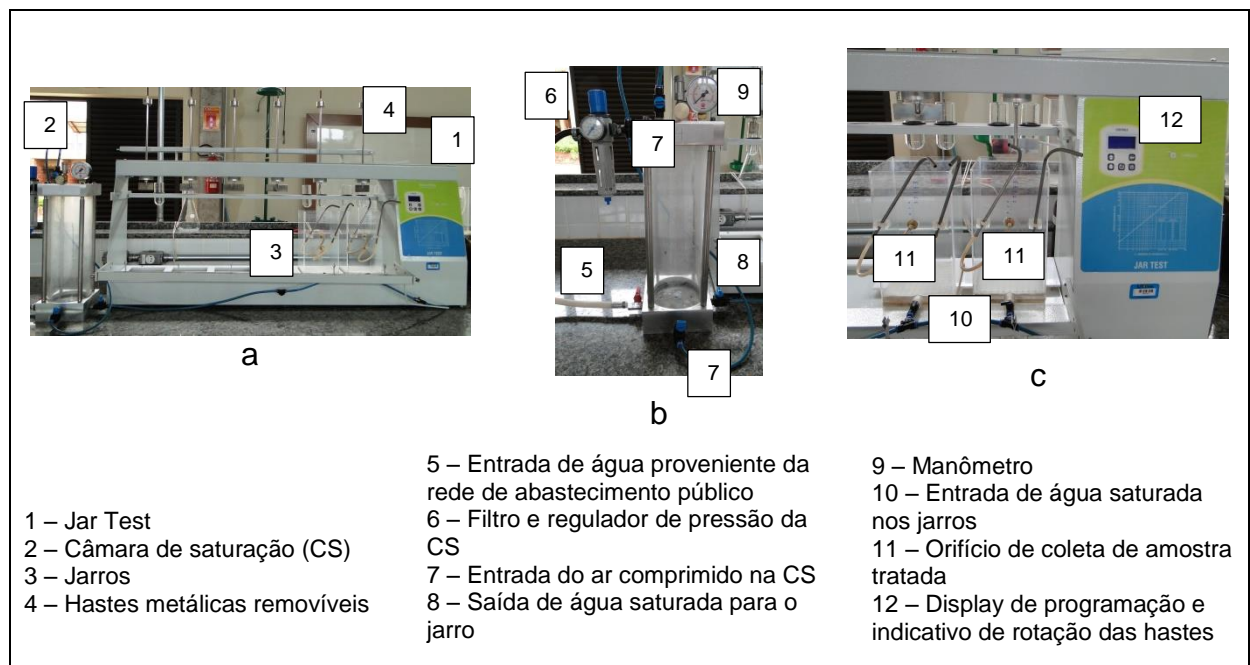


Figura 4 – Equipamentos utilizados no tratamento FAD: (a) Jar Test e câmara de saturação; (b) Detalhe da câmara de saturação; (c) Detalhe dos jarros e display de programação
 Fonte: Autoria própria.

2.5.2 Parâmetros fixados

Para o desenvolvimento dos ensaios com flotatestes foram fixados os parâmetros gradiente de velocidade e tempo de agitação em quatro estágios (Quadro 3)

Estágio	Gradiente (s^{-1})	Tempo (s)
1	$G_{1mr} = 1150$	$T_{1mr} = 110$
2	$G_{2ml} = 80$	$T_{2ml} = 480$
3	$G_{3ml} = 50$	$T_{3ml} = 300$
4	$G_{4ml} = 30$	$T_{4ml} = 300$

Quadro 3 - Parâmetros de gradiente de velocidade e tempo de agitação.

Fonte: Autoria própria.

A pressão de saturação (P_{sat}) utilizada foi de 6 bar conforme recomendação do fabricante do equipamento para garantir uma pressão mínima de operação na saída do sistema de 4,5 bar.

A taxa de recirculação (R) utilizada foi de 20 %; volume do jarro de 2 L; altura da coleta (base da coluna de flotação até orifício de coleta) de 7,5 cm e a temperatura do efluente no tratamento foi de $24 \pm 2^{\circ}C$.

O tempo de coleta da amostra após a aplicação do tratamento foi de 22,5 minutos, resultando em uma velocidade média de flotação aplicada (V_f) de $0,33 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ e em uma taxa de aplicação volumétrica média (T_a) de $4,8 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$.

Para a realização dos experimentos foram utilizadas duas colunas de flotação por batelada, para não influenciar a pressão da câmara de saturação devido a demanda.

2.5.3 Roteiro dos ensaios

Os ensaios foram realizados utilizando: - Tanino; - PAC e Polímero; - semente de Moringa *Oleífera*.

Em todos os processos foram realizados planejamento experimental para duas variáveis independentes utilizando a metodologia do delineamento composto central rotacional (DCCR). De acordo com o método foi realizado um fatorial completo 2^2 , incluindo 4 pontos axiais e 4 repetições no ponto central, totalizando 12 ensaios. Os ensaios 1 ao 4 representam o fatorial completo; os ensaios 5 a 8 são pontos axiais; e os ensaios 9 a 12 são as repetições no ponto central.

Os parâmetros independentes usados no DCCR foram:

- Processo 2: dosagem de tanino e pH do efluente;
- Processo 3: dosagem de PAC e dosagem de polímero;
- Processo 4: dosagem de moringa e pH do efluente.

Após o término dos ensaios, foram realizadas as análises físico-químicas: cor aparente, turbidez, DQO, SST.

2.5.3.1 Processo 2 - Utilização de Tanino

Foram realizados ensaios com o objetivo de otimizar o processo de FAD com o coagulante Tanino. O quadro 4 apresenta os valores codificados do DCCR e os valores utilizados na dosagem de tanino e pH do efluente. As condições de ensaio do ponto central foram determinadas a partir de pré-ensaios associados à pesquisa bibliográfica com valores reportados em bibliografia (Martín et al., 2010; Junior et al., 2013; Ströher et al., 2013).

Ensaio	Valores codificados do DCCR		(x1) Dosagem de tanino (mg.L ⁻¹)	(x2) pH efluente
	x1	x2		
1	-1	-1	64,6	6,9
2	1	-1	135,4	6,9
3	-1	1	64,6	8,5
4	1	1	135,4	8,5
5	-1,4142	0	50	7,7
6	1,4142	0	150	7,7
7	0	-1,4142	100	6,5

Ensaio	Valores codificados do DCCR		(x1) Dosagem de tanino (mg.L ⁻¹)	(x2) pH efluente
	x1	x2		
8	0	1,4142	100	8,9
9	0	0	100	7,7
10	0	0	100	7,7
11	0	0	100	7,7
12	0	0	100	7,7

Quadro 4 - Valores codificados do DCCR, valores utilizados na dosagem de tanino e pH efluente
 Fonte: Autoria própria.

O roteiro dos ensaios é apresentado na Figura 5.

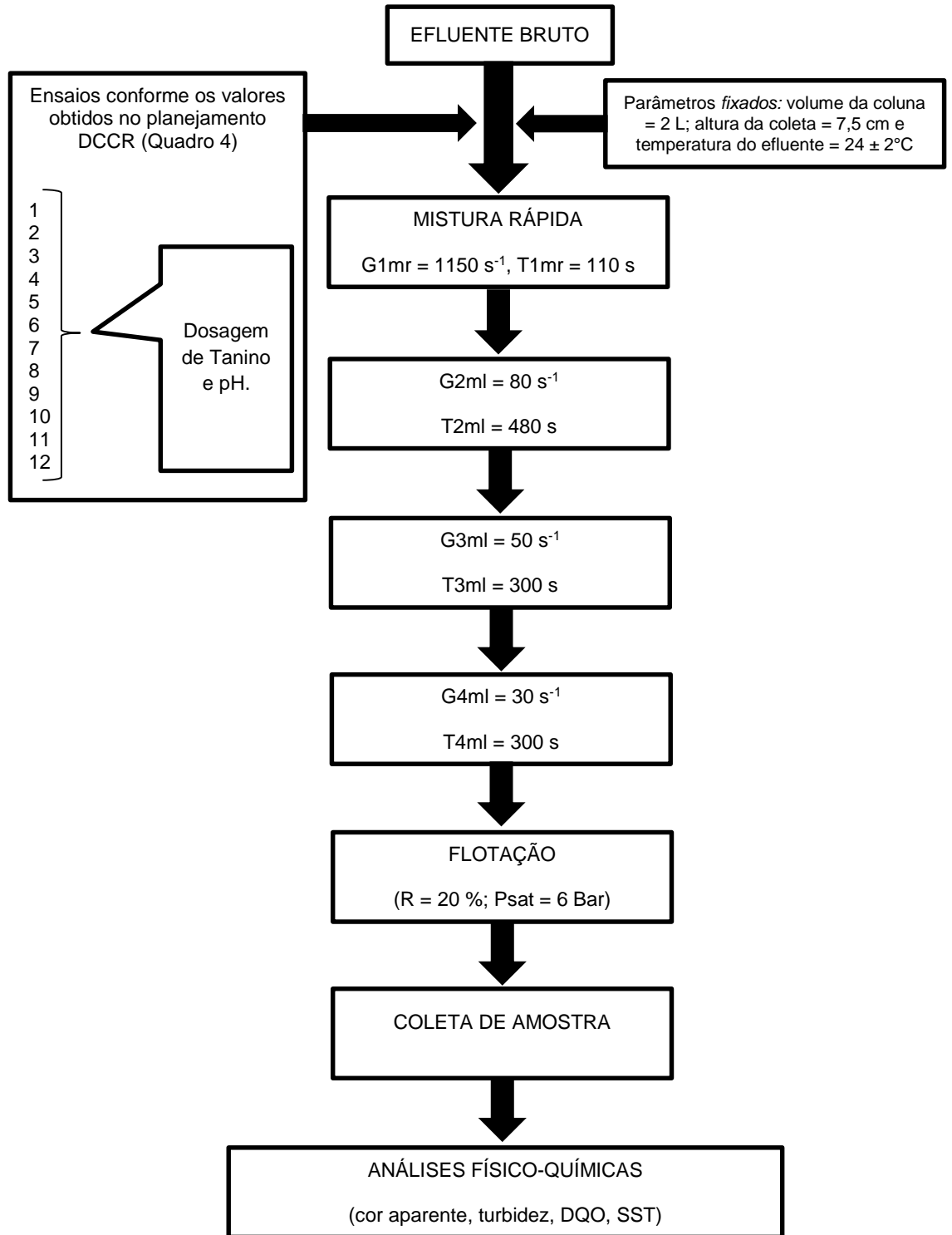


Figura 5 - Procedimentos dos ensaios com flotatestes no processo 2
 Fonte: Autoria própria.

2.5.3.2 Processo 3 - Utilização de PAC e Polímero

Nessa fase foram realizados ensaios com o objetivo de otimizar o processo de FAD utilizando o coagulante e floculante policloreto de alumínio e polímero sintético aniônico.

O quadro 5 apresenta os valores codificados do DCCR e os valores utilizados na dosagem de PAC e Polímero. As condições de ensaio do ponto central foram determinadas a partir de pré-ensaios associados à pesquisa bibliográfica com valores reportados em bibliografia (SANGHI et al., 2006; Pioltine e Reali, 2011; CHOO et al., 2007 apud VERMA et al., 2012; Quartaroli et al., 2014).

Ensaio	Valores codificados do DCCR		(x1) Dosagem de PAC (mL.L ⁻¹)	(x2) Dosagem de Polímero (mg.L ⁻¹)
	x1	x2		
1	-1	-1	0,5	6,34
2	1	-1	1,0	6,34
3	-1	1	0,5	10,86
4	1	1	1,0	10,86
5	-1,4142	0	0,4	8,60
6	1,4142	0	1,1	8,60
7	0	-1,4142	0,75	5,43
8	0	1,4142	0,75	11,77
9	0	0	0,75	8,60
10	0	0	0,75	8,60
11	0	0	0,75	8,60
12	0	0	0,75	8,60

Quadro 5 - Valores codificados do DCCR, valores utilizados na dosagem de PAC e Polímero
Fonte: Autoria própria.

O roteiro dos ensaios pode ser visualizado na Figura 6.

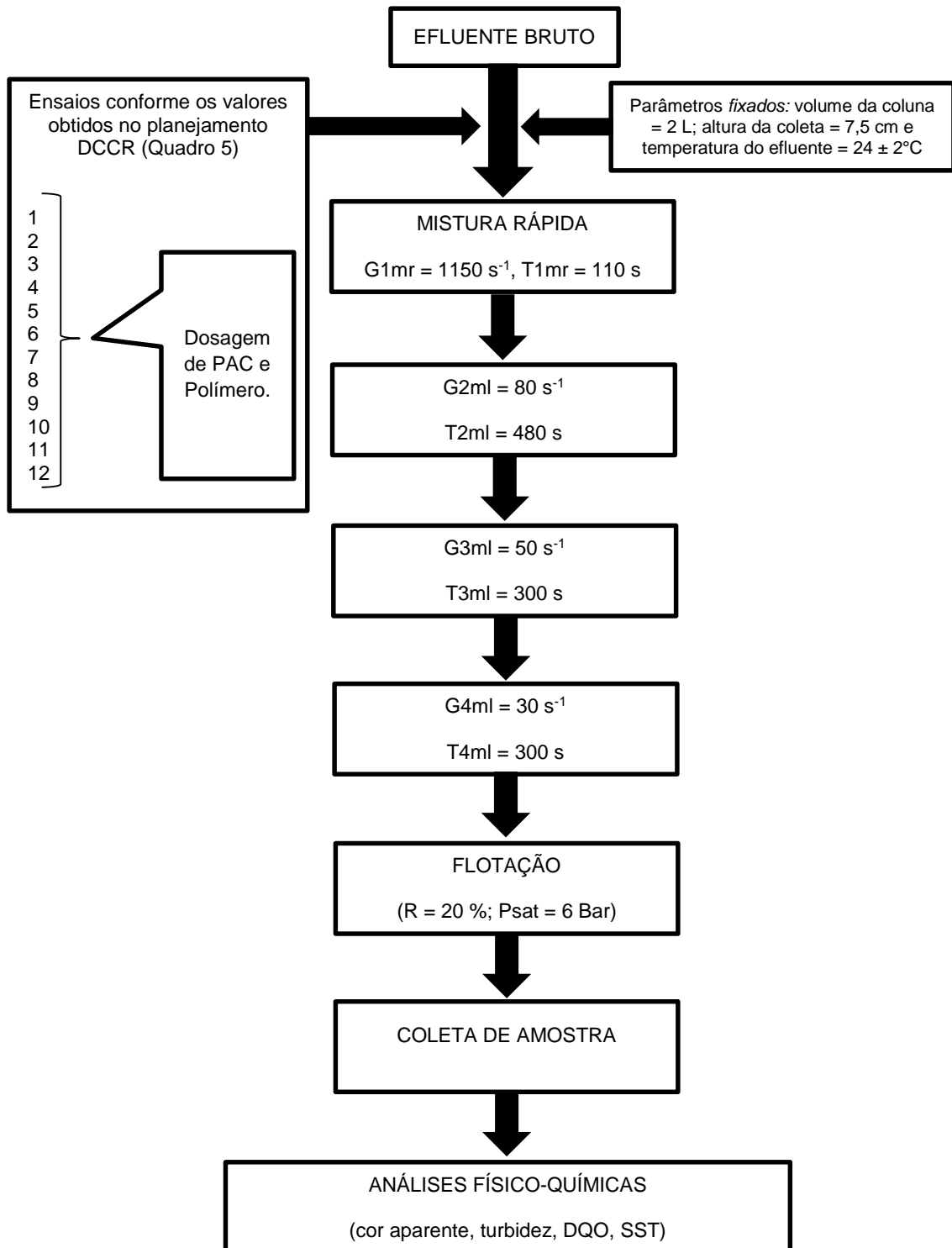


Figura 6 - Procedimentos dos ensaios com flotatestes no processo 3
Fonte: Autoria própria.

2.5.3.3 Processo 4 - Utilização de Semente de Moringa Oleífera

Foram realizados ensaios com o objetivo de otimizar o processo de FAD pelo mecanismo de coagulação e floculação provocado pelas proteínas existentes na polpa da Moringa Oleífera, a qual assemelha-se ao mecanismo provocado pelos polieletrólitos.

Para a preparação da solução padrão de 10 g.L⁻¹ da semente de moringa foram realizados os seguintes processos:

I - descascar as sementes e secar por seis horas em estufa, à 70°C.

II – triturar em moinho as sementes secas até formarem um pó fino. Em seguida foram peneiradas para a seleção de grânulos (0,5 mm). O pó resultante desse processo foi pesado em balança analítica resultando um peso de 10 g.

III - Por último, foi preparada a solução padrão, em que foi adicionado 1 litro de água destilada aos 10 g de pó de semente de moringa com agitação por uso de agitador magnético.

O quadro 6 apresenta os valores codificados do DCCR e os valores utilizados na dosagem de moringa e pH do efluente. As condições de ensaio do ponto central foram determinadas a partir de pré-ensaios associados à pesquisa bibliográfica com valores reportados em bibliografia (Heredia et al., 2009; Pritchard et al., 2010; Ströher et al., 2012; Veeramalini et al., 2012; Ströher et al., 2013).

Ensaio	Valores codificados do DCCR		(x1) Dosagem de Moringa (mg.L ⁻¹)	(x2) pH efluente
	x1	x2		
1	-1	-1	129,3	5,6
2	1	-1	270,7	5,6
3	-1	1	129,3	8,4
4	1	1	270,7	8,4
5	-1,4142	0	100	7,0
6	1,4142	0	300	7,0
7	0	-1,4142	200	5,0
8	0	1,4142	200	9,0
9	0	0	200	7,0

Ensaio	Valores codificados do DCCR		(x1) Dosagem de Moringa (mg.L ⁻¹)	(x2) pH efluente
	x1	x2		
10	0	0	200	7,0
11	0	0	200	7,0
12	0	0	200	7,0

Quadro 6 - Valores codificados do DCCR, valores utilizados na dosagem de moringa e pH efluente
Fonte: Autoria própria.

O roteiro do ensaio é demonstrado na Figura 7.

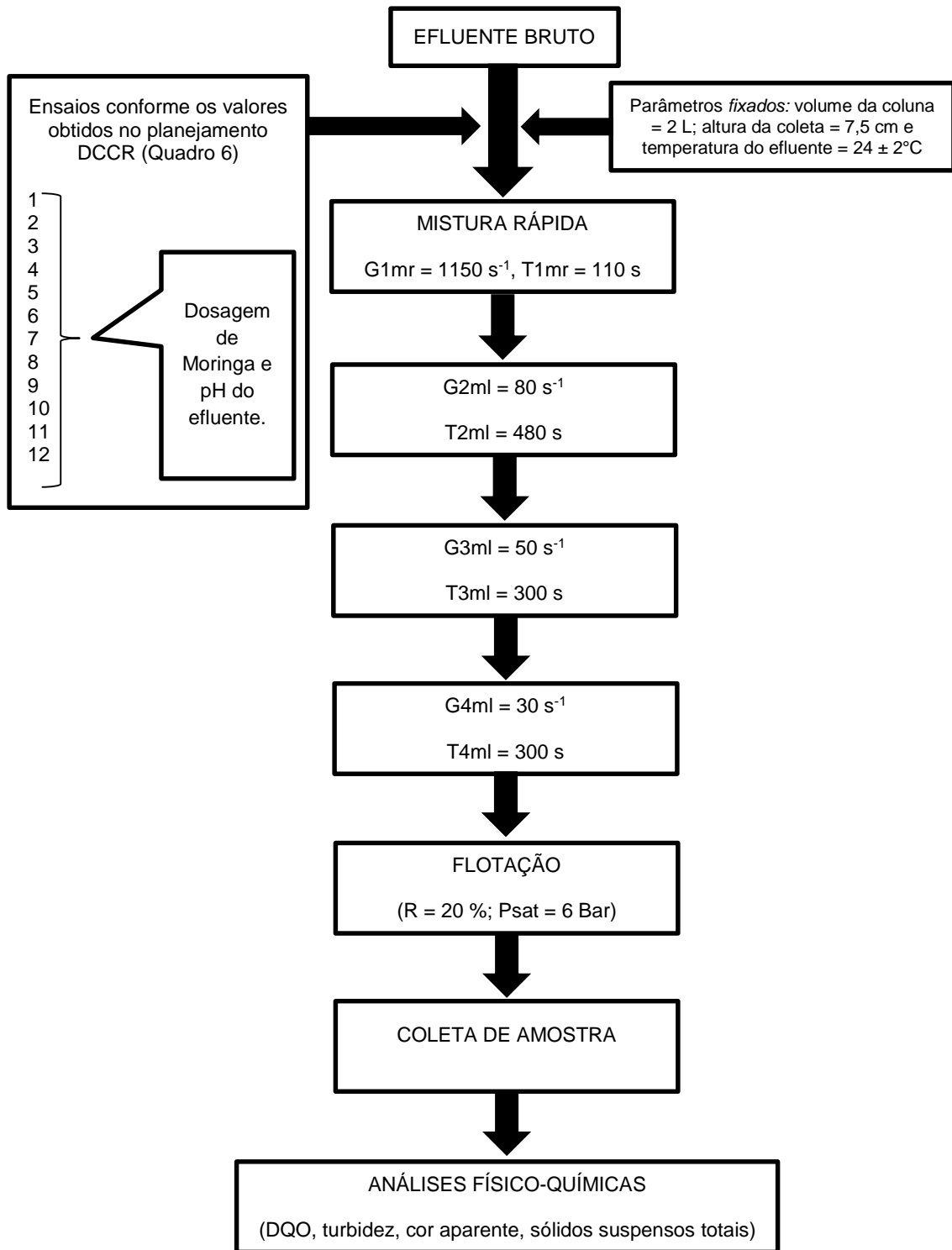


Figura 7 - Procedimentos dos ensaios com flotatestes no processo 4
Fonte: Autoria própria.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Nessa seção serão apresentados os conceitos, teorias e pesquisas mais relevantes para o desenvolvimento desta pesquisa. São abordados primeiramente temas ligados à indústria têxtil, como o ramo da indústria têxtil, a água, os corantes e os produtos químicos auxiliares utilizados no processo têxtil. Em seguida são relatados processos de tratamentos de efluente têxtil, como os eletroquímicos, os físico-químicos (coagulação e floculação) e de flotação por ar dissolvido. Por último são expostas pesquisas sobre os coagulantes e floculantes utilizados: o tanino, PAC, polímero aniônico e moringa *oleífera*.

3.1 INDÚSTRIA TÊXTIL

O ramo têxtil é um dos maiores setores industriais do mundo, tanto em volume de produção quanto em quantidade de funcionários. As plantas fabris vão desde a produção artesanal até plantas altamente automatizadas, mas todas elas se caracterizam como grandes consumidoras de recursos, tais como: água, corantes e produtos químicos (SANIN, 1996).

As operações de limpeza, tingimento e acabamento na indústria têxtil geram volumes grandes de efluentes. Assim, um dos maiores desafios enfrentados pela indústria estão relacionados com a recirculação desses descartes e recuperação dos produtos químicos e subprodutos, com o objetivo de reduzir custos com tratamento dos efluentes. O processo de descoloração dos efluentes do tingimento permite sua reutilização em outros processos, como em enxágues, limpezas ou novos tingimentos, resultando em economia do consumo de água (LOPEZ et al., 2000).

Nas operações de tingimento têxtil, normalmente o efluente resultante possui uma cor muito intensa e pode conter metais pesados em alta concentração (KOUBA et al., 1994). Por apresentar tais características, o efluente têxtil é considerado por vários autores (Baughman et al., 1988; Sanin, 1996; Willmott et al., 1998; Karcher et al., 1999; Lee et al., 1999; Guarantini et al., 2000; Nigam et al., 2000; Tanaka et al.,

2000; Martín et al., 2010; Pritchard et al., 2010) de difícil tratamento, em função do seu alto grau de não biodegradabilidade. A não biodegradabilidade está relacionada com o alto teor de corantes, aditivos e surfactantes, os quais na grande maioria são compostos orgânicos de estrutura complexa (BALAN, 2001). Parte desta carga de contaminantes é composta por impurezas próprias da matéria prima, de produtos auxiliares dos processos de fiação e tecelagem, bem como dos corantes e auxiliares utilizados no tingimento durante a etapa de acabamento.

O efluente têxtil residual, além da alta coloração, apresenta outros produtos em sua composição. Este fato torna muito complexo a determinação de cada um desses compostos individualmente. Sendo assim, é recomendado utilizar alguns parâmetros globais para análise do sistema de tratamento.

Os parâmetros globais mais importantes para as substâncias orgânicas são o COT (carbono orgânico total), a DBO (demanda bioquímica de oxigênio) e a DQO (demanda química de oxigênio) (SANIN, 1996). Os valores destes parâmetros diferem muito de uma planta fabril para outra, tendo apenas a finalidade de expor a ordem de grandeza das particularidades do efluente.

3.1.1 A água na indústria têxtil

A água na indústria têxtil serve como meio de transporte para os produtos químicos que participam do processo, bem como, na lavagem para a remoção dos excessos de produtos considerados indesejáveis.

O setor busca medidas mais eficazes para o tratamento de efluentes, optando por tecnologias que permitam o reúso do efluente tratado no processo de produção, ou os produtos contidos no efluente.

Por causa da variedade de fibras, corantes e produtos de acabamento em uso, os efluentes resultantes são de grande complexidade e diversidade química. Assim, o efluente têxtil é caracterizado pela alta concentração de substâncias químicas, corantes e pigmentos (CHANG et al., 1994). Estes corantes quando lançados nos corpos receptores podem causar uma acentuada mudança de coloração, sendo facilmente detectada (GUARATINI et al., 2000).

Na Resolução N° 430 de 2011 da CONAMA, o artigo 12, expõe que:

“O lançamento de efluentes em corpos de água, com exceção daqueles enquadrados na classe especial, não poderá exceder as condições e padrões de qualidade de água estabelecidos para as respectivas classes, nas condições da vazão de referência ou volume disponível, além de atender outras exigências aplicáveis”.

Para o lançamento de efluentes nos corpos de água, por exemplo, observa-se a Resolução do CONAMA N° 357 de 2005, artigo 14 (apresenta as condições e padrões das águas doces de classe 1), art. 15 (condições e padrões das águas doces de classe 2) e a Resolução N° 430 de 2011, art. 16 (onde expressa que os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente no corpo receptor desde que obedeçam as condições e padrões previstos neste artigo, resguardadas outras exigências cabíveis). São apresentados a seguir os itens mais relevantes para o presente estudo dos artigos 14 e 15 da resolução N° 357 e o art. 16 da resolução N° 430.

Artigo 14 (CONAMA 357, 2005)

I - condições de qualidade de água

- Materiais flutuantes, inclusive espumas não naturais: virtualmente ausentes;
- Óleos e graxas: virtualmente ausentes;
- Substâncias que comuniquem gosto ou odor: virtualmente ausentes;
- Corantes provenientes de fontes antrópicas: virtualmente ausentes;
- Resíduos sólidos objetáveis: virtualmente ausentes;
- DBO 5 dias a 20°C até 3 mg.L⁻¹ O²;
- Turbidez até 40 unidades nefelométrica de turbidez (UNT);
- Cor verdadeira: nível de cor natural do corpo de água em mg Pt/L;
- PH: 6,0 a 9,0;
- Sólidos dissolvidos totais: 500 mg.L⁻¹.

Artigo 15 - Aplicam-se às águas doces de classe 2 as condições e padrões da classe 1 previstos no artigo anterior, à exceção do seguinte: (CONAMA 357, 2005)

- Não será permitida a presença de corantes provenientes de fontes antrópicas que não sejam removíveis por processo de coagulação, sedimentação e filtração convencionais;
- Cor verdadeira: até 75 mg Pt/L;
- Turbidez: até 100 UNT;
- DBO 5 dias a 20°C até 5 mg.L⁻¹ O²;

Artigo 16 (CONAMA 430, 2011)

I - condições de lançamento de efluentes

- pH entre 5 a 9;
- Temperatura: inferior a 40°C, sendo que a variação de temperatura do corpo receptor não deverá exceder a 3°C no limite da zona de mistura;
- Materiais sedimentáveis: até 1 mL/L em teste de 1 hora em cone Imhoff. Para o lançamento em lagos e lagoas, cuja velocidade de circulação seja praticamente nula, os materiais sedimentáveis deverão estar virtualmente ausentes;
- Ausência de materiais flutuantes; e
- Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO 5 dias a 20°C): remoção mínima de 60% de DBO sendo que este limite só poderá ser reduzido no caso de existência de estudo de autodepuração do corpo hídrico que comprove atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor;

Os corantes residuais ligados aos produtos auxiliares químicos orgânicos e inorgânicos são responsáveis pela cor, sólidos dissolvidos, DQO e DBO dos efluentes. Dessa forma, as características do efluente resultante são dependentes da classe do corante empregado, do tipo de fibra, fio, tecido e também da tecnologia de tingimento.

3.1.2 Corantes

Normalmente os corantes são considerados como os compostos mais problemáticos em efluentes têxteis por serem de difícil remoção, terem alta solubilidade e possuírem baixa biodegradabilidade (LEE et al., 1999). Mesmo em baixas concentrações, a presença de corantes no efluente é extremamente visível e indesejável (NIGAM et al., 2000). A grande parte dos corantes é resistente à descoloração, à exposição à luz, à água e a outros produtos químicos por causa de sua estrutura complexa e de sua origem sintética.

O tipo de fibra têxtil determinará a característica do corante a ser utilizado na indústria. A adsorção e a retenção dos corantes dentro da fibra podem ser por processos químicos, físicos ou ambos.

A estrutura química dos corantes possuem dois grupos principais: o grupo cromóforo, responsável pela cor que absorve luz solar e o grupo funcional que permite a fixação nas fibras do tecido (DURÁN et al., 2000).

A fixação da molécula do corante nas fibras normalmente é feita em solução aquosa e pode envolver quatro tipos de interações: ligação iônica, ligação covalente, ligação de hidrogênio e interações de van der Waals.

A classificação do corante é realizada de acordo com sua estrutura química (antraquinona, azo, entre outros) ou de acordo com o método pelo qual ele é fixado à fibra têxtil (ALCÂNTARA e DALTIM, 1996; GUARANTINI et al., 2000). Os principais grupos de corantes classificados pelo modo de fixação são: reativos, diretos, azoicos, ácidos, a cuba, enxofre, dispersos, pré-metalizados, branqueadores.

Os corantes da classe reativos e ácidos são os que apresentam maiores problemas no tratamento do efluente, pois estes tendem a passar através de sistemas de tratamentos convencionais (WILLMOTT et al., 1998). Os corantes diretos, básicos, ácidos e pré-metalizados, são absorvidos pelo lodo ativado criando problemas posteriores na deposição do lodo (SANIN, 1996). Ainda, outras classes podem ser carcinogênicos, como por exemplo, os corantes derivados do benzeno e outros compostos aromáticos (BAUGHMAN et al., 1988).

3.1.3 Produtos químicos auxiliares

No acabamento têxtil são utilizados distintos produtos com a finalidade de conferir as propriedades necessárias tais como: peso, toque, recuperação da ruga, vinco permanente, impermeabilidade, fungicida, antitraça, antiestática, antiencolhimento, antichama (ARAÚJO e CASTRO, 1987).

Nas operações de tingimento podem ser utilizados diversos produtos químicos: ácidos (sulfúrico, clorídrico, fórmico, acético); bases (hidróxido de sódio, hidróxido de potássio, carbonato de sódio, amônia); sais (silicato de sódio, cloreto de sódio, polifosfatos, bórax, fosfato de amônia, cloreto de amônia, magnésio, alumínio, zinco); oxidantes (peróxido de hidrogênio); redutores (hidrossulfito); solventes orgânicos (tetracloroetileno, metanol, etanol); produtos orgânicos diversos (formaldeído, uréia) (PERES e ABRAHÃO; 1998). No quadro 7 são expostos os produtos químicos habitualmente usados nas operações de tingimento de tecidos.

Produtos	Composição	Função
Sais	Cloreto de sódio Sulfato de sódio	Retardante
Ácidos	Acético ou sulfúrico	Controle de pH
Bases	Hidróxido de sódio Carbonato de sódio	Controle de pH
Sequestrantes	EDTA	Sequestrante
Dispersantes e Surfactantes	Aniônicos, catiônicos e não iônicos	Amaciante, dispersante de corante
Agentes oxidantes	Peróxido de hidrogênio Nitrito de sódio	Insolubilizante de corante
Agentes redutores	Hidrossulfito de sódio Sulfeto de sódio	Remoção de corantes não reagidos, solubilizantes
Carregadores	Bifenilos, dimetil ésteres, ácidos tereftálico e ftalamidas	Aumenta a absorção

Quadro 7 - Produtos químicos auxiliares usados no tingimento de tecidos

Fonte: Peres e Abrahão (1998).

3.2 TRATAMENTO DE EFLUENTE TÊXTIL

Existem diversos tipos de tratamento e para cada situação para atender a legislação vigente e obter a melhor relação custo x benefício (BRAILE, 1979; PERES e ABRAHÃO, 1998; LORA, 2002).

Os processos de tratamento mais comumente utilizados podem ser classificados em:

- Processos Físicos: empregados para remover sólidos em suspensão, areias, óleos e gorduras (BRAILE, 1979; LORA, 2002). Neste processo geralmente são utilizados os equipamentos: grades, peneira, caixa de areia e decantadores.
- Processos Químicos: utilizados para remover material coloidal, cor, turbidez, odor, óleos e metais pesados, bem como, para neutralizar ácidos ou álcalis (BRAILE, 1979; LORA, 2002). Os processos químicos mais empregados são: floculação, precipitação, cloração, e correção do pH.
- Processos Biológicos: processos em que o tratamento de efluentes depende da ação de microorganismos para sua depuração. O processo de depuração biológica ocorre por processos de respiração ou fermentação, transformando componentes complexos em compostos simples, tais como sais minerais e gás carbônico (BRAILE, 1979). Os processos biológicos de tratamento de efluentes são dependentes de vários fatores, como por exemplo, pela escolha ou adaptação dos microorganismos que irão compor a cultura, do substrato (efluente) e do estabelecimento das condições ótimas de operação.

Os processos químicos para a remoção de cor do efluente têxtil são baseados na reação do corante com alguma substância que o converta em uma substância menos prejudicial ambientalmente. Nos processos físicos os corantes são removidos por meio da retenção deste em algum meio adsorvente ou filtrante. E nos processos biológicos os corantes são oxidados através de bactérias em condições aeróbias ou anaeróbias.

3.2.1 Coagulação e Floculação

Técnica físico-química composta de três fases distintas, coagulação, floculação e separação de líquidos e sólidos. A coagulação é obtida mediante o uso de hidróxido de sódio e sais metálicos polivalentes como o sulfato férrico, cloreto férrico e sulfato de alumínio. O hidróxido reage com o sal metálico para formar um hidróxido insolúvel, volumoso, sobre o qual se adsorve a cor.

No processo de coagulação é adicionado uma substância química formadora de flocos (coagulantes) no efluente, com a finalidade de se agregarem ou combinar com a matéria em suspensão e com a matéria coloidal formando agregados de partículas em suspensão. Apesar de serem solúveis, os coagulantes se precipitam após reagir com outras substâncias do meio (JORDÃO e PESSOA, 1995). Na coagulação as cargas elétricas das partículas em suspensão são neutralizadas por meio da adição de compostos químicos com cargas positivas, como sais de ferro, sais de alumínio e polímeros (SANTOS et al., 2007).

A utilização do sal de alumínio ou de ferro na coagulação resulta dois fenômenos: o primeiro químico, consiste na reação do coagulante com a água formando espécies hidrolisadas com carga positiva, dependendo da concentração do metal e pH final da solução; o segundo físico, consiste no transporte das espécies hidrolisadas para que haja contato com as impurezas presentes na água (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

As partículas coloidais, as substâncias húmicas e os microrganismos geralmente tem carga negativa na água, e as partículas coloidais podem ter polímeros adsorvidos em sua superfície, impedindo a aproximação das mesmas. Por isso a importância de alterar a força iônica do meio, o que, em tratamento de água é realizado com a adição de sais de alumínio ou de ferro, polímeros sintéticos ou taninos vegetais catiônicos, caracterizando o fenômeno da coagulação (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

O efeito do processo de coagulação depende da valência do íon carregado de carga elétrica contrária a carga das partículas coloidais. Para esse efeito, quanto maior a valência do íon maior será a sua capacidade de coagulação, o que justifica a

utilização de íons de alta valência como o Al^{3+} e o Fe^{3+} como agentes de coagulação dos sistemas coloidais (DI BERNARDO e DANTAS, 2005; CPRH, 2001).

3.2.1.1 Mecanismos de coagulação

Considera a coagulação como o resultado individual ou combinado da ação de quatro mecanismos distintos: a) compressão da camada dupla elétrica, b) adsorção e neutralização, c) varredura, d) adsorção e formação de pontes.

a) Compressão da camada dupla elétrica

A pesquisa de Di Bernardo e Dantas (2005) apresenta um estudo realizado por volta de 1900, que mostra que a desestabilização de um colóide por um eletrólito indiferente ocorre devido a interações eletrostáticas (íons de mesma carga são repelidos e íons de cargas opostas são atraídos pelos colóides), sendo assim, quanto maior a carga do íon positivo, menor a quantidade de produto requerida para a coagulação. Introduzindo um composto com certa quantidade de carga em um sistema coloidal, ocorre um aumento na densidade de carga na camada difusa ocasionando a diminuição da “esfera” de influência das partículas, causando a coagulação por compressão da dupla camada difusa (DI BERNARDO e DANTAS, 2005). Importante mencionar que a quantidade de eletrólitos necessários para ocorrer a coagulação é independente da concentração de colóides no efluente e também que não é possível a reversão da carga dos colóides (SPINELLI, 2001).

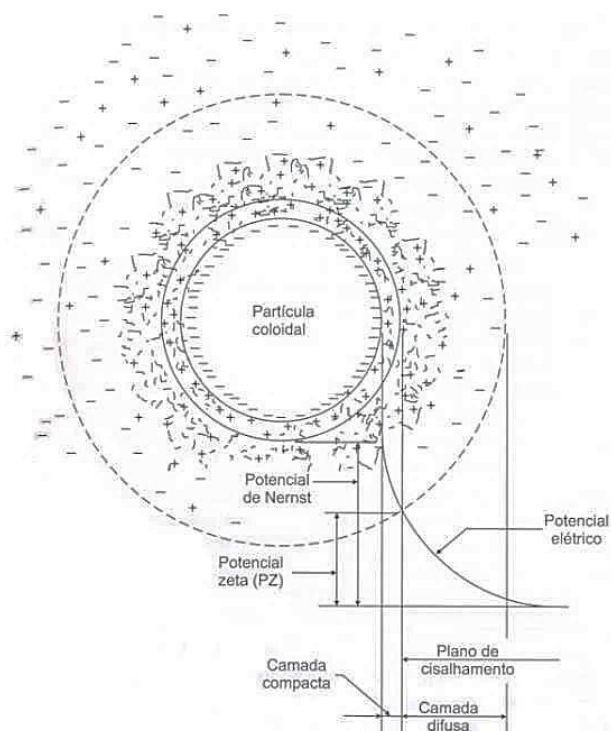


Figura 8 - Representação do potencial zeta e da dupla camada elétrica de uma partícula coloidal presente em águas industriais
 Fonte: DI BERNARDO e DANTAS (2005).

b) Adsorção e neutralização de carga

A desestabilização de uma dispersão coloidal consiste nas interações entre coagulante-colóide, coagulante-solvente e colóide-solvente (DI BERNARDO e DANTAS, 2005). Devido à capacidade das partículas coloidais adsorverem algumas espécies, sendo estas de carga contrária à superfície dos colóides, ocorre a desestabilização da partícula. As dosagens de coagulantes para a desestabilização é bem inferior às do mecanismo de dupla camada (PAVANELLI, 2001).

c) Varredura

Quando o coagulante é adicionado em quantidade significativa, dependendo do pH de mistura, poderá ocorrer a formação de precipitados como o $\text{Al}(\text{OH})_3$ ou $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Devido à presença de cargas estes se ligam às partículas coloidais e formam flocos maiores que podem sedimentar ou flotar com maior facilidade que os flocos obtidos no mecanismo de adsorção e neutralização de cargas (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

Conforme estudos de Arboleda (1992) o mecanismo de varredura acontece quando a dosagem de coagulante é alta excedendo o limite de solubilidade deste na

água. Os hidróxidos formados pelas reações do coagulante metálico com a alcalinidade da água se precipitam envolvendo as partículas suspensas e os coloides.

O mecanismo de varredura está sendo utilizada em estações de tratamento de água, sendo esta com floculação/sedimentação antecedendo à filtração. Os flocos constituídos são maiores do que os formados pela adsorção e neutralização de cargas, o que resulta em uma sedimentação com velocidade maior (PAVANELLI, 2001).

d) Adsorção e formação de pontes

Este mecanismo é caracterizado pelo uso de polímeros de grandes cadeias moleculares que podem ser sintéticos ou naturais, que apresentam sítios ao longo de sua cadeia, servindo de ponte entre a superfície à qual estão aderidos e a outras partículas. O comportamento de polieletrólitos como, por exemplo, os coagulantes é explicado baseado na adsorção à superfície de partículas coloidais, seguida da redução da carga ou pelo entrelaçamento das partículas nas cadeias orgânicas (MENDES, 1989).

Os polímeros usados agem como floculantes ou auxiliares de floculação e tem como vantagens a melhoria da qualidade da água decantada e filtrada, redução no consumo de coagulante primário, redução dos gastos totais com produtos químicos, redução no volume de lodo no decantador, aumento do período médio entre lavagens consecutivas dos filtros, aumento da eficiência de desinfecção, como consequência da redução da concentração de sólidos suspensos na água filtrada (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

Os polieletrólitos são classificados, de acordo com a origem, podendo ser naturais ou sintéticos. Os naturais são produtos derivados do amido (DI BERNARDO e DANTAS, 2005); e os sintéticos são polímeros de cadeia longa e alto peso molecular (METCALF e EDDY, 2003). Os polieletrólitos também são divididos de acordo com a sua carga. Quando positiva é chamado de catiônico, se negativa aniônico e quando não possui carga não iônico (AZEVEDO NETTO et al., 1979; ECKENFELDER, 1989; METCALF e EDDY, 2003).

Os polímeros sintéticos e naturais têm sido empregados como auxiliares de coagulação, floculação ou filtração. Na coagulação, usam-se os polímeros

catiônicos, que permite em muitas situações, reduzir consideravelmente a dosagem do coagulante primário quando este é um sal de alumínio ou de ferro. Na floculação, os polímeros são aplicados com a finalidade de aumentar a velocidade de sedimentação dos flocos, diminuir a ação das forças de cisalhamento nos flocos durante a veiculação da água floculada e reduzir a dosagem de coagulante primário. Na filtração, os polímeros reduzem a probabilidade de ocorrência do transpasse e permite que sejam empregadas taxas de filtração maiores que as tradicionais (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

3.2.2 Sistemas eletroquímicos

A eletrocoagulação é uma técnica que envolve a geração de coagulantes “in situ” pela dissolução de íons, como por exemplo, o ferro ou alumínio a partir de eletrodos pela ação da corrente elétrica. A geração de íons metálicos ocorre no anodo e o gás hidrogênio surge no cátodo. As interações dentro de um reator de eletrocoagulação / eletrofloculação / eletroflotação são demonstradas na Figura 9.

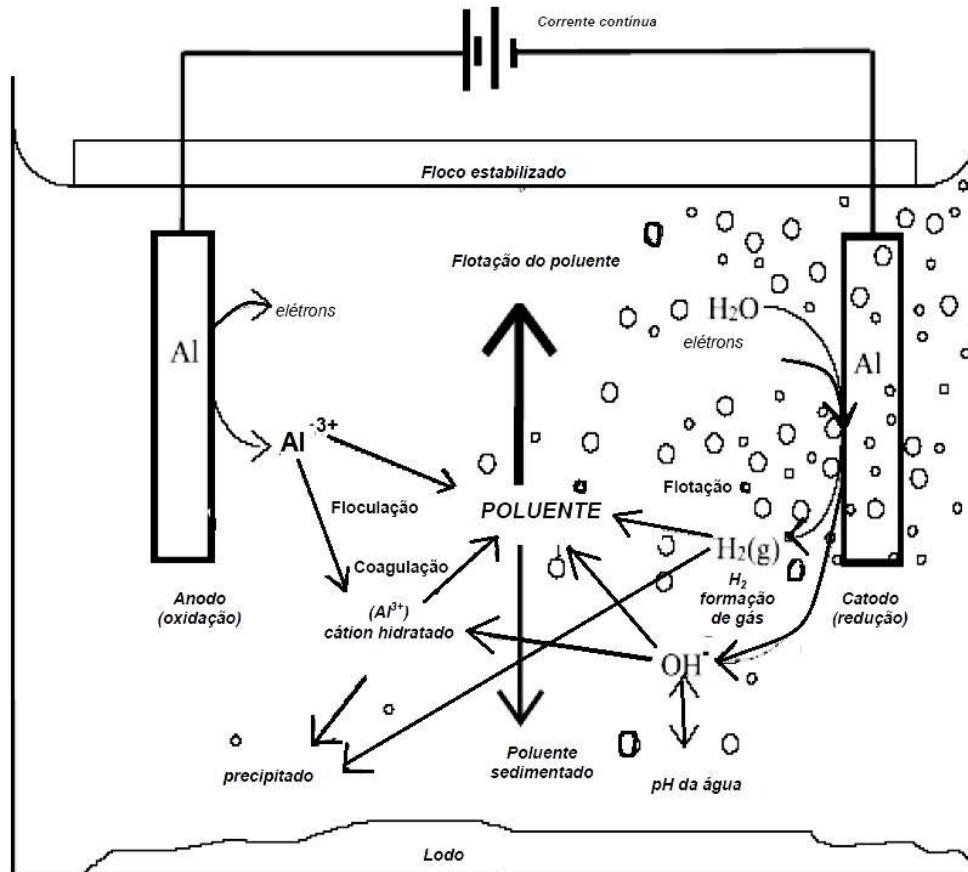


Figura 9 - Interações dentro de um reator de eletrocoagulação / eletrofloculação / eletroflotação
 Fonte: HOLT et al. (2002).

Os fenômenos envolvidos nos processos eletrolíticos de tratamento de efluentes acontecem em três estágios sucessivos de operação: (MOLLAH et al., 2001; HOLT et al., 2002).

- Eletrocoagulação, fase em que há formação de um agente coagulante através da oxidação eletrolítica do eletrodo de sacrifício promovendo a neutralização das cargas superficiais, a desestabilização das partículas coloidais e a quebra de emulsões;
- Eletrofloculação, etapa a qual ocorre à aglutinação das partículas desestabilizadas pelos hidróxidos do eletrodo de sacrifício, que são coagulantes naturais que favorecem a formação e o crescimento dos flocos;
- Eletroflotação, etapa em que há geração de micro bolhas de oxigênio (O_2) no anodo e de hidrogênio (H_2) no cátodo, que sobem à superfície colidindo e sendo adsorvidas pelos flocos, carreando por arraste as partículas e

impurezas em suspensão no meio e promovendo dessa forma a clarificação do efluente.

A eletrofloculação é altamente dependente da química do meio aquoso, em especial da condutividade. Outras características, tais como: pH, tamanho da partícula e concentrações dos constituintes influenciam também o processo de eletrofloculação (MOLLAH et al., 2001). A escolha do tipo dos materiais dos eletrodos é importante, e geralmente são utilizados alumínio e ferro, pois possuem baixo custo, são eficazes e de fácil obtenção.

O reator eletroquímico proposto na literatura pode ser do tipo monopolar ou bipolar, todavia, o mais utilizado é o reator monopolar (MOLLAH, et al., 2001). Um reator monopolar em sua configuração mais simples é composto por uma célula eletrolítica com um anodo e um cátodo. Quando conectado a uma fonte de potencial externa, o ânodo sofre corrosão devido a oxidação e no cátodo incide reações de redução.

Os eletrodos designados ao tratamento de efluentes geralmente são eletrodos constituídos por materiais idênticos, e esse fator se deve às seguintes razões: eletrodos iguais, feitos de mesmo material, têm o mesmo potencial, já eletrodos de diferentes materiais implicam na utilização de materiais diferentes, o que pode tornar o custo do reator mais elevado; eletrodos iguais sofrem desgastes uniformes, o que simplifica as intervenções de substituição dos mesmos (MOLLAH, et al., 2001).

Conforme explana Hosny (1996), existem vários fatores que podem influenciar o tamanho das bolhas (gases hidrogênio e oxigênio), tais como a temperatura, a densidade de corrente, e curvatura da superfície do eletrodo, entretanto os maiores efeitos ocorrem pelo material do eletrodo e o pH do meio. A eletroquímica aplicada ao tratamento de efluentes depende de alguns parâmetros, como: a) potência do reator, b) consumo de energia elétrica, c) condutividade, d) pH, e) distância entre os eletrodos, f) temperatura, g) passivação e polarização dos eletrodos, h) inversão de polaridade (HOSNY, 1996; WIENDL, 1998; MOLLAH et al., 2001; CHEN, 2004; CRESPILO e REZENDE, 2004; GAO et al., 2005; CERQUEIRA, 2006; DANESHVAR et al. 2006).

a) Potência do reator

Ao aplicar uma diferença de potencial (ddp) entre dois eletrodos imersos em uma solução eletrolítica, reações eletroquímicas de oxidação e redução ocorrem no ânodo e no cátodo, concomitantemente. Estas reações são controladas por fenômenos associados à eletrólise, que, dependem da ddp aplicada. Por meio das leis estabelecidas por Faraday, o consumo de elétrons está associado à quantidade total de substâncias reagentes. Na eletrocoagulação, está relacionado ao desgaste do eletrodo no processo de geração do agente coagulante. Denota que a formação do alumínio na solução está relacionada à carga, que, pode ser controlada pela corrente. Teoricamente a corrente medida no processo de eletrocoagulação é proporcional a quantidade de alumínio carregado ou gerado em solução (CRESPILHO e REZENDE, 2004).

b) Consumo de energia elétrica

Um dos parâmetros que afetam a aplicação de qualquer processo de tratamento de efluente é o custo. Além do alumínio consumido na célula no processo eletroquímico o maior custo operacional é o consumo de energia (GAO et al., 2005).

c) Condutividade

A condutividade do efluente é diretamente proporcional à quantidade de íons condutores presentes na solução. Os íons são os responsáveis pela condução da corrente elétrica e verifica-se que quanto maior for a concentração dos íons no efluente, maior será sua capacidade de condução de corrente elétrica. A condutividade é um fator positivo que permite até mesmo a redução do consumo de energia. (CERQUEIRA, 2006).

Nos estudos de Daneshvar et al. (2006) foi verificado que a eficiência de remoção de cor de corante têxtil ácido permanece quase inalterada na faixa de condutividade de 2 e 26 mS.cm⁻¹, entretanto com o aumento da condutividade foi verificado que o consumo de energia elétrica foi consideravelmente reduzida.

Na tabela 1 é demonstrada a condutividade do efluente têxtil de alguns estudos. Os autores (Cerqueira, 2006; Huitle et al., 2012; Raghu e Basha, 2007; Zaroual et al., 2006; Daneshvar et al., 2006; Henriques, 2004; Merzouk et al., 2011)

consideram que o valor da condutividade do efluente que eles utilizaram em suas pesquisas são relativamente alta.

Tabela 1 - Condutividade do efluente têxtil

Pesquisador	Condutividade do efluente têxtil (mS.cm ⁻¹)
Cerqueira (2006)	2,65 a 4,61
Huitle et al. (2012)	2,70
Raghu e Basha (2007)	5,20
Zaroual et al. (2006)	42,6
Daneshvar et al. (2006)	8,00
Henriques (2004)	3,70
Merzouk et al. (2011)	2,40 a 2,80

Fonte: Autoria própria.

d) pH

Uma das vantagens da eletrofloculação é a capacidade de neutralizar o pH do efluente, caso este esteja abaixo ou acima de 7. Nos efluentes ácidos, a eletrofloculação tende a subir o valor do pH em decorrência da redução de hidrogênio no cátodo. Outras reações que participam do equilíbrio são: hidrólise do alumínio, a formação de oxigênio no ânodo, a liberação de CO₂ (pelo borbulhamento de hidrogênio no cátodo) e a formação de outros hidróxidos insolúveis (MOLLAH et al., 2001).

Nos estudos de Chen (2004) foi verificado que o efeito do pH da solução na eletrofloculação reflete na eficiência da corrente, bem como a solubilidade de hidróxidos metálicos. Com o pH neutro a potência consumida é mais alta, do que em condições ácidas ou alcalinas devido à variação da condutividade. Foi analisado também que quando a condutividade é alta o efeito do pH não é significativo.

e) Distância entre os eletrodos

A distância entre os eletrodos influencia na ddp a ser aplicada, em que, maior distância representa maior ddp aplicada. Esse efeito ocorre porque a solução possui resistividade à passagem de corrente elétrica. Assim a distância entre os eletrodos pode ser alterada para melhor a eficiência do processo, conforme as características do efluente. Como por exemplo, as distâncias maiores são utilizadas

quando a condutividade do efluente for alta, e no caso contrário, a distância deve ser a menor possível. (CRESPILHO e REZENDE 2004).

Na tabela 2 é demonstrada a distância utilizada entre os eletrodos do processo eletroquímico para tratamento de efluente têxtil de alguns estudos.

Tabela 2 - Distância entre os eletrodos

Pesquisador	Distância entre os eletrodos (cm)
Cerqueira (2006)	0,50 a 1,50
Huitle et al. (2012)	1,00
Daneshvar et al. (2006)	1,50
Henriques (2004)	3,50
Merzouk et al. (2011)	2,00

Fonte: Autoria própria.

f) Temperatura

A temperatura é também um fator importante, visto que esta tem efeito sobre as reações químicas podendo acelera-as ou desacelera-as. De acordo com os estudos de Chen (2004), o efeito da temperatura no processo eletroquímico tem sido pouco pesquisado e é relatado que estudos para tratamento de água foram realizados na Rússia evidenciando que a eficiência de remoção para o eletrodo de alumínio aumenta com a temperatura até o limite de 60°C, em que a partir desse valor, a eficiência diminui.

g) Passivação e polarização dos eletrodos

Ocorre quando a superfície do eletrodo está em contato com o ar, formando em sua superfície um filme muito fino de óxido que faz com que o eletrodo não sofra corrosão com facilidade. Há essa camada de óxido é denominada de filme passivo. Durante o processo de eletrólise, na região próxima ao cátodo há excesso de OH⁻, permitindo que a superfície seja atacada por esses ânions e formando o filme passivo. Formado o filme passivo, o processo eletroquímico pode ser comprometido pela perda de eficiência em consequência do aumento da resistividade do eletrodo (CRESPILHO e REZENDE, 2004).

Nas pesquisas de Wiendl (1998), é proposto que o filme sólido formado nos eletrodos não seja apenas de óxidos, mas também por oxigênio, íons ou moléculas adsorvidas na superfície metálica. Em suas pesquisas utilizando o processo eletrolítico, foi relatado que após cada inversão de polaridade no sistema ocorreu o desprendimento de uma fina película que estava aderida à superfície dos eletrodos.

h) Inversão de polaridade

Na inversão de polaridade, o eletrodo que inicialmente se comportava como cátodo passa a se comportar como ânodo. Conforme estudos de Mollah et al., (2001), a inversão de polaridade proporciona a redução da passivação, e pode aumentar a vida útil do eletrodo em até duas vezes, e também diminui a resistividade do sistema. Durante o processo de inversão a intensidade da corrente elétrica no reator não diminui e o eletrodo passa a liberar mais íons na solução e a formar maior quantidade de grupos hidroxila, aumentando o pH e a eficiência de remoção dos poluentes (CERQUEIRA, 2006).

3.2.2.1 Reações envolvidas no processo de eletrocoagulação

A eletrocoagulação utilizando o eletrodo de alumínio tem sido relatada por vários autores, como por exemplo, Mollah et al. (2001) que em sua pesquisa descreve as reações sofridas pelo alumínio. A dissolução eletrolítica do ânodo de alumínio produz as espécies monoméricas catiônicas, como o Al^{3+} e o $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ a um pH baixo. Com o pH adequado são transformados inicialmente em $\text{Al}(\text{OH})_3$ e finalmente polimerizada para $\text{Al}_n(\text{OH})_{3n}$ de acordo com as reações (1 – oxidação do alumínio sólido, 2 – solvatação do cátion formado, 3 – formação do agente coagulante, 4 – reações secundárias):

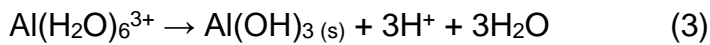
Oxidação do Al sólido (reação anódica)



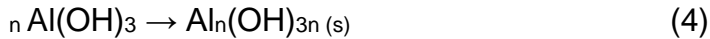
Solvatação do cátion formado



Formação do agente coagulante



Reações secundárias



Dependendo do pH do meio aquoso, outras espécies iônicas, como o $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$ e $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ também podem estar presentes no sistema eletroquímico (Mollah et al., 2001).

Conforme é observado na reação 4, diversos complexos de alumínio podem ser constituídos. A presença destes complexos na solução confere uma característica gelatinosa ao meio. O diagrama de hidrólise do alumínio em função do pH é demonstrado na Figura 10 (CRESPILHO e REZENDE, 2004).

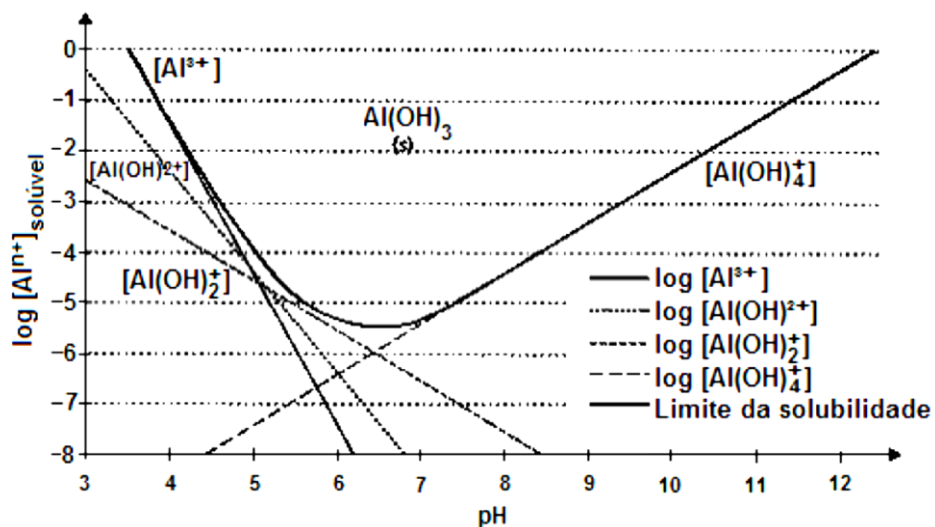


Figura 10 - Hidrólise do alumínio em função do pH
Fonte: CRESPILO e REZENDE (2004).

3.2.2.2 Aplicações da eletrofloculação

Vem aumentando a importância do processo de eletrofloculação devido à sua simplicidade de operação e também pela possibilidade de aplicação em diversos tipos de efluentes.

O processo de eletroquímico possui uma larga gama de aplicações, dentre as quais, tratamento de água potável (SANFAN et al., 1987; VIK et al., 1984), tratamento de esgoto sanitário (WIENDL, 1998), lavanderia (GE, et al., 2004); remoção de águas residuárias de restaurantes (CHEN, et al., 2000); refeitório (XU et al., 2004).

Além destas aplicações o processo pode ser utilizado no tratamento de efluentes industriais, tais como: têxtil (CIARDELLI et al., 2001; KIN et al., 2003; KOBIA et al., 2003; CHEN et al., 2005; CAN et al., 2006; CERQUEIRA, 2006; ZAROUAL et al., 2006), recuperação de corantes (SILVA et al., 2000; PASCHOAL et al., 2005; DANESHVAR et al., 2007; MERZOUK et al., 2011); recuperação de metais (CHEN, 2004); curtume (MURUGANANTHAR et al., 2004); emulsão oleosa (HOSNY, 1996; MOSTEFA et al., 2004); refino de óleo vegetal (ADHOUM et al., 2004; INAN et al., 2004); separação de partículas ultrafinas (MATTESON et al., 1995); remoção de flúor (DRONDINA et al., 1994; SHEN et al., 2003),

Conforme Mollah et al. (2001), as principais vantagens da eletrofloculação são:

- requer equipamentos simples e de fácil operação, em que a corrente e o potencial aplicado, podem ser medidos e controlados de modo automatizado;
- possui melhor controle na liberação do agente coagulante em comparação com os processos físico-químicos convencionais;
- os flocos formados são mais estáveis, podendo ser melhores removidos por uma simples filtração;
- remove as partículas coloidais menores, pois o campo elétrico aplicado promove rapidamente o contato entre elas facilitando a coagulação;
- limita o uso de substâncias químicas, minimizando o impacto negativo causado pelo excesso de xenobióticos lançados no ambiente, fato que acontece quando a coagulação química empregando polieletrólitos é utilizada no tratamento de efluentes;
- as bolhas de gás produzidas durante a eletrólise podem levar o contaminante ao topo do reator, onde pode ser concentrado e removido mais facilmente;
- a célula eletrolítica é eletricamente controlada, não necessitando de dispositivos adicionais, o que requer menos manutenção;

- remoção de óleos e graxas, devido à facilidade de coagulação e flotação das moléculas de óleos e graxas.

Conforme Mollah et al. (2001), as principais desvantagens da eletrofloculação são:

- os eletrodos precisam ser substituídos regularmente, em caso de desgaste ou passivação;
- o consumo de energia elétrica pode ser oneroso em determinadas regiões;
- um filme de óxido impermeável pode ser formado no cátodo, conduzindo à perda de eficiência da unidade;
- demanda alta condutividade do efluente a ser tratado.

Na pesquisa de Silva et al. (2000) foi verificada a viabilidade técnica da aplicação do processo eletrolítico na remoção de cor a partir de corantes têxteis sulfurosos com concentração de 50 mg.L^{-1} . Os eletrodos utilizados nesta pesquisa foram de aço carbono (ABNT 1020) e alumínio. O tempo de eletrólise foi de 20 minutos e a diferença de potencial aplicada foi de 5,0 V. A eficiência de remoção de cor foi de aproximadamente 97% para a solução de corante castanho e de 99% para a solução de corante azul com eletrodos de aço, enquanto que com eletrodos de alumínio, a remoção de cor foi de 96%. Os resultados obtidos pelo autor indicam que o processo eletrolítico, nas condições operacionais estudadas, é uma alternativa tecnicamente viável para a remoção de cor relacionada com corantes sulfurosos.

Ciardelli et al. (2001) tratou efluente têxtil com o parâmetro de qualidade de cor igual a 0,259 (absorbância-420 nm), DQO igual a 194 mg.L^{-1} e pH 7,24. Os parâmetros utilizados para realizar os ensaios foram: eletrodos de ferro, densidade de corrente de 60 A.m^{-2} e vazão de $2 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$. O tratamento eletroquímico obteve uma eficiência na remoção de cor de 84,5% e de DQO de 48%.

O foco da pesquisa Koby et al. (2003) foi o tratamento de efluente têxtil por eletrofloculação utilizando eletrodos de ferro e de alumínio. O efluente têxtil tinha o parâmetro de qualidade de turbidez igual a 5700 UNT, DQO igual a 3422 mg.L^{-1} e pH de 6,95. Os parâmetros utilizados para realizar os ensaios foram: eletrodos de ferro e alumínio, tempo de eletrocoagulação de 10 minutos, pH de 3 a 11, densidade de corrente de 5 a 20 mA.cm^{-2} , distância entre os eletrodos de 1,1 cm e condutividade de 1000 a $4000 \text{ }\mu\text{S.cm}^{-1}$. Os ensaios efetuados com o eletrodo de

ferro apresentaram eficiências de remoção de turbidez no intervalo de 70 a 95% e os ensaios com o eletrodo de alumínio apresentaram eficiências no intervalo de 30 a 95%. Os ensaios efetuados com o eletrodo de ferro apresentaram eficiências de remoção de DQO no intervalo de 20 a 75% e os ensaios com o eletrodo de alumínio apresentaram eficiências no intervalo de 15 a 70%. Os autores verificaram que os eletrodos de sacrifício de alumínio e ferro para tratamentos eletrolíticos são diretamente dependentes do pH. De acordo com os resultados obtidos, em $\text{pH} < 6$, usando o eletrodo de alumínio, tem-se um melhor resultado de remoção de turbidez e DQO. Também foi verificado que a alta condutividade favorece performances elevadas no processo, e que o tempo de operação e densidade de corrente apresentam efeitos semelhantes sobre os desempenhos do processo. Considerando a mesma eficiência de remoção de turbidez e o tempo de operação de 10 minutos, o eletrodo de ferro requer uma densidade de corrente de 80 a 100 A.m^{-2} , enquanto o eletrodo de alumínio precisa de 150 A.m^{-2} .

Cerqueira (2006) realizou o tratamento de efluente têxtil com o parâmetro de qualidade de cor de 0,42 a 0,842 (absorbância-420 nm), turbidez de 8,0 a 75,3 UNT, DQO variando de 1226 a 2553 mg.L^{-1} e pH de 10 a 11,4. Os parâmetros utilizados para realizar os ensaios foram: eletrodos de ferro e alumínio, tempo de eletrólise de 5 a 50 minutos, intensidade de corrente de 0,4 a 5,0 A, pH de 5 a 10 e distância entre os eletrodos de 0,50 a 1,5 cm. Os ensaios efetuados com o eletrodo de alumínio apresentaram 95% de eficiência de remoção de cor, 93% de remoção de turbidez e 70% de eficiência de remoção de DQO nas seguintes condições: tempo de 10 minutos, intensidade de corrente de 3 A, pH de 5 e distância entre os eletrodos de 0,50 cm. Os ensaios efetuados com o eletrodo de ferro apresentaram 95% de eficiência de remoção de cor, 96% de eficiência na remoção de turbidez e 61% de eficiência de remoção de DQO nas seguintes condições: tempo de 10 minutos, intensidade de corrente de 5 A, pH de 7 e distância entre os eletrodos de 0,50 cm. O autor ainda descreve que tanto o pH quanto o tempo de eletrofloculação são determinantes no processo de eletrofloculação.

Nos estudos de Zaroual et al. (2006) foi utilizado o processo de eletrocoagulação para tratar o efluente de indústria têxtil com o parâmetro de qualidade de cor igual 0,286 (absorbância-620 nm), DQO igual 485 mg.L^{-1} e pH 10,6. Os parâmetros utilizados para realizar os ensaios foram: eletrodo de ferro, ddp de

300 a 700 mV, tempo de eletrolise de 1 a 8 minutos. Os resultados demonstram que teve a remoção de 100% de cor e de 84% de DQO, em um processo de 3 minutos, e com o potencial de 600 mV.

Nos estudos de Daneshvar et al. (2007) foi analisada a remoção de cor e DQO do corante têxtil ácido amarelo 23 com concentração de 50 mg.L^{-1} usando o processo de eletrofloculação. Os parâmetros utilizados para realizar os ensaios foram: eletrodo de ferro, densidade de corrente variando entre 25 a 125 A.m^{-2} , tempo de eletrolise de 2 a 6 minutos, distância entre os eletrodos de 0,5 a 3,0 cm e pH no intervalo de 2 a 6. A eficiência de 99% de remoção de cor e 69% de remoção de DQO foi obtida com as seguintes condições: densidade de corrente de $112,5 \text{ A.m}^{-2}$, tempo de 5 minutos e pH 6. A distância entre os eletrodos não influenciou na eficiência de remoção, e sim no consumo de energia de elétrica.

Merzouk et al. (2011) Realizou o tratamento de solução de corante têxtil com concentração de 100 mg.L^{-1} . Os parâmetros utilizados para realizar os ensaios foram: eletrodo de alumínio, densidade de corrente variando entre 40 a 200 A.m^{-2} , tempo de eletrolise de 10 minutos, distância entre os eletrodos de 2,0 cm e pH 7. A eficiência de remoção de cor acima de 93% e turbidez acima de 80% foram obtidas com as seguintes condições: densidade de corrente de 150 A.m^{-2} , tempo de 10 minutos.

3.2.3 Flotação por ar dissolvido

O processo de flotação por ar dissolvido (FAD) surgiu na década de 20 para a recuperação de fibras na indústria do papel. Hoje em dia, é utilizado nas indústrias de papel, processamento de alimentos, petroquímica, unidades de tratamento de água potável, sistemas de espessamento de lodos industriais e municipais, e na indústria mineral para a recuperação de partículas minerais finas (< 13 micrômetros) (SOLARI, 1981; RODRIGUES e RUBIO, 2007).

O mecanismo de FAD forma pequenas bolhas de ar que se aderem às partículas suspensas presentes na água, cuja finalidade é gerar aglomerados com menor densidade que a água, causando a ascensão do floco até a superfície.

No processo FAD, as colunas contendo o efluente que se deseja tratar são interligadas a uma câmara de saturação responsável pelo fornecimento de água pressurizada (saturada com ar). O líquido fica supersaturado e o ar em excesso é liberado sob a forma de pequenas bolhas (microbolhas de 30-70 μm de diâmetro) que aderem à fase em suspensão (partícula ou gotículas), flotando-as para a superfície.

Os sistemas de FAD podem ser classificados de acordo com os métodos de dissolução do ar utilizados: sistemas de compressão total do efluente (em que todo o fluxo de alimentação é submetido à pressão); sistemas de compressão parcial do efluente e sistema de compressão do reciclo de parte do efluente clarificado (SOLARI, 1981).

As microbolhas geradas na FAD ascendem em um fluxo laminar, comportando-se como esferas rígidas e seguindo a lei de Stokes. Alguns exemplos da velocidade de ascensão de distintos diâmetros de bolhas são apresentadas na tabela 3.

Tabela 3 - Velocidades de ascensão para diversos tamanhos de bolhas

Diâmetro médio da bolha (μm)	Velocidade de ascensão (m.h^{-1})
< 20	< 1
50	5
100	20
1000	720

Fonte: SOLARI (1981).

A flotação por ar dissolvido (FAD) tem sido mais empregada nos últimos anos como forma de aumentar a eficiência de sistemas de tratamento em substituição a processos de sedimentação (PIOLTINE e REALI, 2011). Segundo, Edzwald, (2010) o processo de flotação por ar dissolvido é indicado para remoção de turbidez e pequenas partículas sendo, neste caso, mais eficiente do que a sedimentação.

3.2.4 Coagulantes e Floculantes

Para o tratamento de efluentes existem vários tipos de coagulantes e floculantes para os processos de coagulação e floculação. Alguns exemplos que são utilizados neste estudo: o policloreto de alumínio, polímero aniônico, tanino, e sementes de moringa oleífera. O custo desses insumos deve ser considerado em vista da quantidade de efluente gerado.

3.2.4.1 *Tanino*

O tanino é um polímero orgânico catiônico de origem vegetal, com baixa massa molecular, não tóxico e que atua como coagulante / floculante.

São mencionados como moléculas fenólicas biodegradáveis com capacidade de formar complexos com proteínas, macromoléculas e minerais (Castro-Silva et al., 2004), sendo eficientes na remoção de partículas presentes na água.

O tanino é extraído da casca de vegetais como, por exemplo, a Acácia Negra (*Acacia mearnsii*). Atua em sistemas coloidais, em que neutraliza as cargas e forma pontes entre essas partículas, sendo este o processo responsável pela formação dos flocos e a consequente sedimentação. Atualmente, um dos agentes coagulantes orgânicos mais utilizados nos tratamentos de efluentes é o Tanfloc. O Tanfloc é um polímero orgânico catiônico produzido a partir do tanino (TANAC, 2014).

O tanino não altera o pH da água tratada, uma vez que não consome a alcalinidade do meio, e é efetivo na faixa de pH, de 4,5 a 8,0 (MARTINEZ, 1996; MARTINEZ et al., 1997; TANAC, 2014). Ainda que o Brasil seja o país com a maior concentração de árvores tanantes do mundo, (Silva, 1999) poucas empresas são conhecidas por utilizarem taninos na fabricação de produtos voltados para o tratamento de água potável e residual.

De acordo com os estudos de Silva (1999), a vantagem do uso de tanino é que este possui a propriedade de adsorção de metais dissolvidos na água, aglutinando-os por precipitação no meio, o que permite sua remoção. Também permite a redução ou a eliminação da toxicidade existente na água proveniente de fontes contendo cianofíceas ou bactérias clorofiladas. Outra vantagem conferida ao uso deste coagulante orgânico é o fato de ser composto de moléculas biodegradáveis.

Apesar dos benefícios, pesquisa de Castro-Silva et al. (2004) destaca que está biodegradabilidade pode permitir o crescimento exagerado de microrganismos presentes na estação de tratamento. Este crescimento da flora microbiana pode ser útil em sistemas de tratamento de efluentes, porém em sistemas de tratamento de água potável, este fato pode resultar em colmatação dos diferentes compartimentos da estação, refletindo na necessidade de manutenções mais frequentes e elevação no custo do tratamento. Segundo Castro-Silva et al. (2004), o uso de coagulantes orgânicos deve levar em consideração a identificação e o controle dos microrganismos presentes na estação.

Em relação ao lodo gerado no processo de tratamento, Richter e Azevedo (1995) indicam que, o lodo formado pelo uso desse coagulante é relativamente mais denso e fácil de ser desidratado do que o formado pelo sulfato de alumínio, facilitando o manuseio e a disposição do mesmo.

Martín et al. (2010) pesquisou o tratamento de efluente da indústria têxtil (simulado por uma solução de 100 mg.L^{-1} de corante ácido), e de lavanderia (simulado por uma solução de 50 mg.L^{-1} de surfactante aniônico). Os experimentos foram realizados utilizando concentração de $92,2 \text{ mg.L}^{-1}$ do coagulante tanino, pH 7 e temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$. A eficiência de remoção do corante nas águas residuais da indústria têxtil foi de 95% e no caso da lavanderia foi de 80% dos surfactantes. O autor Martín et al. (2010) conclui que o Tanfloc e provavelmente outros floculantes provindos de tanino são agentes recomendáveis para o tratamento de água de superfície e águas residuais industriais ou municipais.

Um estudo sobre a coagulação e floculação de tratamento de efluentes da indústria têxtil, apresentado por Junior et al. (2013), teve como objetivo investigar a otimização dos tempos de coagulação, floculação e sedimentação do coagulante natural Tanino. O efluente tinha o parâmetro de qualidade cor na faixa de 7392 a

31185 UC, turbidez de 1722 a 7902 FTU, DQO de 1410,30 a 6977,60 mg.L⁻¹ e pH entre 7,19 a 7,49. Os ensaios foram realizados com diferentes dosagens de tanino 100, 200, 400, 600, 800 mg.L⁻¹. A concentração ótima de tanino foi de 400 mg.L⁻¹ com um percentual de remoção de cor (99,17%), turbidez (99,65%) e DQO (94,81%).

Na pesquisa de Ströher et al. (2013) foi avaliada a utilização de coagulante natural tanino no tratamento de efluente proveniente de lavagem de jeans. O efluente tinha o parâmetro de qualidade cor igual a 1400 UC, turbidez igual a 375 FAU, DQO 491 mg.L⁻¹ e pH 6,89. Os ensaios foram realizados com diferentes dosagens de tanino 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150 mg.L⁻¹. O ponto ótimo para o coagulante tanino foi obtido com a concentração de coagulante de 100 mg.L⁻¹ alcançando a remoção de cor de 95,2%, turbidez de 98,4% e DQO de 60,5%.

3.2.4.2 Policloreto de alumínio e Polímero Aniônico

O hidroxicloreto de alumínio (HCA) é um coagulante inorgânico catiônico pré-polimerizado, a base de cloreto de polialumínio, também conhecido como PAC (*polyaluminum chloride*). A fórmula química geral é do tipo $Al_x(H_2O)_{(6x-2y)}(OH)_yCl_{(3x-y)}$.

Na tabela 4 são apresentadas as fórmulas específicas do HCA, a acidez total, o teor de Al₂O₃ e as massas específicas das soluções fornecidas pelo fabricante (DI BERNARDO e DANTAS, 2005):

Tabela 4 - Hidróxido de alumínio e fórmulas químicas específicas

Fórmula Química	Acidez total (% HCl, massa/massa)	Al ₂ O ₃ total (% massa/massa)	Massa específica (kg.L ⁻¹ a 18°C)
Al ₂ Cl ₆	22,84	9,06	1,270
Al ₂ (OH) ₁ Cl ₅	21,49	10,20	1,280
Al ₂ (OH) ₂ Cl ₄	19,45	11,30	1,290
Al ₂ (OH) ₃ Cl ₃	17,85	16,40	1,300
Al ₂ (OH) ₄ Cl ₂	14,14	20,30	1,315
Al ₂ (OH) _{4,5} Cl _{1,5}	12,00	22,60	1,325

Fonte: Di Bernardo e Dantas (2005).

O hidroxicloreto de alumínio ou policloreto de alumínio, na maioria dos casos, apresenta-se como um coagulante superior ao sulfato de alumínio. Na eliminação de substâncias coloidais é 2,5 vezes superior, para a mesma dosagem de Al^{3+} , em relação a outros sais de alumínio frequentemente utilizados (PAVANELLI, 2001; SRIVASTAVA et al., 2005).

Nos estudos de Gregory e Rossi (2001) examinaram a eficiência de vários coagulantes pré-hidrolisados para o tratamento de águas residuais, e propuseram que os produtos PAC proporcionam floculação mais rápida e forte do que a dos flocos de alumínio com uma dosagem equivalente. Este efeito ocorre porque estes coagulantes estão pré-neutralizados, produzindo um efeito menor sobre o pH da água o que reduz a necessidade de correção do pH.

Na revisão de Verma et al. (2012), o policloreto de alumínio proporciona uma melhor remoção da cor e menor volume de lodo, mesmo a baixa temperatura. Choo et al. (2007) apud Verma et al. (2012) tratou efluente têxtil contendo corante disperso com o parâmetro de qualidade turbidez variando no intervalo de 25 a 31 UNT e pH entre 7,2 a 7,6. Os ensaios foram realizados com dosagens de PAC na faixa de 1,0 a 10 $mg.L^{-1}$. A eficiência de 99,9% de remoção de turbidez foi obtido utilizando 10 $mg.L^{-1}$ de PAC.

Nas pesquisas de Sanghi et al. (2006) foi realizado o tratamento de solução de corante reativo, ácido e direto com concentração de 50 $mg.L^{-1}$. Os ensaios foram realizados com diferentes dosagens de PAC (0,1; 0,5 e 1,0 $mg.L^{-1}$) e pH (7,5; 8,5; 9,5). A eficiência máxima obtida foi utilizando 1,0 $mg.L^{-1}$ de PAC com pH 9,5, em que, o autor obteve 79%, 61% e 95% de remoção de cor para os corantes reativo, ácido e direto respectivamente. Conforme Sanghi et al. (2006) o PAC possui os melhores resultados de remoção de cor com pH na faixa entre 7,0 a 9,5. Quando o valor de pH está no intervalo de 8,5 a 9,5 o PAC proporciona uma maior desestabilização dos corantes alcançando excelentes eficiências de remoção. O pH abaixo de 7,0 e acima de 9,5 o PAC resulta em menores eficiências de remoção.

Os polímeros possuem alto peso molecular, podem ser sintéticos ou não, e são classificados em aniônicos, catiônicos, neutros ou não iônicos.

Os floculantes como as poliacrilamidas aniônicas introduzem cargas negativas nas soluções aquosas e as poliacrilamidas catiônicas introduzem cargas positivas (ANDREOLI, 2001).

Os polímeros dos tipos aniônicos e não iônicos atuam na formação de pontes partícula-polímero-partícula (AISSE, 2001). Os polímeros catiônicos possuem uma força de adsorção com partículas negativas o que proporciona a redução da dupla camada de repulsão resultando na agregação (MORETTI, 2001).

Em estudos de Pioltine e Reali (2011), foi empregada a técnica de flotação por ar dissolvido com utilização de bomba multifásica no tratamento de efluentes da indústria têxtil. O efluente possuía o parâmetro de qualidade cor aparente igual a 18000 UC, turbidez de 1600 UNT, DQO de 3700 mg.L⁻¹, SST de 1200 mg.L⁻¹ e pH 9,0. Os ensaios foram realizados com vazão de reciclo de 20%, pressões de operação de 6,5 a 7,5 atm e com diferentes dosagens de coagulante (600, 800, 1000 e 1100 mg.L⁻¹) e de polímero catiônico (60, 90, 120 e 130 mg.L⁻¹). A eficiência de 95%, 96%, 36% e 82% de remoção de cor, turbidez, DQO e SST, respectivamente foram obtidos utilizando 1000 mg.L⁻¹ de coagulante e 120 mg.L⁻¹ de polímero.

Nas pesquisas de Quartaroli et al. (2014) foi realizado o tratamento do efluente da indústria de papel e celulose com parâmetro de qualidade de cor aparente igual a 364 UC, cor verdadeira igual a 294 UC, turbidez igual a 6,18 UNT e pH igual a 7,8. Os ensaios foram realizados com diferentes dosagens de PAC (50, 100, 150, 200, 250 e 300 mg.L⁻¹) e de polímero aniônico (0,25; 0,50; 0,75 e 1,0 mg.L⁻¹). A eficiência de 66% de remoção de cor aparente, de 83% de cor verdadeira, 28% de turbidez e 60% de DQO foi obtido utilizando 150 mg.L⁻¹ de PAC e 1 mg.L⁻¹ de polímero.

Nos estudos de Santos et al. (2014), tratou efluente primário da indústria petroquímica com parâmetro de qualidade de turbidez igual a 454 UNT e pH 6,8. Os ensaios foram realizados com dosagens de PAC de (150 e 300 mg.L⁻¹), polímero aniônico de 1 mg.L⁻¹ e pH na faixa de 5 a 9. Foi verificado que com a adição de 150 mg.L⁻¹ de PAC, em pH 8,0 e com a concentração do polímero aniônico (1,0 mg.L⁻¹) resultou o ponto ótimo do tratamento, por apresentar a melhor remoção de turbidez (98,2%) e óleos e graxas (95%).

3.2.4.3 *Moringa oleífera*

A *Moringa oleífera* é uma planta tropical pertencente à família *Moringaceae*, nativa do noroeste da Índia e introduzida no Brasil na década de 50. Cresce em solos com umidade relativamente baixa, sendo encontrada comumente em média altitude (NDABIGENGESERE et al., 1995).

Segundo Anwar et al. (2007), o gênero *Moringa* é constituído por quatorze espécies amplamente distribuídas nas regiões tropicais do planeta. Dentre estas espécies destaca-se a *Moringa oleífera*, conhecida popularmente como “quiabo-de-quina”, “lírio branco” ou apenas “moringa”. Pode atingir até 5 metros de altura considerada árvore de médio porte. Possuem flores brancas, sementes protegidas por baga e folhas arredondadas.

As folhas têm concentrações de β -caroteno, cálcio, potássio, proteínas, vitamina C e cerca de 23.000 UI (Unidade Internacional) de vitamina A, sobressaindo-se entre olerícolas como brócolis, cenoura, couve, espinafre e alface, que possuem, respectivamente 5.000, 3.700, 2.200, 1.900 e 1.000 UI de vitamina A. Este fato justifica a intensa tentativa em difundir-la como hortaliça, principalmente em comunidades carentes onde há desnutrição infantil. Suas sementes possuem extrato com forte poder aglutinante o que facilita a clarificação de água residuárias (SILVA et al., 2001; SIDDHURAJU et al., 2003).

As sementes de *Moringa* possuem polissacarídeos que ajudam no processo de floculação e sedimentação do material particulado de águas residuais. Ndabigengesere et al. (1995) chegaram à conclusão de que a ação coagulante da *Moringa oleífera* está relacionada com a presença de proteínas nas sementes que agem como aglutinantes.

Silva et al. (2001) examinaram a utilização de coagulantes naturais no tratamento de efluentes da indústria têxtil e notaram que, comparativamente aos coagulantes químicos utilizados, as sementes trituradas de *Moringa oleífera* apresentaram uma alternativa propícia no tratamento físico-químico dessas águas (tabela 5). O autor ainda conclui que as sementes de *Moringa* podem ser utilizadas como auxiliar no tratamento primário, já que proporciona aumento na eficiência dos decantadores para remoção de sólidos em suspensão. Na tabela 5 é apresentado a

eficiência de remoção de cor e turbidez de diferentes coagulantes dos estudos de Silva et al. (2001).

Tabela 5 - Eficiência de remoção de cor e turbidez de diferentes coagulantes

Coagulante	Dosagem (mg.L ⁻¹)	Remoção (%) Esgoto bruto		Remoção (%) Esgoto tratado	
		Cor	Turbidez	Cor	Turbidez
Al ₂ (SO ₄) ₃ .18H ₂ O	20	59	56	22	38
	40	54	52	25	40
	80	59	56	22	38
	120	63	64	27	42
FeCl ₃	20	63	58	25	36
	40	64	59	29	40
	80	61	57	18	29
	120	64	60	14	24
Quitosana	1	85	85	58	67
	2	85	84	55	62
	3	85	84	53	62
	4	86	85	59	67
Moringa	100	63	58	58	67
	200	84	83	57	64
	400	90	89	67	73
	500	92	92	68	76

Fonte: Silva et al. (2001).

Heredia et al. (2009) estudou a remoção de vários tipos de corantes aniônicos, especialmente o corante Índigo Carmine utilizando o coagulante *Moringa oleífera*. O tratamento da solução de corante Índigo Carmine na concentração de 100 a 400 mg.L⁻¹ foi realizado com diferentes dosagens de moringa 2 a 350 mg.L⁻¹, temperatura no intervalo de 10 a 40 °C e pH 7. Estes estudos apresentaram como principais considerações: a) a ação do coagulante apresenta uma cinética rápida e elevado potencial para o tratamento de águas residuais com corante; b) a *moringa oleífera* funciona plenamente no processo de coagulação e floculação, e alcança um nível médio de remoção de corante de até 80% utilizando a concentração de coagulante de 343 mg.L⁻¹ com temperatura de 11,2 °C; c) o pH não afeta o processo do coagulante; d) a temperatura tem uma influência negativa, em que, quando a temperatura aumenta, a eficiência do processo diminui, devido provavelmente ao carácter proteico da semente de moringa; e) a moringa pode ser

utilizada para outros tipos de corantes, tais como os que possuem a função azo e antraquinona.

Nas pesquisas de Pritchard et al. (2010) foi investigado o desempenho da *Moringa oleífera*. Foi tratada água colorida produzida artificialmente por *kaolin*, com o parâmetro de qualidade cor igual a 20 (abs/m) e turbidez de 160 UNT. Os ensaios foram realizados com concentração de moringa de 750, 1000 e 1250 mg.L⁻¹ e pH 7,5. A eficiência de 83% de remoção de cor e 97% de turbidez foi obtida com dosagem de 1000 mg.L⁻¹ de moringa. A *Moringa oleífera* mostrou capacidade de remoção suficiente para incentivar o seu uso para o tratamento de águas turvas (PRITCHARD et al., 2010).

Nas pesquisas de Heredia et al. (2012) foi confirmado que as sementes de *Moringa oleífera* são um coagulante viável para a remoção de surfactantes de efluentes líquidos, especialmente com cadeias longas de carbono. Neste estudo, foi analisada a remoção de detergentes aniônicos de cadeia longa, tais como o Polioxietileno 3.5 (*Polyoxyethylene 3.5*) e o Sulfato de éter laurilo de sódio (*sodium lauryl ether sulfate - SLES*). O sistema coagulante/detergente apresentou comportamento estável com diferentes temperaturas e pH. Os experimentos apresentaram uma combinação ideal de dosagem de coagulante e surfactante inicial de 234 mg.L⁻¹ e 76 mg.L⁻¹, respectivamente, com eficiência de remoção elevada em torno de 80%.

O estudo de Ströher (2012) apresentou as condições operacionais para maximizar a remoção de cor e turbidez de um efluente proveniente da lavagem de jeans com uso do coagulante natural, moringa. O parâmetro apresentado de qualidade de cor foi de 1017 UC e turbidez de 449 FAU. Foram realizados testes com as concentrações de 1400 mg.L⁻¹, 1600 mg.L⁻¹, 1800 mg.L⁻¹, 2000 mg.L⁻¹, 2200 mg.L⁻¹, 2400 mg.L⁻¹ e 2600 mg.L⁻¹ de moringa. Os melhores resultados obtidos foram com a concentração de 1400 mg.L⁻¹ de moringa com remoções de 80,33% e 91,10% de cor e turbidez, respectivamente.

Veeramalini et al. (2012) pesquisou a remoção de corante reativo amarelo de soluções aquosas usando moringa oleífera em diversas concentrações: 100, 200, 300, 400 e 500 mg.L⁻¹. Foi verificado que o ponto ótimo foi na concentração de 500 mg.L⁻¹ de moringa e pH na faixa de 8 a 10 o coagulante removeu 62% de cor e 37% de DQO. O pH influenciou na remoção do corante, em que a melhor eficiência de

remoção foi com pH maior. Conforme Veeramalini et al. (2012) a melhor eficiência de remoção com o maior pH é devido a superfície ativa dos coagulantes serem carregados negativamente.

Na pesquisa de Ströher et al. (2013), foi examinada a utilização de coagulantes naturais, como a moringa no tratamento de efluente proveniente de lavagem de jeans. O parâmetro de qualidade do efluente foi: cor igual 1400 UC, turbidez igual 375 FAU e DQO igual 491 mg.L⁻¹. Os ensaios foram realizados com a concentração de moringa de 1400, 1600, 1800, 2000, 2200, 2400 e 2600 mg.L⁻¹. O ponto ótimo para o coagulante moringa foi obtido com a concentração de coagulante de 1600 mg.L⁻¹ alcançando a remoção de cor aparente de 73,5% e de turbidez de 78,6%. Para a DQO houve aumento deste parâmetro em 12,4% devido a inserção da moringa como matéria orgânica.

4. RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISE DO PROCESSO ELETROQUÍMICO

A caracterização físico-química das amostras de efluente bruto submetidas aos ensaios eletroquímicos apresentaram os seguintes parâmetros de qualidade da tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros de qualidade do efluente bruto

Parâmetros de Qualidade	
Cor Aparente (UC)	500 ± 1
Turbidez (UNT)	56 ± 1
Demanda Química de Oxigênio (mg.L ⁻¹)	285 ± 2
Sólidos Suspensos Totais (mg.L ⁻¹)	95 ± 2
pH	7,84 ± 0,01
Condutividade (mS.cm ⁻¹)	7,04 ± 0,01
Temperatura (°C)	24 ± 2

Fonte: Autoria própria.

Após o tratamento (tabela 7) foram obtidas faixas de valores para cada variável: a cor aparente variou entre 67 e 158 UC, a turbidez entre 23 e 45 UNT, a DQO entre 70,87 e 144,98 mg.L⁻¹, os SST entre 32 e 79 mg.L⁻¹, o pH entre 7,49 e 8,09 e a condutividade entre 6,67 e 6,84 mS.cm⁻¹.

Tabela 7 – Delineamento experimental com valores codificados e respostas quanto a eficiência da remoção do processo eletroquímico

Ensaio	Valores codificados		Corrente Elétrica para placa de 24 cm ² (mA)	Tempo de Coagulação (minutos)	Cor (UC)	Turbidez (UNT)	DQO (mg.L ⁻¹)	SST (mg.L ⁻¹)	pH	Condutividade (mS.cm ⁻¹)
	X1	X2								
1	-1	-1	287,87	8,46	130	45	144,98	79	7,49	6,80
2	1	-1	712,13	8,46	103	40	94,90	74	7,63	6,68
3	-1	1	287,87	15,54	110	38	108,92	69	7,70	6,78
4	1	1	712,13	15,54	67	27	76,88	58	7,87	6,67
5	-1,4142	0	200	12	158	42	121,94	63	7,70	6,83
6	1,4142	0	800	12	88	30	72,87	48	8,00	6,71
7	0	-1,4142	500	7	100	33	106,92	58	7,96	6,79
8	0	1,4142	500	17	93	25	70,87	53	7,90	6,76

Ensaio	Valores codificados		Corrente Elétrica para placa de 24 cm ²	Tempo de Coagulação	Cor	Turbidez	DQO	SST	pH	Condutividade
	X1	X2	(mA)	(minutos)	(UC)	(UNT)	(mg.L ⁻¹)	(mg.L ⁻¹)	-	(mS.cm ⁻¹)
9	0	0	500	12	82	25	82,88	42	8,04	6,84
10	0	0	500	12	84	23	78,88	32	8,09	6,75
11	0	0	500	12	82	24	82,88	37	8,06	6,75
12	0	0	500	12	85	25	76,88	48	8,05	6,80

Fonte: Autoria própria.

A tabela 8 apresenta a eficiência de remoção das variáveis: cor aparente, turbidez, DQO e SST. Os pontos centrais (ensaio 9, 10, 11 e 12) para as duas respostas apresentaram um desvio padrão de 0,3; 1,7; 1,0; 7,2 para as variáveis resposta cor, turbidez, DQO e SST respectivamente.

Tabela 8 - Resultados da eficiência de remoção

Ensaio	Eficiência de remoção (%)			
	Cor	Turbidez	DQO	SST
1	74	19,64	49,2	16,8
2	79	28,57	66,7	22,1
3	78	32,14	61,8	27,4
4	86	51,79	73,0	38,9
5	68	25,00	57,2	33,7
6	82	46,43	74,4	49,5
7	80	41,07	62,5	38,9
8	81	55,36	75,2	44,2
9	83	55,36	70,9	55,8
10	83	58,93	72,3	66,3
11	83	57,14	70,9	61,1
12	83	55,36	73,0	49,5

Fonte: Autoria própria.

Os dados apresentaram a existência de normalidade pelo teste estatístico Kolmogorov-Smirnov, onde o D_n apresentado para as variáveis resposta cor, turbidez, DQO e SST foram, respectivamente: 0,17796; 0,21189; 0,25842 e 0,11160. Considerando um nível de significância de 10% e total de 12 termos, o valor crítico tabelado foi de 0,34. Como os D_n das variáveis foram menores que o valor crítico

tabelado não existem evidências para rejeitar a hipótese de normalidade dos dados. Assim, pode-se afirmar, com nível de significância de 10%, que a amostra provém de uma população normal.

Devido a variabilidade intrínseca ao processo de eletrocoagulação, eletrofloculação e eletroflotação, foram considerados significativos os parâmetros com p-valor menores que 10% ($p < 0,10$).

Neste trabalho foram descritos os coeficientes do modelo de regressão a partir da matriz codificada. Os termos lineares estão associados a letra (L) e os termos quadráticos com a letra (Q).

4.1 RESPOSTA COR APARENTE

Para a resposta cor, não foram significativos o termo quadrático do tempo de coagulação (T.C.) e a interação entre a corrente elétrica (C.E.) e o tempo de coagulação, tendo sido incorporados aos resíduos para cálculo da ANOVA (tabela 9).

Tabela 9 - ANOVA para a resposta cor reparametrizado

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor	R^2
Regressão	0,0242	3	0,0081	23,2650	< 0,0002	89,72 %
Resíduos	0,0028	8	0,0003			
Total	0,0270	11				

Fonte: Autoria própria.

Analisando a tabela 9, verifica-se que a porcentagem de variação explicada (R^2) foi de 89,72% e o p-valor ($< 0,0002$). Considerando o nível de significância de 10% pode-se inferir que os valores de R^2 e p-valor são significativos, o que indica que o modelo se ajusta aos dados experimentais.

O F_{tab} foi obtido através da tabela de limites unilaterais da distribuição F de Fisher-Snedecor ao nível de 10% de probabilidade, onde na variável 1 foi utilizado o valor do grau de liberdade da regressão e na variável 2 o valor do grau de liberdade

dos resíduos, o que resultou em um $F_{\text{tab}} = F_{3;8;0,10} = 2,92$. Como o F_{cal} foi de 23,2650 (tabela 9) o “Teste F” para regressão atende a prerrogativa de $F_{\text{cal}} > F_{\text{tab}}$, indicando que o modelo é representativo.

A tabela 10 apresenta os coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta cor e o modelo reparametrizado pela equação 1.

Tabela 10 - Coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta cor

Fatores	Coeficientes de regressão	Erro padrão	t(8)	p - valor	Estimativas por Intervalo (90%)	
					Limite Inferior	Limite Superior
Média	0,8258	0,0072	114,3924	< 0,0001	0,8124	0,8392
x_1 (C.E.) (L)	0,0422	0,0066	6,4110	0,0002	0,0300	0,0545
x_1 (C.E.) (Q)	-0,0342	0,0072	-4,7375	0,0015	-0,0476	-0,0208
x_2 (T.C.) (L)	0,0165	0,0066	2,5000	0,0369	0,0042	0,0287

Fonte: Autoria própria.

Equação 1 - Remoção de cor reparametrizado pelo processo eletroquímico

$$\text{Remoção de Cor} = 0,8258 + 0,0422 x_1 - 0,0342 x_1^2 + 0,0165 x_2$$

x_1 – Corrente Elétrica (mA);

x_2 – Tempo Coagulação (minutos).

A tabela 11 apresenta os valores experimentais e os previstos pelo modelo para a remoção de cor. Também, apresenta os erros de ajuste e os erros relativos para cada ensaio do DCCR.

Tabela 11 - Valores de remoção de cor experimentais, previstas pelo modelo e desvios para o DCCR

Ensaio	Remoção de Cor experimental	Remoção de Cor prevista	Erro de Ajuste	Erro relativo (%)
1	0,7400	0,7329	0,0071	0,96
2	0,7940	0,8174	-0,0234	-2,94
3	0,7800	0,7658	0,0142	1,81
4	0,8660	0,8503	0,0157	1,81
5	0,6840	0,6977	-0,0137	-1,99
6	0,8240	0,8171	0,0069	0,83
7	0,8000	0,8025	-0,0025	-0,31
8	0,8140	0,8491	-0,0351	-4,31
9	0,8360	0,8258	0,0102	1,22
10	0,8320	0,8258	0,0062	0,74
11	0,8360	0,8258	0,0102	1,22
12	0,8300	0,8258	0,0042	0,50

Fonte: Autoria própria.

Na região estudada os erros relativos que apresentaram o maior percentual foram os ensaios 2, 8 (-2,94% e -4,31%, respectivamente). Em valores de unidade de cor este percentual representa 12 e 17 UC respectivamente.

4.2 RESPOSTA TURBIDEZ

Para a resposta turbidez, não foi significativa a interação entre a corrente elétrica e o tempo de coagulação, tendo sido incorporados aos resíduos para cálculo da ANOVA (tabela 12).

Tabela 12 - ANOVA para a resposta turbidez reparametrizado

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor	R^2
Regressão	0,1963	4	0,0491	15,1110	< 0,0015	89,62 %
Resíduos	0,0227	7	0,0032			
Total	0,2190	11				

Fonte: Autoria própria.

A porcentagem de variação explicada (R^2) foi de 89,62% e o p-valor (< 0,0015). Considerando o nível de significância de 10% pode-se inferir que os valores de R^2 e p-valor são significativos, o que indica que o modelo se ajusta aos dados experimentais.

O F_{tab} foi obtido pela tabela de limites unilaterais da distribuição F de Fisher-Snedecor ao nível de 10% de probabilidade, onde na variável 1 foi utilizado o valor do grau de liberdade da regressão e na variável 2 o valor do grau de liberdade dos resíduos, o que resultou em um $F_{tab} = F_{4;7;0,10} = 2,96$. Como o F_{cal} foi de 15,1110 (tabela 12) o “Teste F” para regressão atende a prerrogativa de $F_{cal} > F_{tab}$, indicando que o modelo é representativo.

A tabela 13 apresenta os coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta turbidez.

Tabela 13 - Coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta turbidez

Fatores	Coeficientes de regressão	Erro padrão	t(7)	p - valor	Estimativas por Intervalo (90%)	
					Limite Inferior	Limite Superior
Média	0,5670	0,0285	19,8973	< 0,0001	0,5130	0,6210
x ₁ (C.E.) (L)	0,0736	0,0201	3,6526	0,0081	0,0354	0,1118
x ₁ (C.E.) (Q)	-0,1272	0,0225	-5,6480	0,0008	-0,1699	-0,0846
x ₂ (T. C.) (L)	0,0699	0,0201	3,4690	0,0104	0,0317	0,1081
x ₂ (T. C.) (Q)	-0,0647	0,0225	-2,8735	0,0239	-0,1074	-0,0221

Fonte: Autoria própria.

O modelo reparametrizado é representado pela equação 2.

Equação 2 - Remoção de turbidez reparametrizado pelo processo eletroquímico

$$\text{Remoção de Turbidez} = 0,5670 + 0,0736 x_1 - 0,1272 x_1^2 + 0,0699 x_2 - 0,0647 x_2^2$$

x₁ – Corrente Elétrica (mA);

x₂ – Tempo Coagulação (minutos).

A tabela 14 apresenta os valores experimentais e os previstos pelo modelo para a remoção de turbidez. Também apresenta os erros de ajuste e os erros relativos para cada ensaio do DCCR.

Tabela 14 - Valores de remoção de turbidez experimentais, previstas pelo modelo e desvios para o DCCR

Ensaio	Remoção de Turbidez experimental	Remoção de Turbidez prevista	Erro de Ajuste	Erro relativo (%)
1	0,1964	0,2315	-0,0351	-17,85
2	0,2857	0,3787	-0,0930	-32,54
3	0,3214	0,3713	-0,0499	-15,51
4	0,5179	0,5185	-0,0006	-0,12
5	0,2500	0,2084	0,0416	16,63
6	0,4643	0,4166	0,0477	10,27
7	0,4107	0,3387	0,0721	17,54
8	0,5536	0,5363	0,0172	3,11
9	0,5536	0,5670	-0,0134	-2,41
10	0,5893	0,5670	0,0223	3,78
11	0,5714	0,5670	0,0045	0,78
12	0,5536	0,5670	-0,0134	-2,41

Fonte: Autoria própria.

Na região estudada os erros relativos que apresentaram o maior percentual foram os ensaios 1, 2, 3, 5, 6, 7 (-17,85%; -32,54%; -15,51%; 16,63%; 10,27%; 17,54%, respectivamente). Em valores de unidade nefelométrica de turbidez este percentual representa 3, 5, 3, 3, 2, 4 UNT respectivamente.

4.3 RESPOSTA DQO

No caso da variável DQO, a interação entre a corrente elétrica e o tempo de coagulação não foi significativo pelo método estatístico utilizado, sendo incorporado aos resíduos para cálculo da ANOVA (tabela 15).

Tabela 15 - ANOVA para a resposta DQO reparametrizado

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor	R^2
Regressão	0,0655	4	0,0164	19,3422	< 0,0007	91,70 %
Resíduos	0,0059	7	0,0008			
Total	0,0714	11				

Fonte: Autoria própria.

A porcentagem de variação explicada (R^2) foi de 91,70% e o p-valor (< 0,0007). Considerando o nível de significância de 10% pode-se inferir que os valores de R^2 e p-valor são significativos, o que indica que o modelo se ajusta aos dados experimentais.

O F_{tab} foi obtido através da tabela de limites unilaterais da distribuição F de Fisher-Snedecor ao nível de 10% de probabilidade, onde na variável 1 foi utilizado o valor do grau de liberdade da regressão e na variável 2 o valor do grau de liberdade dos resíduos, o que resultou em um $F_{tab} = F_{4;7;0,10} = 2,96$. Como o F_{cal} foi de 19,3422 (tabela 15) o “Teste F” para regressão atende a prerrogativa de $F_{cal} > F_{tab}$, indicando que o modelo é representativo.

A tabela 16 apresenta os coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta DQO.

Tabela 16 - Coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta DQO

Fatores	Coeficientes de regressão	Erro padrão	t(7)	p - valor	Estimativas por Intervalo (90%)	
					Limite Inferior	Limite Superior
Média	0,7181	0,0145	49,3674	< 0,0001	0,6906	0,7457
x ₁ (C.E.) (L)	0,0664	0,0103	6,4566	0,0003	0,0469	0,0859
x ₁ (C.E.) (Q)	-0,0415	0,0115	-3,6070	0,0087	-0,0633	-0,0197
x ₂ (T. C.) (L)	0,0461	0,0103	4,4771	0,0029	0,0266	0,0655
x ₂ (T. C.) (Q)	-0,0266	0,0115	-2,3093	0,0542	-0,0483	-0,0048

Fonte: Autoria própria.

O modelo reparametrizado é representado pela equação 3.

Equação 3 - Remoção de DQO reparametrizado pelo processo eletroquímico

$$\text{Remoção de DQO} = 0,7181 + 0,0664 x_1 - 0,0415 x_1^2 + 0,0461 x_2 - 0,0266 x_2^2$$

x₁ – Corrente Elétrica (mA);

x₂ – Tempo Coagulação (minutos).

A tabela 17 apresenta os valores experimentais e os previstos pelo modelo para a remoção de DQO. Também apresenta os erros de ajuste e os erros relativos para cada ensaio do DCCR.

Tabela 17 - Valores de remoção de DQO experimentais, previstas pelo modelo e desvios para o DCCR

Ensaio	Remoção de DQO experimental	Remoção de DQO prevista	Erro de Ajuste	Erro relativo (%)
1	0,4916	0,5376	-0,0460	-9,35
2	0,6672	0,6705	-0,0032	-0,48
3	0,6181	0,6297	-0,0117	-1,89
4	0,7304	0,7626	-0,0321	-4,39
5	0,5724	0,5413	0,0312	5,44
6	0,7445	0,7291	0,0154	2,06
7	0,6251	0,5999	0,0252	4,02
8	0,7515	0,7302	0,0213	2,84
9	0,7094	0,7181	-0,0088	-1,23
10	0,7234	0,7181	0,0053	0,72
11	0,7094	0,7181	-0,0088	-1,23
12	0,7304	0,7181	0,0123	1,68

Fonte: Autoria própria.

Na região estudada os erros relativos que apresentaram o maior percentual foram os ensaios 1, 4, 5, 7 (-9,35%; -4,39%; 5,44%; 4,02%, respectivamente). Em valores de mg.L^{-1} de DQO este percentual representa 12, 9, 10, 6 mg.L^{-1} respectivamente.

4.4 RESPOSTA SST

No caso da variável resposta sólidos suspensos totais não foram significativos a corrente elétrica linear, o tempo de coagulação linear e a interação entre a corrente elétrica e o tempo de coagulação, sendo incorporado aos resíduos para cálculo da ANOVA (tabela 18).

Tabela 18 - ANOVA para a resposta SST reparametrizado

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor	R^2
Regressão	0,1575	2	0,0788	6,7808	< 0,0160	60,11 %
Resíduos	0,1045	9	0,0116			
Total	0,2621	11				

Fonte: Autoria própria.

A porcentagem de variação explicada (R^2) foi de 60,11% e o p-valor (< 0,0160). Considerando o nível de significância de 10% pode-se inferir que os valores de R^2 e p-valor são significativos, o que indica que o modelo se ajusta aos dados experimentais.

O F_{tab} foi obtido através da tabela de limites unilaterais da distribuição F de Fisher-Snedecor ao nível de 10% de probabilidade, onde na variável 1 foi utilizado o valor do grau de liberdade da regressão e na variável 2 o valor do grau de liberdade dos resíduos, o que resultou em um $F_{\text{tab}} = F_{2;9;0,10} = 3,01$. Como o F_{cal} foi de 6,7808 (tabela 18) o “Teste F” para regressão atende a prerrogativa de $F_{\text{cal}} > F_{\text{tab}}$, indicando que o modelo é representativo.

A tabela 19 apresenta os coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta SST.

Tabela 19 - Coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta SST

Fatores	Coeficientes de regressão	Erro padrão	t(9)	p - valor	Estimativas por Intervalo (90%)	
					Limite Inferior	Limite Superior
Média	0,5833	0,0539	10,8245	< 0,0001	0,4845	0,6821
x_1 (C. E.) (Q)	-0,1215	0,0426	-2,8525	0,0190	-0,1996	-0,0434
x_2 (T. C.) (Q)	-0,1215	0,0426	-2,8525	0,0190	-0,1996	-0,0434

Fonte: Autoria própria.

O modelo reparametrizado é representado pela equação 4.

Equação 4 - Remoção de SST reparametrizado pelo processo eletroquímico

$$\text{Remoção de SST} = 0,5833 - 0,1215 x_1^2 - 0,1215 x_2^2$$

x_1 – Corrente Elétrica (mA);

x_2 – Tempo Coagulação (minutos).

A tabela 20 apresenta os valores experimentais e os previstos pelo modelo para a remoção de SST. Também apresenta os erros de ajuste e os erros relativos para cada ensaio do DCCR.

Tabela 20 - Valores de remoção de SST experimentais, previstas pelo modelo e desvios para o DCCR

Ensaio	Remoção de SST experimental	Remoção de SST prevista	Erro de Ajuste	Erro relativo (%)
1	0,1684	0,3403	-0,1719	-102,03
2	0,2211	0,3403	-0,1192	-53,93
3	0,2737	0,3403	-0,0666	-24,33
4	0,3895	0,3403	0,0492	12,63
5	0,3368	0,3403	-0,0034	-1,02
6	0,4947	0,3403	0,1545	31,22
7	0,3895	0,3403	0,0492	12,63
8	0,4421	0,3403	0,1018	23,03
9	0,5579	0,5833	-0,0254	-4,56
10	0,6632	0,5833	0,0798	12,03
11	0,6105	0,5833	0,0272	4,45
12	0,4947	0,5833	-0,0886	-17,90

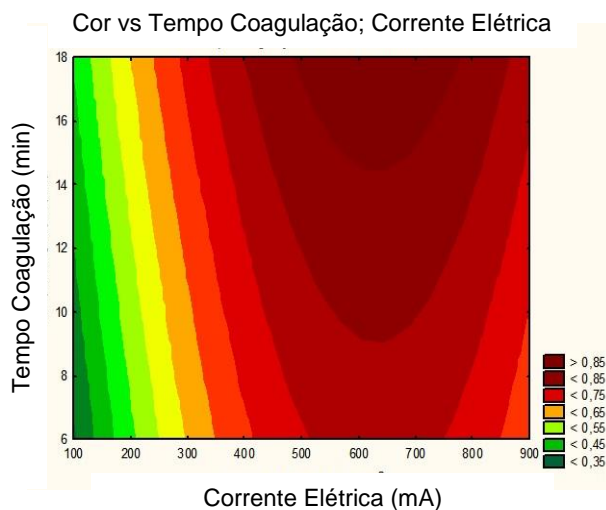
Fonte: Autoria própria.

Na região estudada os erros relativos que apresentaram o maior percentual foram os ensaios 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 10, 12 (-102,03%; -53,93%; -24,33%; 12,63%;

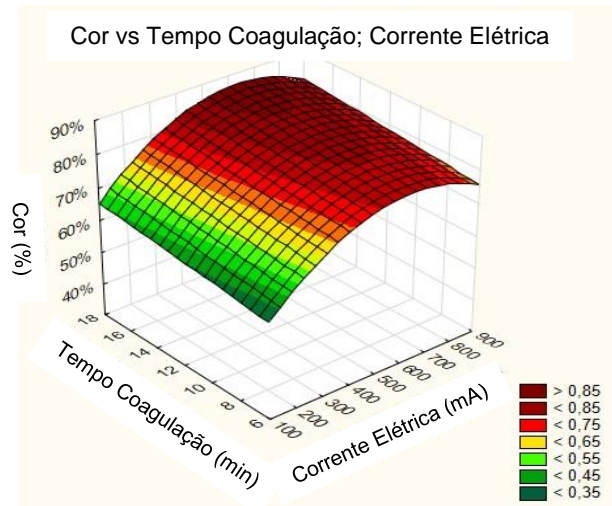
31,22%; 12,63%; 23,03%; 12,03%; -17,90%, respectivamente). Em valores de mg.L^{-1} de SST este percentual representa 16, 12, 7, 5, 10, 5, 7, 5, 6 mg.L^{-1} respectivamente.

4.5 CURVAS DE CONTORNO E SUPERFÍCIE DE RESPOSTA PARA OS ENSAIOS ELETROQUÍMICOS

As curvas de contorno e a superfície de resposta das variáveis resposta cor aparente, turbidez, DQO e SST apresentam a influência da variável corrente elétrica e tempo de coagulação na faixa estudada. A corrente elétrica utilizada foi de 200 a 800 mA (correspondente a densidade de corrente de 8,33 a 33,33 mA.cm^{-2}) e o tempo de coagulação de 7 a 17 minutos.

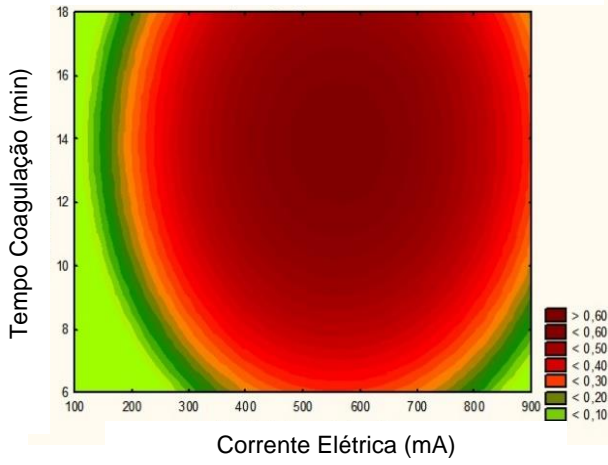


(a)



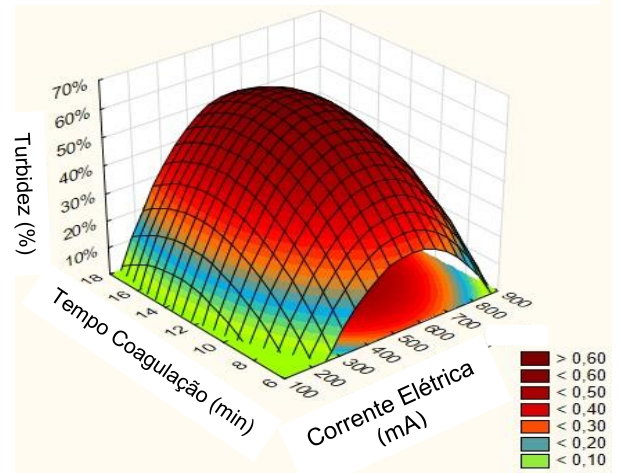
(b)

Turbidez vs Tempo Coagulação; Corrente Elétrica



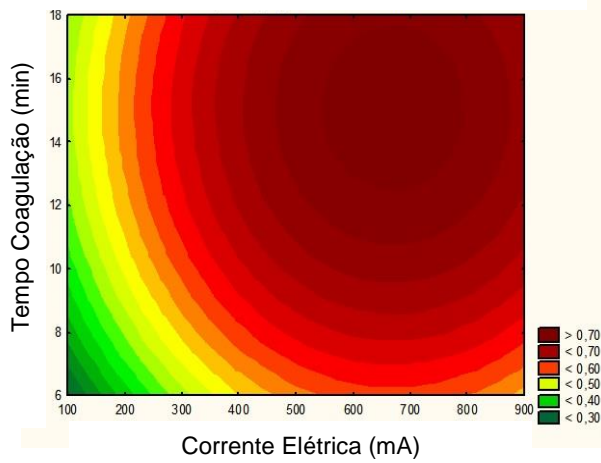
(c)

Turbidez vs Tempo Coagulação; Corrente Elétrica



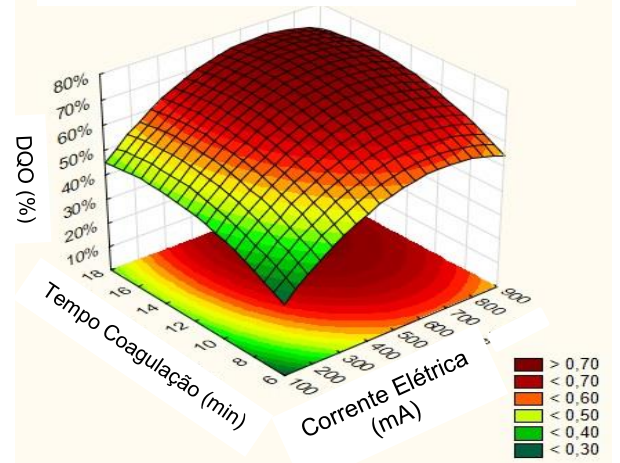
(d)

DQO vs Tempo Coagulação; Corrente Elétrica



(e)

DQO vs Tempo Coagulação; Corrente Elétrica



(f)

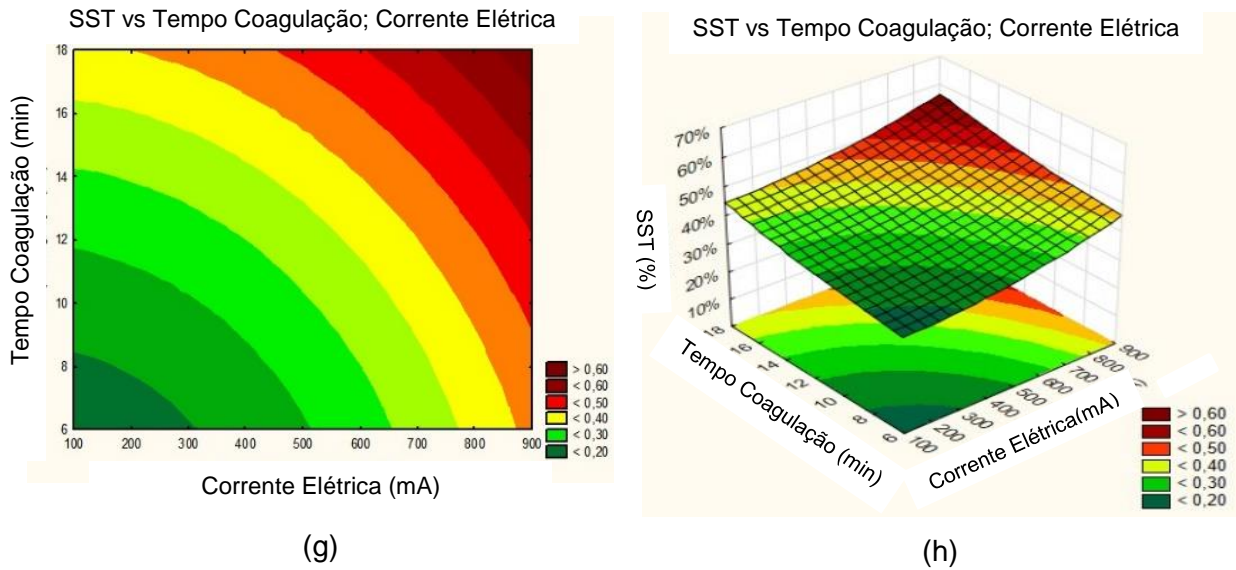


Figura 11 – Ensaio Eletroquímico em função da corrente elétrica e tempo de coagulação: Curvas de contorno (a) e Superfície de resposta (b) para a resposta cor; Curvas de contorno (c) e Superfície de resposta (d) para a resposta turbidez; Curvas de contorno (e) e Superfície de resposta (f) para a resposta DQO; Curvas de contorno (g) e Superfície de resposta (h) para a resposta SST

Fonte: Autoria própria.

A eficiência de remoção de cor aparente relacionada com as variáveis corrente elétrica e tempo de coagulação apresentou a maior eficiência (vide Figura 11, itens a, b) em área superior a 85% de remoção. Esta área possui valores de corrente elétrica entre 500 a 800 mA (correspondente a densidade de corrente de 20,83 a 33,33 mA.cm⁻²) e tempo de coagulação acima de 15 min.

Para a eficiência de remoção da turbidez com as variáveis corrente elétrica e tempo de coagulação foi verificado uma área com eficiência acima de 60%. A área possui valores de corrente elétrica entre 500 a 650 mA (correspondente a densidade de corrente de 20,83 a 27,08 mA.cm⁻²) e tempo de coagulação entre 12 a 16 min (vide Figura 11, itens c, d).

A variável DQO apresentou uma área ótima com eficiência de remoção acima de 70%. Esta eficiência é alcançada com corrente elétrica na faixa de 550 a 800 mA (correspondente a densidade de corrente de 22,92 a 33,33 mA.cm⁻²) e tempo de coagulação entre 12 a 18 min (vide Figura 11, itens e, f). A eficiência de remoção de sólidos suspensos totais apresentou área com eficiência maior que 60%. Esta área corresponde a corrente elétrica superior a 750 mA (correspondente a

densidade de corrente de $31,25 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$) e tempo de coagulação acima de 15 min (vide Figura 11, itens g, h).

Eficiências para a remoção de cor, turbidez, DQO, utilizando o processo eletroquímico foram reportados nos estudos:

a) Silva et al. (2000) tratou soluções de corante têxtil sulfuroso com concentração de $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Os parâmetros utilizados para realizar os ensaios foram: eletrodos de aço carbono e alumínio, tempo de eletrólise de 20 minutos, e ddp de 5,0 V. Os ensaios efetuados com o eletrodo de aço, a eficiência de remoção de cor chegou a 99%. Para o eletrodo de alumínio a eficiência alcançou 96% de remoção de cor.

b) Ciardelli et al. (2001) tratou efluente têxtil com o parâmetro de qualidade de cor igual a 0,259 (absorbância-420 nm), DQO de $194 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ e pH 7,24. Os parâmetros utilizados para realizar os ensaios foram: eletrodos de ferro, densidade de corrente de $60 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$ e vazão de $2 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$. A eficiência de remoção de cor foi de 84,5 % e 48% de DQO.

c) Cerqueira (2006) tratou efluente têxtil com os parâmetros de qualidade de cor, turbidez, DQO e pH variando: 0,42 a 0,842 (absorbância-420 nm); 8,0 a 75,3 UNT; 1226 a $2553 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ e 10 a 11,4, respectivamente. Os parâmetros utilizados para realizar os ensaios foram: eletrodos de ferro e alumínio, tempo de eletrólise de 5 a 50 minutos, intensidade de corrente de 0,4 a 5,0 A, pH de 5 a 10 e distância entre os eletrodos de 0,50 a 1,5 cm. Os ensaios efetuados com o eletrodo de alumínio apresentaram 95%, 93% e 70% de eficiência de remoção de cor, turbidez e DQO respectivamente nas seguintes condições: tempo de 10 minutos, intensidade de corrente de 3 A, pH de 5 e distância entre os eletrodos de 0,50 cm. Os ensaios efetuados com o eletrodo de ferro apresentaram 95%, 96% e 61% de eficiência de remoção de cor, turbidez e DQO respectivamente nas seguintes condições: tempo de 10 minutos, intensidade de corrente de 5 A, pH de 7 e distância entre os eletrodos de 0,50 cm.

d) Zaroual et al. (2006) tratou efluente têxtil com o parâmetro de qualidade de cor igual 0,286 (absorbância-620 nm), DQO de $485 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ e pH 10,6. Os parâmetros utilizados para realizar os ensaios foram: eletrodo de ferro, ddp de 300 a 700 mV, tempo de eletrolise de 1 a 8 minutos. A eficiência de 100% de remoção de

cor e de 84% de DQO foi obtida com as seguintes condições: ddp de 600 mV, tempo de 3 minutos.

e) Daneshvar et al. (2007) tratou soluções de corante têxtil ácido amarelo 23 com concentração de 50 mg.L⁻¹. Os parâmetros utilizados para realizar os ensaios foram: eletrodo de ferro, densidade de corrente variando entre 25 a 125 A.m⁻², tempo de eletrolise de 2 a 6 minutos, distância entre os eletrodos de 0,5 a 3,0 cm e pH no intervalo de 2 a 6. A eficiência de 99%, 69% de remoção de cor e turbidez respectivamente foi obtida com as seguintes condições: densidade de corrente de 112,5 A.m⁻², tempo de 5 minutos e pH 6. Através deste estudo Daneshvar et al. (2007) verificou que a distância entre os eletrodos não influenciou na eficiência de remoção, e sim no consumo de energia de elétrica.

f) Merzouk et al. (2011) tratou solução de corante têxtil com concentração de 100 mg.L⁻¹. Os parâmetros utilizados para realizar os ensaios foram: eletrodo de alumínio, densidade de corrente variando entre 40 a 200 A.m⁻², tempo de eletrolise de 10 minutos, distância entre os eletrodos de 2,0 cm e pH 7. A eficiência de remoção de cor acima de 93% e de turbidez superior a 80% foi obtida com as seguintes condições: densidade de corrente de 150 A.m⁻², tempo de 10 minutos.

g) Kobya et al. (2003) tratou efluente têxtil com o parâmetro de qualidade de turbidez igual a 5700 UNT, DQO igual a 3422 mg.L⁻¹ e pH de 6,95. Os parâmetros utilizados para realizar os ensaios foram: eletrodos de ferro e alumínio, tempo de eletrocoagulação de 10 minutos, pH de 3 a 11, densidade de corrente de 5 a 20 mA.cm⁻², distância entre os eletrodos de 1,1 cm e condutividade de 1000 a 4000 µS.cm⁻¹. Para o parâmetro de qualidade turbidez, os ensaios efetuados com o eletrodo de ferro apresentaram eficiências no intervalo de 70 a 95% e os ensaios com o eletrodo de alumínio apresentaram eficiências no intervalo de 30 a 95%. Para a resposta DQO os ensaios efetuados com o eletrodo de ferro apresentaram eficiências no intervalo de 20 a 75% e os ensaios com o eletrodo de alumínio apresentaram eficiências no intervalo de 15 a 70%. De acordo com os ensaios de Kobya et al (2006) a eficiência de remoção de turbidez e DQO foram dependentes do pH. Em meio ácido, pH<6, a eficiência foi maior para o eletrodo de alumínio, enquanto que em meio neutro e alcalino o eletrodo de ferro teve a maior eficiência. A alta condutividade proporcionou as performances mais elevadas do processo. Considerando a mesma eficiência de remoção de turbidez e DQO, com o tempo de

operação de 10 minutos, o eletrodo de ferro requer uma densidade de corrente de 80 a 100 A.m⁻², enquanto o eletrodo de alumínio precisa de 150 A.m⁻².

Nas pesquisas analisadas, exceto a de Ciardelli et al. (2001), apresentaram a eficiência de remoção de cor e turbidez superior ao obtido neste estudo. Entretanto, alguns parâmetros utilizados por estes pesquisadores diferenciaram do presente estudo, como por exemplo: a) tipo de eletrodo (Zaroual et al., 2006; Daneshvar et al., 2007); b) tempo de eletrólise (Silva et al., 2000; Zaroual et al., 2006; Daneshvar et al., 2007); c) densidade de corrente (Kobyta et al., 2003; Daneshvar et al., 2007; Merzouk et al., 2007); d) distância dos eletrodos (Kobyta et al., 2003; Cerqueira, 2006; Merzouk et al., 2011); e) pH do efluente e/ou solução (Kobyta et al., 2003; Cerqueira, 2006; Zaroual et al., 2006; Daneshvar et al., 2007); f) tipo de efluente, em que, (Silva et al., 2000; Daneshvar et al., 2007; Merzouk et al., 2011) tratou solução de corante têxtil e não efluente da indústria têxtil.

As pesquisas de (Kobyta et al., 2003; Cerqueira, 2006 e de Daneshvar et al., 2007) apesar de utilizarem alguns parâmetros diferentes dos empregados neste estudo, apresentaram eficiências de remoção de DQO semelhantes ao obtido no presente estudo. A pesquisa de Ciardelli et al. (2001) apresentou eficiência de remoção de DQO inferior e o estudo de Zaroual et al. (2006) apresentou eficiência superior.

Comparando as curvas de contorno e a superfície de resposta produzidas para as respostas cor, turbidez, DQO foi verificado uma área de máxima eficiência de remoção para estas respostas com valores de corrente elétrica no intervalo de 550 a 650 mA (correspondente a densidade de corrente de 22,91 a 27,08 mA.cm⁻²) e tempo de coagulação no intervalo de 15 a 16 minutos (vide Figuras 11, itens a, b, c, d, e, f). Para a curva de contorno e superfície de resposta para a resposta SST a eficiência máxima é obtida com a corrente elétrica acima de 750 mA (correspondente a densidade de corrente de 31,25 mA.cm⁻²) e tempo de coagulação acima de 15 minutos (vide Figuras 11, itens g, h).

5. RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISE DO PROCESSO FAD COM COAGULANTE TANINO

A caracterização físico-química das amostras de efluente bruto submetidas aos ensaios de FAD com o coagulante tanino apresentaram os parâmetros de qualidade da tabela 21.

Tabela 21 - Parâmetros de qualidade do efluente bruto

Parâmetros de Qualidade	
Cor Aparente (UC)	643 ± 1
Turbidez (UNT)	258 ± 1
Demanda Química de Oxigênio (mg.L ⁻¹)	311 ± 2
Sólidos Suspensos Totais (mg.L ⁻¹)	68 ± 2
pH	7,76 ± 0,01
Condutividade (mS.cm ⁻¹)	7,00 ± 0,01
Temperatura	24 ± 2

Fonte: Autoria própria.

Após o tratamento (tabela 22) foram obtidas faixas de valores para cada variável: a cor aparente variou entre 63 e 159 UC, a turbidez entre 8 e 35 UNT, a DQO entre 119,85 e 155,75 mg.L⁻¹, os SST entre 4,0 e 32,0 mg.L⁻¹; o pH entre 6,85 e 8,75 e a condutividade entre 6,74 e 7,15 mS.cm⁻¹.

Tabela 22 - Delineamento experimental com valores codificados e respostas quanto a eficiência da remoção do processo FAD utilizando Tanino

Ensaio s	Valores codificados		Dosage m de tanino (mg.L ⁻¹)	pH inicial	Cor (UC)	Turbi- dez (UNT)	DQO (mg.L ⁻¹)	SST (mg.L ⁻¹)	pH final	Condutivida- de (mS.cm ⁻¹)
	x1	x2								
1	-1	-1	64,6	6,9	98	16	134,71	12,0	7,2 3	6,78
2	1	-1	135,4	6,9	63	8	127,28	8,0	7,2 3	7,04
3	-1	1	64,6	8,5	159	35	153,27	32,0	8,2 8	7,14
4	1	1	135,4	8,5	108	14	145,84	12,0	8,2 1	7,15
5	-1,4142	0	50	7,7	131	24	130,99	20,0	7,7 4	6,74

Ensaio s	Valores codificados		Dosagem de tanino (mg.L ⁻¹)	pH inicial -	Cor (UC)	Turbidez (UNT)	DQO (mg.L ⁻¹)	SST (mg.L ⁻¹)	pH final -	Condutividade (mS.cm ⁻¹)
	x1	x2								
6	1,4142	0	150	7,7	70	8	134,71	4,0	7,5 4	6,81
7	0	-1,4142	100	6,5	71	9	119,85	4,0	6,8 5	6,77
8	0	1,4142	100	8,9	137	22	139,66	16,0	8,7 5	6,79
9	0	0	100	7,7	85	11	150,79	12,0	7,7 5	7,10
10	0	0	100	7,7	92	12	155,75	8,0	7,7 8	7,01
11	0	0	100	7,7	81	9	149,56	8,0	7,7 2	6,97
12	0	0	100	7,7	86	10	144,61	8,0	7,7 3	6,78

Fonte: Autoria própria.

A tabela 23 apresenta a eficiência de remoção das variáveis: cor aparente, turbidez, DQO e SST. Os pontos centrais (ensaios 9, 10, 11 e 12) para as duas respostas apresentaram um desvio padrão de 0,7; 0,5; 1,4; 2,9 para as variáveis resposta cor, turbidez, DQO e SST respectivamente.

Tabela 23 - Resultados da eficiência de remoção

Ensaio	Eficiência de remoção (%)			
	Cor	Turbidez	DQO	SST
1	84	93,80	56,6	82,4
2	90	96,90	59,0	88,2
3	75	86,43	50,6	52,9
4	83	94,57	53,0	82,4
5	80	90,70	57,8	70,6
6	89	96,90	56,6	94,1
7	88	96,51	61,4	94,1
8	79	91,47	55,0	76,5
9	87	95,74	51,4	82,4
10	86	95,35	49,8	88,2
11	87	96,51	51,8	88,2
12	87	96,12	53,4	88,2

Fonte: Autoria própria.

Os dados apresentaram a existência de normalidade pelo teste estatístico Kolmogorov-Smirnov, onde o D_n apresentado para as variáveis resposta cor, turbidez, DQO e SST foram respectivamente: 0,17223; 0,21744; 0,13985 e 0,25000. Considerando um nível de significância de 10% e total de 12 termos, o valor crítico tabelado foi de 0,34. Como os D_n das variáveis foram menores que o valor crítico tabelado não existem evidências para rejeitar a hipótese de normalidade dos dados. Assim, pode-se afirmar, com um nível de significância de 10%, que a amostra provém de uma população normal.

Devido a variabilidade intrínseca ao processo de flotação por ar dissolvido utilizando o coagulante tanino, foram considerados significativos os parâmetros com p-valor menores que 10% ($p < 0,10$).

Neste trabalho foram descritos os coeficientes do modelo de regressão a partir da matriz codificada. Os termos lineares estão associados a letra (L) e os termos quadráticos com a letra (Q).

5.1 RESPOSTA COR APARENTE

Para a variável cor aparente, não foi significativo a interação entre o tanino e o pH, tendo sido incorporados os resíduos para cálculo da ANOVA apresentada na (tabela 24).

Tabela 24 - ANOVA para a resposta cor reparametrizado

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor	R^2
Regressão	0,0233	4	0,0058	88,0083	< 0,0001	98,05 %
Resíduos	0,0005	7	0,0001			
Total	0,0238	11				

Fonte: Autoria própria.

Analisando a tabela 24, verifica-se que a porcentagem de variação explicada (R^2) foi de 98,05% e o p-valor ($< 0,0001$). Os valores de R^2 e p-valor são significativos, o que indica que o modelo se ajusta aos dados experimentais.

O F_{tab} foi obtido através da tabela de limites unilaterais da distribuição F de Fisher-Snedecor ao nível de 10% de probabilidade, onde na variável 1 foi utilizado o valor do grau de liberdade da regressão e na variável 2 o valor do grau de liberdade dos resíduos, o que resultou em um $F_{\text{tab}} = F_{4;7;0,10} = 2,96$. Como o F_{cal} foi de 88,0083 (tabela 24) o “Teste F” para regressão atende a prerrogativa de $F_{\text{cal}} > F_{\text{tab}}$, indicando que o modelo é representativo.

A tabela 25 mostra os coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta cor.

Tabela 25 - Coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta cor

Fatores	Coeficientes de regressão	Erro padrão	t(7)	p - valor	Estimativas por Intervalo (90%)	
					Limite Inferior	Limite Superior
Média	0,8661	0,0041	212,9808	< 0,0001	0,8584	0,8739
x_1 tanino (L)	0,0335	0,0029	11,6547	< 0,0001	0,0281	0,0390
x_1 tanino (Q)	-0,0131	0,0032	-4,0846	0,0047	-0,0192	-0,0070
x_2 pH (L)	-0,0388	0,0029	-13,4862	< 0,0001	-0,0442	-0,0333
x_2 pH (Q)	-0,0159	0,0032	-4,9318	0,0017	-0,0219	-0,0098

Fonte: Autoria própria.

O modelo reparametrizado é representado pela equação 5.

Equação 5 - Remoção de cor reparametrizado pelo processo FAD utilizando tanino

$$\text{Remoção de Cor} = 0,8661 + 0,0335 x_1 - 0,0131 x_1^2 - 0,0388 x_2 - 0,0159 x_2^2$$

x_1 – Concentração de Tanino (mg.L^{-1});

x_2 – pH.

A tabela 26 apresenta os valores experimentais e os previstos pelo modelo para a remoção de cor. Também, apresenta os erros de ajuste e os erros relativos para cada ensaio do DCCR.

Tabela 26 - Valores de remoção de cor experimentais, previstas pelo modelo e desvios para o DCCR

Ensaio	Remoção de Cor experimental	Remoção de Cor prevista	Erro de Ajuste	Erro relativo (%)
1	0,8475	0,8424	0,0050	0,59
2	0,9019	0,9095	-0,0075	-0,83
3	0,7525	0,7649	-0,0123	-1,63
4	0,8319	0,8319	0,0000	0,001
5	0,7961	0,7925	0,0036	0,45
6	0,8911	0,8873	0,0038	0,42
7	0,8895	0,8893	0,0002	0,02
8	0,7868	0,7796	0,0072	0,91
9	0,8677	0,8661	0,0016	0,17
10	0,8568	0,8661	-0,0093	-1,08
11	0,8739	0,8661	0,0078	0,89
12	0,8661	0,8661	0,0000	0,00

Fonte: Autoria própria.

Na região estudada os erros relativos que apresentaram o maior percentual foram os ensaios 3, 10 (-1,63% e -1,08%, respectivamente). Em valores de unidade de cor este percentual representa 8 e 6 UC respectivamente.

5.2 RESPOSTA TURBIDEZ

Para a variável resposta turbidez todos os termos foram significativos. A tabela 27 apresenta o cálculo da ANOVA.

Tabela 27 - ANOVA para a resposta turbidez reparametrizado

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor	R ²
Regressão	0,0109	5	0,0022	30,9633	< 0,0003	96,27 %
Resíduos	0,0004	6	0,0001			
Total	0,0113	11				

Fonte: Autoria própria.

Analisando a tabela 27, verifica-se que a porcentagem de variação explicada (R²) foi de 96,27% e o p-valor (< 0,0003). Os valores de R² e p-valor são significativos, o que indica que o modelo se ajusta aos dados experimentais.

O F_{tab} foi obtido através da tabela de limites unilaterais da distribuição F de Fisher-Snedecor ao nível de 10% de probabilidade, onde na variável 1 foi utilizado o

valor do grau de liberdade da regressão e na variável 2 o valor do grau de liberdade dos resíduos, o que resultou em um $F_{tab} = F_{5;6;0,10} = 3,11$. Como o F_{cal} foi de 30,9633 (tabela 27) o “Teste F” para regressão atende a prerrogativa de $F_{cal} > F_{tab}$, indicando que o modelo é representativo.

A equação 6 caracteriza o modelo de remoção de turbidez (vide tabela 28).

Equação 6 - Remoção de turbidez pelo processo FAD utilizando tanino

Remoção de Turbidez

$$= 0,9593 + 0,0250 x_1 - 0,0131 x_1^2 - 0,0210 x_2 - 0,0121 x_2^2 + 0,0126 x_1 x_2$$

x_1 – Concentração de Tanino (mg.L^{-1});

x_2 – pH.

Tabela 28 - Coeficientes de regressão para a resposta turbidez

Fatores	Coeficientes de regressão	Erro padrão	t(6)	p - valor	Estimativas por Intervalo (90%)	
					Limite Inferior	Limite Superior
Média	0,9593	0,0042	228,9591	< 0,0001	0,9512	0,9674
x_1 tanino (L)	0,0250	0,0030	8,4428	0,0002	0,0193	0,0308
x_1 tanino (Q)	-0,0131	0,0033	-3,9493	0,0075	-0,0195	-0,0066
x_2 pH (L)	-0,0210	0,0030	-7,0949	0,0004	-0,0268	-0,0153
x_2 pH (Q)	-0,0121	0,0033	-3,6567	0,0106	-0,0185	-0,0057
$x_1 * x_2$ tanino (L)*pH (L)	0,0126	0,0042	3,0065	0,0238	0,0045	0,0207

Fonte: Autoria própria.

A tabela 29 apresenta os valores experimentais e os previstos pelo modelo para a remoção de turbidez. Também apresenta os erros de ajuste e os erros relativos para cada ensaio do DCCR.

Tabela 29 - Valores de remoção de turbidez experimentais, previstas pelo modelo e desvios para o DCCR

Ensaio	Remoção de Turbidez experimental	Remoção de Turbidez prevista	Erro de Ajuste	Erro relativo (%)
1	0,9380	0,9427	-0,0047	-0,50
2	0,9690	0,9675	0,0014	0,14
3	0,8643	0,8755	-0,0111	-1,28
4	0,9457	0,9507	-0,0050	-0,52
5	0,9070	0,8978	0,0092	1,01

Ensaio	Remoção de Turbidez experimental	Remoção de Turbidez prevista	Erro de Ajuste	Erro relativo (%)
6	0,9690	0,9685	0,0005	0,04
7	0,9651	0,9648	0,0003	0,03
8	0,9147	0,9054	0,0094	1,02
9	0,9574	0,9593	-0,0019	-0,20
10	0,9535	0,9593	-0,0058	-0,60
11	0,9651	0,9593	0,0058	0,60
12	0,9612	0,9593	0,0019	0,20

Fonte: Autoria própria.

Na região estudada os erros relativos que apresentaram o maior percentual foram os ensaios 3, 5, 8 (-1,28%; 1,01%; 1,02%, respectivamente). Em valores de unidade nefelométrica de turbidez este percentual representa 3, 2, 2 UNT respectivamente.

5.3 RESPOSTA DQO

No caso da variável resposta DQO, o coagulante tanino linear e a interação entre o coagulante tanino e o pH não foram significativos pelo método estatístico utilizado, sendo incorporado aos resíduos para cálculo da ANOVA (tabela 30).

Tabela 30 - ANOVA para a resposta DQO reparametrizado

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor	R ²
Regressão	0,0113	3	0,0038	9,8274	< 0,0046	78,66 %
Resíduos	0,0031	8	0,0004			
Total	0,0144	11				

Fonte: Autoria própria.

Analisando a tabela 30, verifica-se que a porcentagem de variação explicada (R²) foi de 78,66% e o p-valor (< 0,0046). Os valores de R² e p-valor são significativos, o que indica que o modelo se ajusta aos dados experimentais.

O F_{tab} foi obtido através da tabela de limites unilaterais da distribuição F de Fisher-Snedecor ao nível de 10% de probabilidade, onde na variável 1 foi utilizado o valor do grau de liberdade da regressão e na variável 2 o valor do grau de liberdade

dos resíduos, o que resultou em um $F_{\text{tab}} = F_{3;8;0,10} = 2,92$. Como o F_{cal} foi de 9,8274 (tabela 30) o “Teste F” para regressão atende a prerrogativa de $F_{\text{cal}} > F_{\text{tab}}$, indicando que o modelo é representativo.

A tabela 31 apresenta os coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta DQO.

Tabela 31 - Coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta DQO

Fatores	Coeficientes de regressão	Erro padrão	t(8)	p - valor	Estimativas por Intervalo (90%)	
					Limite Inferior	Limite Superior
Média	0,5163	0,0098	52,6730	0,0000	0,4980	0,5345
x_1 tanino (Q)	0,0207	0,0077	2,6689	0,0284	0,0063	0,0351
x_2 pH (L)	-0,0262	0,0069	-3,7840	0,0054	-0,0391	-0,0133
x_2 pH (Q)	0,0257	0,0077	3,3120	0,0107	0,0113	0,0401

Fonte: Autoria própria.

O modelo reparametrizado é representado pela equação 7.

Equação 7 - Remoção de DQO reparametrizado pelo processo FAD utilizando tanino

$$\text{Remoção de DQO} = 0,5163 + 0,0207 x_1^2 - 0,0262 x_2 + 0,0257 x_2^2$$

x_1 – Concentração de Tanino (mg.L^{-1});

x_2 – pH.

A tabela 32 apresenta os valores experimentais e os previstos pelo modelo para a remoção de DQO. Também apresenta os erros de ajuste e os erros relativos para cada ensaio do DCCR.

Tabela 32 - Valores de remoção de DQO experimentais, previstas pelo modelo e desvios para o DCCR

Ensaio	Remoção de DQO experimental	Remoção de DQO prevista	Erro de Ajuste	Erro relativo (%)
1	0,5661	0,5888	-0,0227	-4,01
2	0,5900	0,5888	0,0012	0,20
3	0,5063	0,5364	-0,0301	-5,94
4	0,5302	0,5364	-0,0062	-1,16
5	0,5781	0,5576	0,0204	3,53

Ensaio	Remoção de DQO experimental	Remoção de DQO prevista	Erro de Ajuste	Erro relativo (%)
6	0,5661	0,5576	0,0085	1,49
7	0,6139	0,6047	0,0093	1,50
8	0,5502	0,5305	0,0196	3,57
9	0,5143	0,5163	-0,0020	-0,38
10	0,4983	0,5163	-0,0179	-3,60
11	0,5183	0,5163	0,0020	0,38
12	0,5342	0,5163	0,0179	3,35

Fonte: Autoria própria.

Na região estudada os erros relativos que apresentaram o maior percentual foram os ensaios 1, 3, 5, 8, 10, 12 (-4,01%; -5,94%; 3,53%; 3,57%; -3,60%; 3,35%, respectivamente). Em valores de mg.L^{-1} de DQO este percentual representa 6, 9, 5, 5, 5 mg.L^{-1} respectivamente.

5.4 RESPOSTA SST

No caso da variável resposta sólidos suspensos totais, o coagulante tanino e pH quadráticos não foram significativos pelo método estatístico utilizado, sendo incorporado aos resíduos para cálculo da ANOVA (tabela 33).

Tabela 33 - ANOVA para a resposta SST reparametrizado

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor	R^2
Regressão	0,1180	3	0,0393	11,5092	< 0,0028	81,19 %
Resíduos	0,0273	8	0,0034			
Total	0,1453	11				

Fonte: Autoria própria.

Analisando a tabela 33, verifica-se que a porcentagem de variação explicada (R^2) foi de 81,19% e o p-valor (< 0,0028). Os valores de R^2 e p-valor são significativos, o que indica que o modelo se ajusta aos dados experimentais.

O F_{tab} foi obtido através da tabela de limites unilaterais da distribuição F de Fisher-Snedecor ao nível de 10% de probabilidade, onde na variável 1 foi utilizado o

valor do grau de liberdade da regressão e na variável 2 o valor do grau de liberdade dos resíduos, o que resultou em um $F_{\text{tab}} = F_{3;8;0,10} = 2,92$. Como o F_{cal} foi de 11,5092 (tabela 33) o “Teste F” para regressão atende a prerrogativa de $F_{\text{cal}} > F_{\text{tab}}$, indicando que o modelo é representativo.

A tabela 34 apresenta os coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta SST.

Tabela 34 - Coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta SST

Fatores	Coeficientes de regressão	Erro padrão	t(8)	p - valor	Estimativas por Intervalo (90%)	
					Limite Inferior	Limite Superior
Média	0,8235	0,0169	48,8011	< 0,0001	0,7921	0,8549
x_1 tanino (L)	0,0857	0,0207	4,1471	0,0032	0,0473	0,1241
x_2 pH (L)	-0,0753	0,0207	-3,6440	0,0066	-0,1137	-0,0369
$x_1 * x_2$ tanino (L)*pH (L)	0,0588	0,0292	2,0125	0,0790	0,0045	0,1132

Fonte: Autoria própria.

O modelo reparametrizado é representado pela equação 8.

Equação 8 - Remoção de SST reparametrizado pelo processo FAD utilizando tanino

$$\text{Remoção de SST} = 0,8235 + 0,0857 x_1 - 0,0753 x_2 + 0,0588 x_1 x_2$$

x_1 – Concentração de Tanino (mg.L^{-1});

x_2 – pH.

A tabela 35 apresenta os valores experimentais e os previstos pelo modelo para a remoção de SST. Também apresenta os erros de ajuste e os erros relativos para cada ensaio do DCCR.

Tabela 35 - Valores de remoção de SST experimentais, previstas pelo modelo e desvios para o DCCR

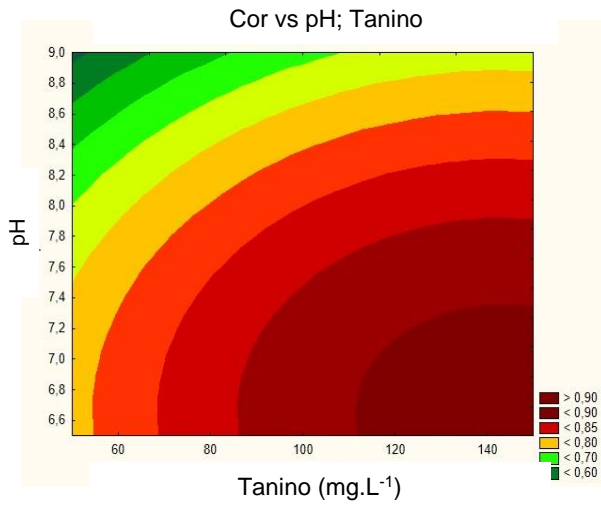
Ensaio	Remoção de SST experimental	Remoção de SST prevista	Erro de Ajuste	Erro relativo (%)
1	0,8235	0,8720	-0,0484	-5,88
2	0,8824	0,9257	-0,0434	-4,91
3	0,5294	0,6037	-0,0743	-14,02
4	0,8235	0,8928	-0,0692	-8,40
5	0,7059	0,7023	0,0036	0,50
6	0,9412	0,9447	-0,0036	-0,37
7	0,9412	0,9300	0,0111	1,18
8	0,7647	0,7170	0,0477	6,23
9	0,8235	0,8235	0,0000	0,00
10	0,8824	0,8235	0,0588	6,66
11	0,8824	0,8235	0,0588	6,66
12	0,8824	0,8235	0,0588	6,66

Fonte: Autoria própria.

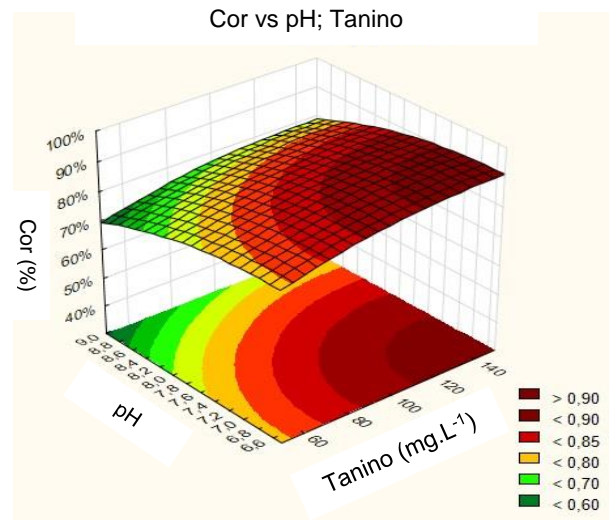
Na região estudada os erros relativos que apresentaram o maior percentual foram os ensaios 3, 4, 8, 10, 11, 12 (-14,02%; -8,40%; 6,23%; 6,66%; 6,66%; 6,66%, respectivamente). Em valores de mg.L^{-1} de SST este percentual representa 6, 5, 3, 4, 4, 4 mg.L^{-1} respectivamente.

5.5 CURVAS DE CONTORNO E SUPERFÍCIE DE RESPOSTA PARA O ENSAIO FAD COM TANINO

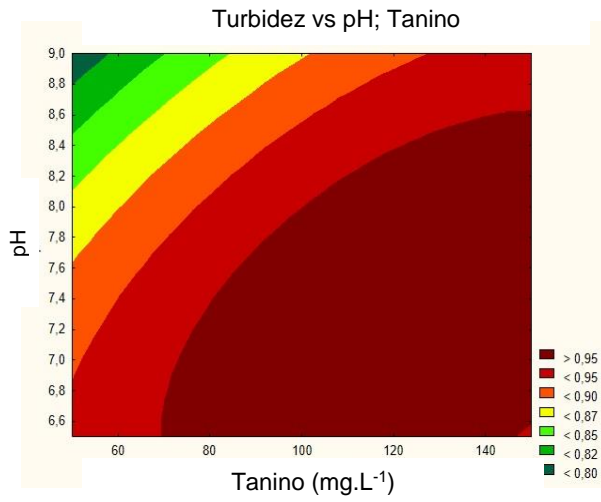
As curvas de contorno e a superfície de resposta das variáveis resposta cor aparente, turbidez, DQO e SST apresentam a influência de tanino e pH na faixa de concentração estudada. A concentração de tanino utilizado foi de 50 a 150 mg.L^{-1} e o pH de 6,5 a 8,9.



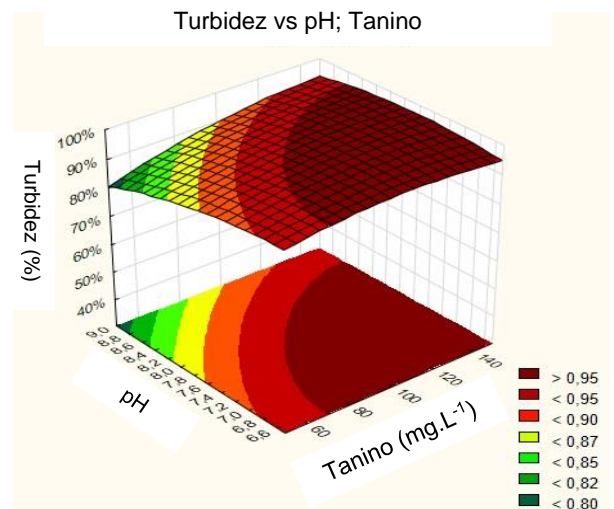
(a)



(b)



(c)



(d)

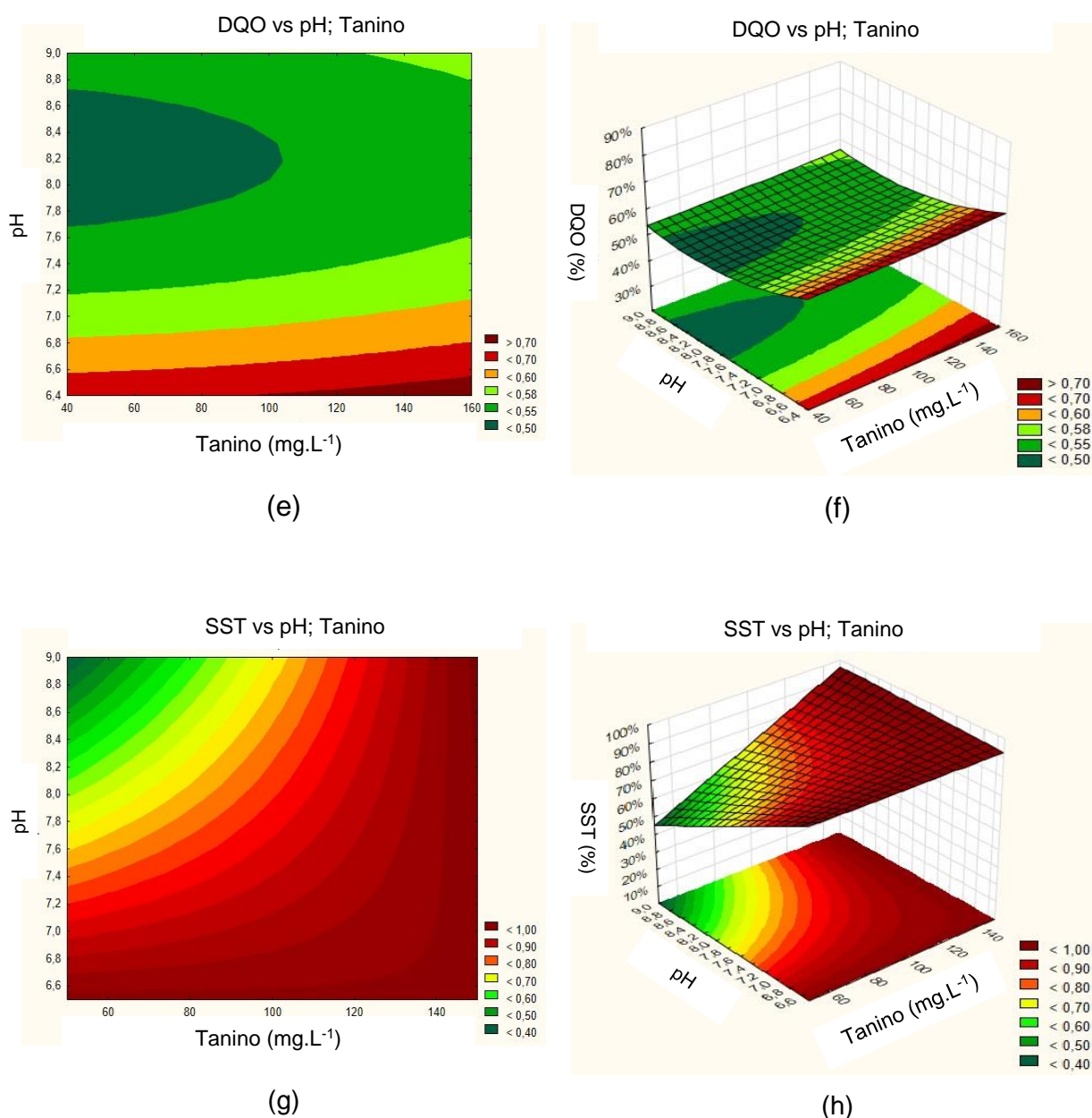


Figura 12 – Ensaio FAD em função de concentração de tanino e pH: Curvas de contorno (a) e Superfície de resposta (b) para a resposta cor; Curvas de contorno (c) e Superfície de resposta (d) para a resposta turbidez; Curvas de contorno (e) e Superfície de resposta (f) para a resposta DQO; Curvas de contorno (g) e Superfície de resposta (h) para a resposta SST
 Fonte: Autoria própria.

A eficiência de remoção de cor aparente relacionada com as variáveis tanino e pH apresentou a maior eficiência (vide Figura 12, itens a, b) em uma área superior a 90% de remoção. Esta área possui valores de concentração de tanino acima de 110 mg.L⁻¹ e pH no intervalo entre 6,5 e 7,3. Mantendo a concentração acima de 110

mg.L⁻¹ e elevando o pH acima de 7,3 tem-se uma perda de eficiência na remoção de cor.

Para a eficiência de remoção da turbidez com as variáveis tanino e pH foi verificado uma área de remoção ótima com eficiência acima de 95%. A área possui valores de dosagem de tanino entre 70 e 150 mg.L⁻¹ e pH entre 6,5 e 8,6 (vide Figura 12, itens c, d). As menores eficiências de remoção da resposta turbidez foram obtidas com dosagens de coagulante abaixo de 65 mg.L⁻¹ e pH acima de 7,7.

A variável DQO apresentou uma área ótima com eficiência de remoção acima de 70%. Esta eficiência é alcançada com a concentração de tanino acima de 100 mg.L⁻¹ e pH na faixa de 6,4 e 6,5 (vide Figura 12, itens e, f). As melhores eficiências de remoção da variável DQO foram com o pH abaixo de 7,0.

A eficiência de remoção de sólidos suspensos totais apresentou área com eficiência superior a 90%. Esta área pode ser dividida em duas partes, em que a primeira corresponde o intervalo de tanino de 50 a 140 mg.L⁻¹ com pH entre 6,5 e 6,6. Na segunda parte a concentração de tanino é maior que 140 mg.L⁻¹ e pH acima de 6,5 (vide Figura 12, itens g, h). As menores eficiências de remoção desta resposta foram obtidas com dosagens de coagulante abaixo de 80 mg.L⁻¹ e pH acima de 8,0.

Eficiências para a remoção de cor, turbidez, DQO utilizando o coagulante tanino foram reportados nos estudos:

a) Martín et al. (2010) tratou efluente da indústria têxtil (simulado por uma solução de 100 mg.L⁻¹ de corante ácido), e de lavanderia (simulado por uma solução de 50 mg.L⁻¹ de surfactante aniônico). Os ensaios foram realizados com concentração de 92,2 mg.L⁻¹ de tanino, pH 7 e temperatura de 20 °C. A eficiência de remoção do corante nas águas residuais da indústria têxtil foi de 95% e no caso da lavanderia conseguiu remover 80% dos surfactantes.

b) Junior et al. (2013) tratou efluente da indústria têxtil com o parâmetro de qualidade cor, turbidez, DQO e pH na faixa de: 7392 a 31185 UC; 1722 a 7902 FTU; 1410,3 a 6977,60 mg.L⁻¹ e 7,19 a 7,49 respectivamente. Os ensaios foram realizados com diferentes dosagens de tanino 100, 200, 400, 600, 800 mg.L⁻¹. A eficiência de 99,17%; 99,65% e 94,81% de remoção de cor, turbidez, DQO respectivamente foram obtidas utilizando 400 mg.L⁻¹ de tanino.

c) Nas pesquisas de Ströher et al. (2013) foi realizado o tratamento de efluente de lavagem de jeans com o parâmetro de qualidade cor, turbidez, DQO, pH igual a 1400 UC; 375 FAU; 491 mg.L⁻¹ e 6,89 respectivamente. Os ensaios foram realizados com diferentes dosagens de tanino 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150 mg.L⁻¹. Foram obtidas eficiências de remoção de 95,20%; 98,40% e 60,50% de cor, turbidez e DQO respectivamente utilizando 100 mg.L⁻¹ de tanino.

Nas pesquisas analisadas a eficiência de remoção de cor e turbidez foram superiores ao obtido neste estudo. Entretanto, alguns parâmetros utilizados por estes pesquisadores diferenciaram do presente estudo, como por exemplo: a) concentração de tanino Junior et al. (2013); b) tipo de efluente, em que, Martín et al., (2010) tratou solução de corante têxtil. O estudo de Ströher et al., (2013) apresentou os parâmetros dos ensaios semelhante ao do presente estudo.

A pesquisa de Junior et al. (2013) apresentou eficiência de remoção de DQO superior do que este estudo, entretanto, a concentração de tanino utilizada foi maior. No estudo de Ströher et al., (2013) a eficiência de remoção de DQO e os parâmetros dos ensaios foram semelhantes ao do presente estudo.

Comparando as curvas de contorno e a superfície de resposta produzidas para as respostas cor, turbidez, DQO, SST foi verificada uma área de máxima eficiência de remoção para estas respostas com valores de concentração de tanino no intervalo de 140 a 150 mg.L⁻¹ e pH no intervalo de 6,5 a 7,0 (vide Figuras 12, itens a, b, c, d, e, f, g).

O valor observado nas melhores eficiências de remoção das respostas cor, turbidez, DQO e SST para a variável pH do presente estudo está de acordo com estudos de Martinez (1996); Martinez et al., (1997) e com as orientações da Tanac em que o tanino é mais efetivo na faixa de pH de 4,5 a 8,0.

6. RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISE DO PROCESSO FAD COM COAGULANTE PAC E POLÍMERO

A caracterização físico-química das amostras de efluente bruto submetidas aos ensaios de FAD com os coagulantes PAC e polímero apresentaram os seguintes parâmetros de qualidade da tabela 36.

Tabela 36 - Parâmetros de qualidade do efluente bruto

Parâmetros de Qualidade	
Cor Aparente (UC)	433 ± 1
Turbidez (UNT)	63 ± 1
Demanda Química de Oxigênio (mg.L ⁻¹)	263 ± 2
Sólidos Suspensos Totais (mg.L ⁻¹)	106,67 ± 2
pH	7,51 ± 0,01
Condutividade (mS.cm ⁻¹)	6,84 ± 0,01
Temperatura (°C)	24 ± 2

Fonte: Autoria própria.

Após o tratamento (tabela 37) foram obtidas faixas de valores para cada variável: a cor aparente variou entre 30 e 110 UC, a turbidez entre 4 e 16 UNT, a DQO entre 74,06 e 116,14 mg.L⁻¹, os SST entre 12,0 e 48,0 mg.L⁻¹, o pH entre 6,18 e 7,36 e a condutividade entre 6,24 e 7,10 mS.cm⁻¹.

Tabela 37 - Delineamento experimental com valores codificados e respostas quanto a eficiência da remoção do processo FAD utilizando PAC e Polímero

Ensaio S	Valores codificados		Dosa-gem de PAC	Dosa-gem de polímero	Cor	Turbidez	DQO	SST	pH	Condutividade
	x1	x2	(mL.L ⁻¹)	(mg.L ⁻¹)	(UC)	(UNT)	(mg.L ⁻¹)	(mg.L ⁻¹)	-	(mS.cm ⁻¹)
1	-1	-1	0,5	6,34	110	16	91,39	48,00	6,82	6,68
2	1	-1	1,0	6,34	53	10	74,06	24,00	6,18	6,51
3	-1	1	0,5	10,86	51	6	107,48	16,00	7,02	6,80
4	1	1	1,0	10,86	35	9	106,24	20,00	6,47	6,70
5	-1,4142	0	0,4	8,60	98	16	111,19	28,00	7,36	6,45
6	1,4142	0	1,1	8,60	51	4	87,67	12,00	6,41	6,84
7	0	-1,4142	0,75	5,43	72	10	101,29	20,00	6,69	6,24
8	0	1,4142	0,75	11,77	30	4	116,14	12,00	6,78	7,10

Ensaio s	Valores codificados		Dosa- gem de PAC	Dosa- gem de polímero	Cor	Turbidez	DQO	SST	pH	Condutivi- dade
	x1	x2	(mL.L ⁻¹)	(mg.L ⁻¹)	(UC)	(UNT)	(mg.L ⁻¹)	(mg.L ⁻¹)	-	(mS.cm ⁻¹)
9	0	0	0,75	8,60	95	15	81,49	24,00	7,25	6,70
10	0	0	0,75	8,60	90	13	96,34	24,00	7,25	6,75
11	0	0	0,75	8,60	78	13	81,49	20,00	6,71	6,80
12	0	0	0,75	8,60	81	12	88,91	28,00	6,76	6,85

Fonte: Autoria própria.

A tabela 38 apresenta a eficiência de remoção das variáveis: cor aparente, turbidez, DQO e SST. Os pontos centrais (ensaios 9, 10, 11 e 12) para as duas respostas apresentaram um desvio padrão de 1,8; 2,0; 2,7; 3,1 para as variáveis resposta cor, turbidez, DQO e SST respectivamente.

Tabela 38 - Resultados da eficiência de remoção

Ensaio	Eficiência de remoção (%)			
	Cor	Turbidez	DQO	SST
1	75	74,60	65,3	55,0
2	88	84,13	71,8	77,5
3	88	90,48	59,1	85,0
4	92	85,71	59,6	81,3
5	77	74,60	57,7	73,8
6	88	93,65	66,7	88,8
7	83	84,13	61,5	81,3
8	93	93,65	55,8	88,8
9	78	76,19	69,0	77,5
10	79	79,37	63,4	77,5
11	82	79,37	69,0	81,3
12	81	80,95	66,2	73,8

Fonte: Autoria própria.

Os dados apresentaram a existência de normalidade pelo teste estatístico Kolmogorov-Smirnov, onde o D_n apresentado para as variáveis resposta cor, turbidez, DQO e SST foram respectivamente: 0,16422; 0,12331; 0,12822; 0,21630. Para um nível de significância de 10% e total de 12 termos, o valor crítico tabelado

foi de 0,34. Como os D_n das variáveis foram menores que o valor crítico tabelado não existem evidências para rejeitar a hipótese de normalidade dos dados. Assim, pode-se afirmar, com um nível de significância de 10%, que a amostra provém de uma população normal.

Devido a variabilidade intrínseca ao processo de flotação por ar dissolvido utilizando os coagulantes PAC e polímero, foram considerados significativos os parâmetros com p-valor menores que 10% ($p < 0,10$).

Neste trabalho foram descritos os coeficientes do modelo de regressão a partir da matriz codificada. Os termos lineares estão associados a letra (L) e os termos quadráticos com a letra (Q).

6.1 RESPOSTA COR APARENTE

Observa-se pela tabela 39 que o modelo completo da resposta cor, fica caracterizado pela equação 9.

Tabela 39 - Coeficientes de regressão para a resposta cor

Fatores	Coeficientes de regressão	Erro padrão	t(6)	p - valor	Estimativas por Intervalo (90%)	
					Limite Inferior	Limite Superior
Média	0,8012	0,0072	111,8469	< 0,0001	0,7873	0,8152
x_1 PAC (L)	0,0403	0,0051	7,9545	0,0002	0,0305	0,0501
x_1 PAC (Q)	0,0136	0,0057	2,3976	0,0535	0,0026	0,0246
x_2 Polímero (L)	0,0394	0,0051	7,7793	0,0002	0,0296	0,0492
x_2 Polímero (Q)	0,0407	0,0057	7,1928	0,0004	0,0297	0,0517
$x_1 * x_2$ PAC (L)*Polímero (L)	-0,0237	0,0072	-3,3070	0,0163	-0,0376	-0,0098

Fonte: Autoria própria.

Equação 9 - Remoção de cor pelo processo FAD utilizando PAC e polímero

$$\text{Remoção de Cor} = 0,8012 + 0,0403 x_1 + 0,0136 x_1^2 + 0,0394 x_2 + 0,0407 x_2^2 - 0,0237 x_1 x_2$$

x_1 – Concentração de PAC (mL.L^{-1});

x_2 – Concentração de Polímero (mg.L^{-1}).

Para a variável cor aparente todos os termos foram significativos. A tabela 40 apresenta o cálculo da ANOVA.

Tabela 40 - ANOVA para a resposta cor

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor	R^2
Regressão	0,0385	5	0,0077	37,4846	< 0,0002	96,90 %
Resíduos	0,0012	6	0,0002			
Total	0,0397	11				

Fonte: Autoria própria.

Analisando a tabela 40, verifica-se que a porcentagem de variação explicada (R^2) foi de 96,90% e o p-valor (< 0,0002). Os valores de R^2 e p-valor são significativos, o que indica que o modelo se ajusta aos dados experimentais.

O F_{tab} foi obtido através da tabela de limites unilaterais da distribuição F de Fisher-Snedecor ao nível de 10% de probabilidade, onde na variável 1 foi utilizado o valor do grau de liberdade da regressão e na variável 2 o valor do grau de liberdade dos resíduos, o que resultou em um $F_{tab} = F_{5;6;0,10} = 3,11$. Como o F_{cal} foi de 37,4846 (tabela 40) o “Teste F” para regressão atende a prerrogativa de $F_{cal} > F_{tab}$, indicando que o modelo é representativo.

A tabela 41 apresenta os valores experimentais e os previstos pelo modelo para a remoção de cor. Também apresenta os erros de ajuste e os erros relativos para cada ensaio do DCCR.

Tabela 41 - Valores de remoção de cor experimentais, previstas pelo modelo e desvios para o DCCR

Ensaio	Remoção de Cor experimental	Remoção de Cor prevista	Erro de Ajuste	Erro relativo (%)
1	0,7458	0,7522	-0,0064	-0,85
2	0,8775	0,8801	-0,0026	-0,29
3	0,8821	0,8784	0,0038	0,42
4	0,9191	0,9116	0,0075	0,82
5	0,7735	0,7714	0,0021	0,27
6	0,8821	0,8854	-0,0032	-0,36
7	0,8336	0,8270	0,0066	0,79
8	0,9307	0,9384	-0,0078	-0,83
9	0,7804	0,8012	-0,0208	-2,66
10	0,7920	0,8012	-0,0092	-1,16
11	0,8197	0,8012	0,0185	2,25
12	0,8128	0,8012	0,0116	1,42

Fonte: Autoria própria.

Na região estudada os erros relativos que apresentaram o maior percentual foram os ensaios 9, 11 (-2,66% e 2,25%, respectivamente). Em valores de unidade de cor este percentual representa 9 e 8 UC respectivamente.

6.2 RESPOSTA TURBIDEZ

Para a resposta turbidez, não foram significativos o PAC quadrático e a interação entre PAC e polímero, tendo sido incorporados aos resíduos para cálculo da ANOVA (tabela 42).

Tabela 42 - ANOVA para a resposta turbidez reparametrizado

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor	R^2
Regressão	0,0346	3	0,0115	5,6049	< 0,0229	67,76 %
Resíduos	0,0165	8	0,0021			
Total	0,0511	11				

Fonte: Autoria própria.

Analisando a tabela 42, verifica-se que a porcentagem de variação explicada (R^2) foi de 67,76% e o p-valor (< 0,0229). Os valores de R^2 e p-valor são significativos, o que indica que o modelo se ajusta aos dados experimentais.

O F_{tab} foi obtido através da tabela de limites unilaterais da distribuição F de Fisher-Snedecor ao nível de 10% de probabilidade, onde na variável 1 foi utilizado o valor do grau de liberdade da regressão e na variável 2 o valor do grau de liberdade dos resíduos, o que resultou em um $F_{tab} = F_{3;8;0,10} = 2,92$. Como o F_{cal} foi de 5,6049 (tabela 42), o “Teste F” para regressão atende a prerrogativa de $F_{cal} > F_{tab}$, indicando que o modelo é representativo.

A tabela 43 mostra os coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta turbidez.

Tabela 43 - Coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta turbidez

Fatores	Coeficientes de regressão	Erro padrão	t(8)	p - valor	Estimativas por Intervalo (90%)	
					Limite Inferior	Limite Superior
Média	0,8048	0,0176	45,8061	< 0,0001	0,7721	0,8374
x ₁ PAC (L)	0,0396	0,0160	2,4706	0,0387	0,0098	0,0694
x ₂ Polímero (L)	0,0387	0,0160	2,4106	0,0425	0,0088	0,0685
x ₂ Polímero (Q)	0,0389	0,0176	2,2135	0,0578	0,0062	0,0716

Fonte: Autoria própria.

O modelo reparametrizado é representado pela equação 10.

Equação 10 - Remoção de turbidez reparametrizado pelo processo FAD utilizando PAC e polímero
 $Remoção\ de\ Turbidez = 0,8048 + 0,0396 x_1 + 0,0387 x_2 + 0,0389 x_2^2$

x₁ – Concentração de PAC (mL.L⁻¹);

x₂ – Concentração de Polímero (mg.L⁻¹).

A tabela 44 apresenta os valores experimentais e os previstos pelo modelo para a remoção de turbidez. Também apresenta os erros de ajuste e os erros relativos para cada ensaio do DCCR.

Tabela 44 - Valores de remoção de turbidez experimentais, previstas pelo modelo e desvios para o DCCR

Ensaio	Remoção de Turbidez experimental	Remoção de Turbidez prevista	Erro de Ajuste	Erro relativo (%)
1	0,7460	0,7654	-0,0193	-2,59
2	0,8413	0,8446	-0,0033	-0,39
3	0,9048	0,8427	0,0621	6,86
4	0,8571	0,9219	-0,0648	-7,55
5	0,7460	0,7487	-0,0027	-0,36
6	0,9365	0,8608	0,0757	8,08
7	0,8413	0,8279	0,0134	1,59
8	0,9365	0,9372	-0,0007	-0,07
9	0,7619	0,8048	-0,0429	-5,62
10	0,7937	0,8048	-0,0111	-1,40
11	0,7937	0,8048	-0,0111	-1,40
12	0,8095	0,8048	0,0048	0,58

Fonte: Autoria própria.

Na região estudada os erros relativos que apresentaram o maior percentual foram os ensaios 3, 4, 6, 9 (6,86%; -7,55%; 8,08%; -5,62%, respectivamente). Em

valores de unidade nefelométrica de turbidez este percentual representa 4, 4, 5, 3 UNT respectivamente.

6.3 RESPOSTA DQO

No caso da variável DQO, o PAC quadrático e a interação entre PAC e polímero não foram significativos pelo método estatístico utilizado, sendo incorporado aos resíduos para cálculo da ANOVA (tabela 45).

Tabela 45 - ANOVA para a resposta DQO reparametrizado

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor	R^2
Regressão	0,0193	3	0,0064	5,8882	< 0,0201	68,83 %
Resíduos	0,0087	8	0,0011			
Total	0,0280	11				

Fonte: Autoria própria

Analisando a tabela 45, verifica-se que a porcentagem de variação explicada (R^2) foi de 68,83% e o p-valor (< 0,0201). Os valores de R^2 e p-valor são significativos, o que indica que o modelo se ajusta aos dados experimentais.

O F_{tab} foi obtido através da tabela de limites unilaterais da distribuição F de Fisher-Snedecor ao nível de 10% de probabilidade, onde na variável 1 foi utilizado o valor do grau de liberdade da regressão e na variável 2 o valor do grau de liberdade dos resíduos, o que resultou em um $F_{tab} = F_{3;8;0,10} = 2,92$. Como o F_{cal} foi de 5,8882 (tabela 45) o “Teste F” para regressão atende a prerrogativa de $F_{cal} > F_{tab}$, indicando que o modelo é representativo.

A tabela 46 apresenta os coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta DQO.

Tabela 46 - Coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta DQO

Fatores	Coeficientes de regressão	Erro padrão	t(8)	p - valor	Estimativas por Intervalo (90%)	
					Limite Inferior	Limite Superior
Média	0,6572	0,0128	51,3515	0,0000	0,6334	0,6810
x ₁ PAC (L)	0,0246	0,0117	2,1080	0,0681	0,0029	0,0464
x ₂ Polímero (L)	-0,0329	0,0117	-2,8179	0,0226	-0,0546	-0,0112
x ₂ Polímero (Q)	-0,0294	0,0128	-2,2979	0,0506	-0,0532	-0,0056

Fonte: Autoria própria.

O modelo reparametrizado é representado pela equação 11.

Equação 11 - Remoção de DQO reparametrizado pelo processo FAD utilizando PAC e polímero

$$\text{Remoção de DQO} = 0,6572 + 0,0246 x_1 - 0,0329 x_2 - 0,0294 x_2^2$$

x₁ – Concentração de PAC (mL.L⁻¹);

x₂ – Concentração de Polímero (mg.L⁻¹).

A tabela 47 apresenta os valores experimentais e os previstos pelo modelo para a remoção de DQO. Também apresenta os erros de ajuste e os erros relativos para cada ensaio do DCCR.

Tabela 47 - Valores de remoção de DQO experimentais, previstas pelo modelo e desvios para o DCCR

Ensaio	Remoção de DQO experimental	Remoção de DQO prevista	Erro de Ajuste	Erro relativo (%)
1	0,6525	0,6361	0,0164	2,51
2	0,7184	0,6854	0,0330	4,59
3	0,5914	0,5703	0,0211	3,51
4	0,5961	0,6195	-0,0235	-3,93
5	0,5772	0,6224	-0,0452	-7,82
6	0,6666	0,6921	-0,0254	-3,81
7	0,6149	0,6450	-0,0301	-4,89
8	0,5584	0,5519	0,0066	1,17
9	0,6902	0,6572	0,0329	4,77
10	0,6337	0,6572	-0,0235	-3,71
11	0,6902	0,6572	0,0329	4,77
12	0,6619	0,6572	0,0047	0,71

Fonte: Autoria própria.

Na região estudada os erros relativos que apresentaram o maior percentual foram os ensaios 2, 5, 7, 9, 11 (4,59%; -7,82%; -4,89%; 4,77% e 4,77%, respectivamente). Em valores de mg.L^{-1} de DQO este percentual representa 10; 12; 7; 10; 10 mg.L^{-1} respectivamente.

6.4 RESPOSTA SST

No caso da variável resposta sólidos suspensos totais não foram significativos o PAC e polímero quadrático, sendo incorporado aos resíduos para cálculo da ANOVA (tabela 48).

Tabela 48 - ANOVA para a resposta SST reparametrizado

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor	R^2
Regressão	0,0618	3	0,0206	6,3970	< 0,0161	70,58 %
Resíduos	0,0258	8	0,0032			
Total	0,0875	11				

Fonte: Autoria própria.

Analisando a tabela 48, verifica-se que a porcentagem de variação explicada (R^2) foi de 70,58% e o p-valor (< 0,0161). Os valores de R^2 e p-valor são significativos, o que indica que o modelo se ajusta aos dados experimentais.

O F_{tab} foi obtido através da tabela de limites unilaterais da distribuição F de Fisher-Snedecor ao nível de 10% de probabilidade, onde na variável 1 foi utilizado o valor do grau de liberdade da regressão e na variável 2 o valor do grau de liberdade dos resíduos, o que resultou em um $F_{\text{tab}} = F_{3;8;0,10} = 2,92$. Como o F_{cal} foi de 6,3970 (tabela 48) o “Teste F” para regressão atende a prerrogativa de $F_{\text{cal}} > F_{\text{tab}}$ indicando que o modelo é representativo.

A tabela 49 apresenta os coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta SST.

Tabela 49 - Coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta SST

Fatores	Coeficientes de regressão	Erro padrão	t(8)	p - valor	Estimativas por Intervalo (90%)	
					Limite Inferior	Limite Superior
Média	0,7844	0,0164	47,8879	< 0,0001	0,7539	0,8148
x ₁ PAC (L)	0,0500	0,0201	2,4902	0,0375	0,0127	0,0873
x ₂ Polímero (L)	0,0554	0,0201	2,7639	0,0245	0,0181	0,0927
x ₁ *x ₂ PAC (L)*Polímero (L)	-0,0656	0,0284	-2,3132	0,0494	-0,1184	-0,0129

Fonte: Autoria própria.

O modelo reparametrizado é representado pela equação 12.

Equação 12 - Remoção de SST reparametrizado pelo processo FAD utilizando PAC e polímero

$$\text{Remoção de SST} = 0,7844 + 0,0500 x_1 + 0,0554 x_2 - 0,0656 x_1 x_2$$

x₁ – Concentração de PAC (mL.L⁻¹);

x₂ – Concentração de Polímero (mg.L⁻¹).

A tabela 50 apresenta os valores experimentais e os previstos pelo modelo para a remoção de SST. Também apresenta os erros de ajuste e os erros relativos para cada ensaio do DCCR.

Tabela 50 - Valores de remoção de SST experimentais, previstas pelo modelo e desvios para o DCCR

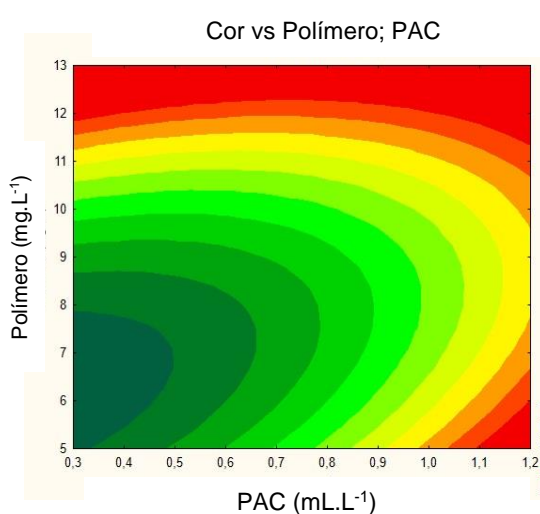
Ensaio	Remoção de SST experimental	Remoção de SST prevista	Erro de Ajuste	Erro relativo (%)
1	0,5500	0,6133	-0,0633	-11,51
2	0,7750	0,8445	-0,0695	-8,96
3	0,8500	0,8555	-0,0055	-0,64
4	0,8125	0,8242	-0,0117	-1,43
5	0,7375	0,7137	0,0238	3,22
6	0,8875	0,8550	0,0325	3,65
7	0,8125	0,7060	0,1065	13,11
8	0,8875	0,8628	0,0247	2,78
9	0,7750	0,7844	-0,0094	-1,20
10	0,7750	0,7844	-0,0094	-1,20
11	0,8125	0,7844	0,0281	3,46
12	0,7375	0,7844	-0,0469	-6,35

Fonte: Autoria própria.

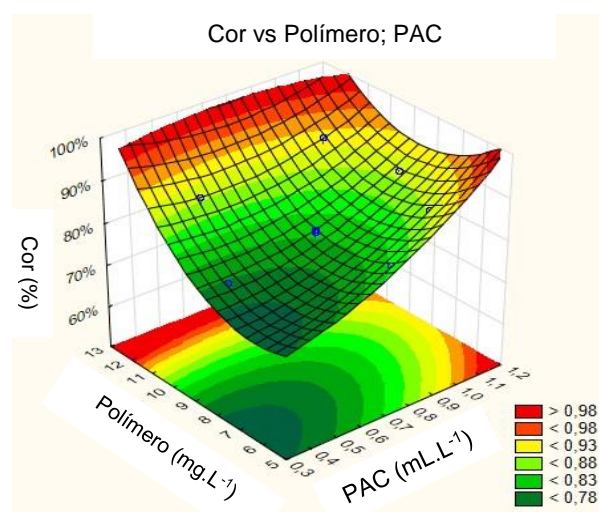
Na região estudada os erros relativos que apresentaram o maior percentual foram os ensaios 1, 2, 7, 12 (-11,51%; -8,96%; 13,11%; -6,35%, respectivamente). Em valores de mg.L^{-1} de SST este percentual representa 8, 7, 12 e 5 mg.L^{-1} respectivamente.

6.5 CURVAS DE CONTORNO E SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

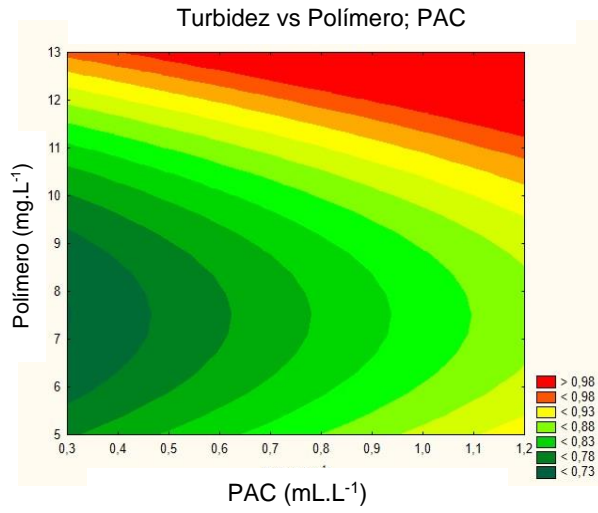
As curvas de contorno e a superfície de resposta das variáveis resposta cor aparente, turbidez, DQO e SST apresentam a influência da variável PAC e polímero na faixa de concentração estudada. A concentração de PAC utilizada foi de 0,40 a 1,10 mL.L^{-1} e o polímero de 5,43 a 11,77 mg.L^{-1} .



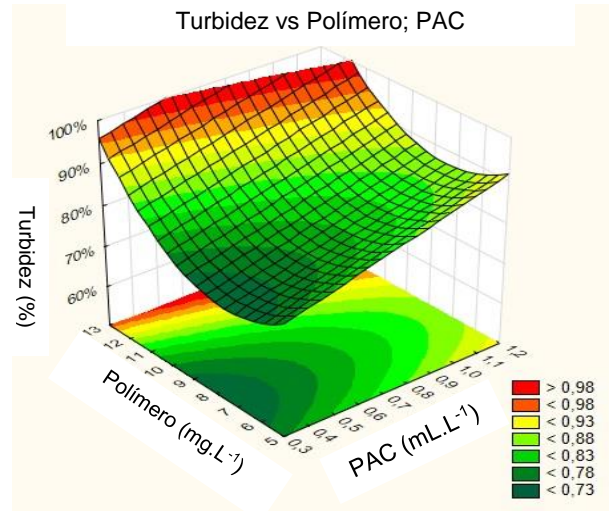
(a)



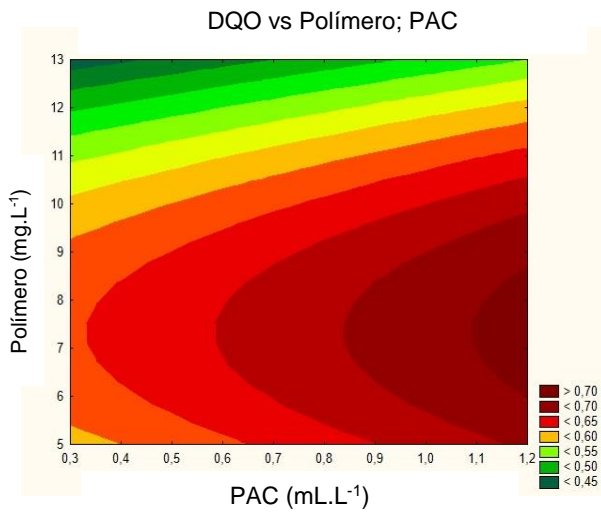
(b)



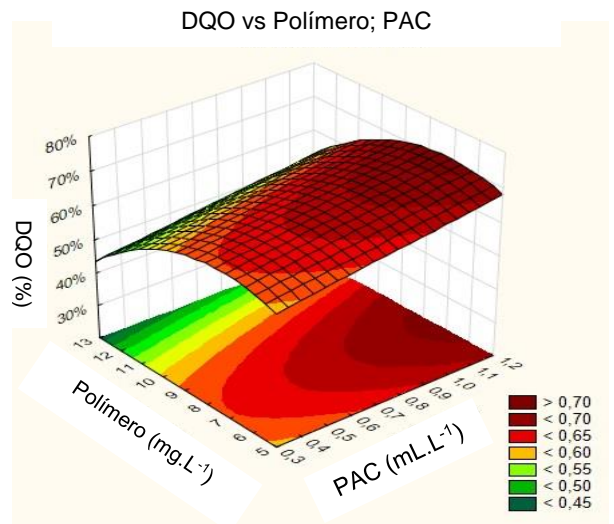
(c)



(d)



(e)



(f)

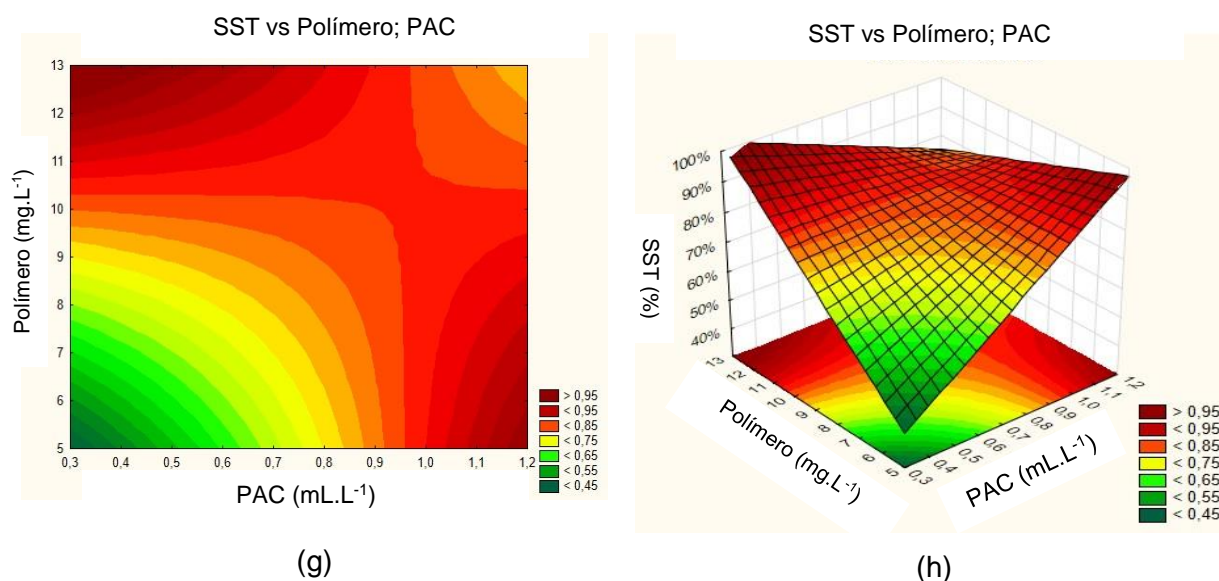


Figura 13 – Ensaio FAD em função de concentração de PAC e Polímero: Curva de contorno (a) e Superfície de resposta (b) para a resposta cor; Curvas de contorno (c) e Superfície de resposta (d) para a resposta turbidez; Curvas de contorno (e) e Superfície de resposta (f) para a resposta DQO; Curvas de contorno (g) e Superfície de resposta (h) para a resposta SST
Fonte: Autoria própria.

A eficiência de remoção de cor aparente relacionada com as variáveis PAC e polímero apresentaram duas áreas com eficiência superior a 98% (vide Figura 13, itens a, b). A primeira destas áreas possui concentrações de polímero acima de 11,5 mg.L⁻¹ e PAC variando em toda a faixa de valores estudada. A segunda foi obtida com a dosagem de polímero no intervalo de 5 e 6 mg.L⁻¹ e PAC acima de 1,10 mL.L⁻¹.

Para a eficiência de remoção da turbidez com as variáveis PAC e polímero foi verificado uma área com eficiência acima de 98%. A área possui dosagens de polímero acima de 11 mg.L⁻¹ e PAC acima de 0,5 mL.L⁻¹. (vide Figura 13, itens c, d).

A variável DQO apresentou uma área ótima com eficiência de remoção acima de 70%. Esta eficiência é alcançada com a concentração do polímero na faixa de 6 a 8,5 mg.L⁻¹ e PAC acima de 1,10 mL.L⁻¹ (vide Figura 13, itens e, f).

A eficiência de remoção de sólidos suspensos totais apresentou duas áreas com eficiência maior que 95%. Uma na qual a concentração de polímero possui valores acima de 12 mg.L⁻¹ e PAC entre 0,3 a 0,5 mL.L⁻¹. A outra área corresponde a dosagens de polímero no intervalo entre 5 a 6 mg.L⁻¹ e PAC com valores acima de 1,15 mL.L⁻¹ (vide Figura 13, itens g, h).

Eficiências para a remoção de cor, turbidez, DQO e SST utilizando PAC e polímero foram reportados nos estudos:

a) Sanghi et al. (2006) tratou soluções de corantes reativo, ácido e direto com concentração de 50 mg.L⁻¹. Os ensaios foram realizados com diferentes dosagens de PAC (0,1; 0,5 e 1,0 mg.L⁻¹) e pH (7,5; 8,5; 9,5). A eficiência máxima obtida foi utilizando 1,0 mg.L⁻¹ de PAC com pH 9,5, em que, o autor obteve 79%, 61% e 95% de remoção de cor para os corantes reativo, ácido e direto respectivamente. Conforme Sanghi et al. (2006) o PAC possui os melhores resultados de remoção de cor com pH na faixa entre 7,0 a 9,5. Quando o valor de pH está no intervalo de 8,5 a 9,5 o PAC proporciona uma maior desestabilização dos corantes alcançando excelentes eficiências de remoção. O pH abaixo de 7,0 e acima de 9,5 o PAC resulta em menores eficiências de remoção.

b) Pioltine e Reali (2011) tratou efluente têxtil com os parâmetros de qualidade cor aparente, turbidez, DQO, SST, e pH igual a: 18000 UC, 1600 UNT, 3700 mg.L⁻¹, 1200 mg.L⁻¹ e 9,0 respectivamente. Os ensaios foram realizados com diferentes dosagens de coagulante (600, 800, 1000 e 1100 mg.L⁻¹) e de polímero catiônico (60, 90, 120 e 130 mg.L⁻¹). As eficiências de remoção: 95%, 96%, 36% e 82% de cor, turbidez, DQO e SST respectivamente foram obtidas utilizando 1000 mg.L⁻¹ de coagulante e 120 mg.L⁻¹ de polímero.

c) Nos estudos de Quartaroli et al. (2014) foram tratados efluentes da indústria de papel e celulose com parâmetro de qualidade de cor aparente, cor verdadeira, turbidez, DQO e pH igual a: 364 UC, 294 UC, 6,18 UNT, 150 mg.L⁻¹ e 7,8 respectivamente. Os ensaios foram realizados com diferentes dosagens de PAC (50, 100, 150, 200, 250 e 300 mg.L⁻¹) e de polímero aniônico (0,25; 0,50; 0,75 e 1,0 mg.L⁻¹). As eficiências de 66%, 83%, 28%, 60% de remoção de cor aparente, cor verdadeira, turbidez e DQO respectivamente foram obtidas utilizando 150 mg.L⁻¹ de PAC e 1 mg.L⁻¹ de polímero.

d) Choo et al., (2007) apud Verma et al., (2012) tratou efluente têxtil contendo corante disperso com o parâmetro de qualidade turbidez variando no intervalo de 25 a 31 UNT e pH entre 7,2 a 7,6. Os ensaios foram realizados com dosagens de PAC na faixa de 1,0 a 10 mg.L⁻¹. A eficiência de 99,9% de remoção de turbidez foi obtido utilizando 10 mg.L⁻¹ de PAC.

Nas pesquisas de (Sanghi et al., 2006; Pioltine e Reali, 2011) apresentaram eficiência de remoção de cor semelhante ao obtido neste estudo. No estudo de Sanghi et al. (2006) foi utilizado concentrações de PAC semelhantes do que foi utilizado neste estudo, contudo, o pH foi superior (9,5). Pioltine e Reali (2011) utilizaram concentrações de coagulante e polímero catiônico superior do que usados neste estudo e pH 9,0.

Nas pesquisas analisadas, exceto na de Quartaroli et al. (2014), apresentaram a eficiência de remoção de turbidez superior ao obtido neste estudo. Entretanto, alguns parâmetros utilizados por estes pesquisadores diferenciaram do presente estudo, como por exemplo: a) concentração de PAC (Choo et al., 2007 apud Verma et al., 2012; Pioltine e Reali, 2011); concentração de polímero (Pioltine e Reali, 2011); c) pH do efluente (Pioltine e Reali, 2011).

O estudo de Quartaroli et al. (2014) apresentou eficiência de remoção de cor e turbidez aparente inferior ao do presente estudo. Em comparação com este estudo, Quartaroli et al. (2014) utilizou concentração superior de PAC, dosagem inferior de polímero aniônico e pH semelhante.

A eficiência de remoção de DQO observada nos estudos foram inferiores ao obtido neste estudo. No estudo de Pioltine e Reali (2011) foi utilizado concentrações de coagulante e polímero catiônico superior do que usados neste estudo e pH 9,0. Em comparação com este estudo, Quartaroli et al. (2014) utilizou concentração superior de PAC, dosagem inferior de polímero aniônico e pH semelhante.

A eficiência de remoção de SST obtida na pesquisa de Pioltine e Reali (2011) é semelhante da obtida neste estudo.

Comparando as curvas de contorno e a superfície de resposta produzidas para as respostas cor aparente, turbidez, DQO, SST é verificado duas situações para a área de máxima eficiência de remoção para estas respostas. A primeira situação é para as respostas cor, turbidez e SST em que é obtido a máxima eficiência de remoção utilizando concentração de polímero acima de 12 mg.L^{-1} e PAC com dosagem de $0,5 \text{ mg.L}^{-1}$ (vide Figuras 13, itens a, b, c, d, g, h). A segunda situação é para as respostas cor, DQO e SST em que é obtido a máxima eficiência de remoção utilizando concentração de 6 mg.L^{-1} de polímero e PAC com dosagem acima de $1,15 \text{ mg.L}^{-1}$ (vide Figuras 13 itens a, b, e, f, g, h).

7. RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISE DO PROCESSO FAD COM COAGULANTE MORINGA

A caracterização físico-química das amostras de efluente bruto submetidas aos ensaios de FAD com o coagulante moringa apresentaram os parâmetros de qualidade da tabela 51.

Tabela 51 - Parâmetros de qualidade do efluente bruto

Parâmetros de Qualidade	
Cor Aparente (UC)	551 ± 1
Turbidez (UNT)	70 ± 1
Demanda Química de Oxigênio (mg.L ⁻¹)	289 ± 2
Sólidos Suspensos Totais (mg.L ⁻¹)	106 ± 2
pH	7,94 ± 0,01
Condutividade (mS.cm ⁻¹)	6,73 ± 0,01
Temperatura	24 ± 2

Fonte: Autoria própria.

Após o tratamento (tabela 52) foram obtidas faixas de valores para cada variável: a cor aparente variou entre 194 e 297 UC, a turbidez entre 14 e 46 UNT, a DQO entre 173,02 e 238,11 mg.L⁻¹, os SST entre 40,0 e 76,0 mg.L⁻¹, o pH entre 5,01 e 9,04 e a condutividade entre 6,05 e 6,48 mS.cm⁻¹.

Tabela 52 - Delineamento experimental com valores codificados e respostas quanto a eficiência da remoção do processo FAD utilizando Moringa

Ensaio s	Valores codificados		Dosage m de moringa (mg.L ⁻¹)	pH inicial	Cor (UC)	Turbi- dez (UNT)	DQO (mg.L ⁻¹)	SST (mg.L ⁻¹)	pH final	Condutivida- de (mS.cm ⁻¹)
	x1	x2								
1	-1	-1	129,3	5,6	297	46	233,10	76,00	5,6	6,15
2	1	-1	270,7	5,6	245	25	238,11	52,00	5,6	6,48
3	-1	1	129,3	8,4	248	21	188,04	44,00	8,4	6,05
4	1	1	270,7	8,4	216	18	209,07	44,00	8,4	6,45
5	-1,4142	0	100,0	7,0	252	23	188,04	52,00	7,0	6,05
6	1,4142	0	300,0	7,0	201	17	190,04	48,00	7,0	6,45
7	0	-1,4142	200,0	5,0	277	30	214,08	56,00	5,0	6,35
8	0	1,4142	200,0	9,0	239	19	187,04	44,00	9,0	6,17

Ensaio s	Valores codificados		Dosage m de moringa (mg.L ⁻¹)	pH inicial -	Cor (UC)	Turbi- dez (UNT)	DQO (mg.L ⁻¹)	SST (mg.L ⁻¹)	pH fina l -	Condutivida- de (mS.cm ⁻¹)
	x1	x2								
9	0	0	200,0	7,0	205	16	179,03	40,00	7,0	6,28
10	0	0	200,0	7,0	201	16	181,03	44,00	7,0	6,31
11	0	0	200,0	7,0	194	14	173,02	44,00	7,0	6,32
12	0	0	200,0	7,0	195	15	175,02	40,00	7,0	6,30

Fonte: Autoria própria.

A tabela 53 apresenta a eficiência de remoção das variáveis: cor aparente, turbidez, DQO e SST. Os pontos centrais (ensaios 9, 10, 11 e 12) para as duas respostas apresentaram um desvio padrão de 0,9; 1,4; 1,3; 2,2 para as variáveis resposta cor aparente, turbidez, DQO e SST respectivamente.

Tabela 53 - Resultados da eficiência de remoção

Ensaio	Eficiência de remoção (%)			
	Cor	Turbidez	DQO	SST
1	46	34,29	19,4	28,3
2	56	64,29	17,7	50,9
3	55	70,00	34,9	58,5
4	61	74,29	27,7	58,5
5	54	67,14	34,9	50,9
6	63	75,71	34,3	54,7
7	50	57,14	25,9	47,2
8	57	72,86	35,3	58,5
9	63	77,14	38,1	62,3
10	64	77,14	37,4	58,5
11	65	80,00	40,2	58,5
12	65	78,57	39,5	62,3

Fonte: Autoria própria.

Os dados apresentaram a existência de normalidade pelo teste estatístico Kolmogorov-Smirnov, onde o D_n apresentado para as variáveis respostas cor, turbidez, DQO e SST foram, respectivamente: 0,19199; 0,20024; 0,27819 e 0,26429. Considerando um nível de significância de 10% e total de 12 termos, o valor crítico

tabelado foi de 0,34. Como os D_n das variáveis foram menores que o valor crítico tabelado não existem evidências para rejeitar a hipótese de normalidade dos dados. Assim, pode-se afirmar, com nível de significância de 10%, que a amostra provém de uma população normal.

Os parâmetros com p-valor foram considerados significativos se menores que 10% ($p < 0,10$), devido a variabilidade intrínseca ao processo de flotação por ar dissolvido utilizando o coagulante moringa.

Neste trabalho foram descritos os coeficientes do modelo de regressão a partir da matriz codificada. Os termos lineares estão associados a letra (L) e os termos quadráticos com a letra (Q).

7.1 RESPOSTA COR APARENTE

Para a variável cor aparente não foi significativa a interação entre o coagulante moringa e o pH, tendo sido incorporados os resíduos para cálculo da ANOVA (tabela 54).

Tabela 54 - ANOVA para a resposta cor reparametrizado

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor	R^2
Regressão	0,0409	4	0,0102	48,9202	< 0,0001	96,55 %
Resíduos	0,0015	7	0,0002			
Total	0,0423	11				

Fonte: Autoria própria.

Analisando a tabela 54, verifica-se que a porcentagem de variação explicada (R^2) foi de 96,55% e o p-valor ($< 0,0001$). Os valores de R^2 e p-valor são significativos, o que indica que o modelo se ajusta aos dados experimentais.

O F_{tab} foi obtido através da tabela de limites unilaterais da distribuição F de Fisher-Snedecor ao nível de 10% de probabilidade, onde na variável 1 foi utilizado o valor do grau de liberdade da regressão e na variável 2 o valor do grau de liberdade dos resíduos, o que resultou em um $F_{tab} = F_{4;7;0,10} = 2,96$. Como o F_{cal} foi de 48,9202

(tabela 54) o “Teste F” para regressão atende a prerrogativa de $F_{cal} > F_{tab}$, indicando que o modelo é representativo.

A tabela 55 mostra os coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta cor.

Tabela 55 - Coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta cor

Fatores	Coeficientes de regressão	Erro padrão	t(7)	p - valor	Estimativas por Intervalo (90%)	
					Limite Inferior	Limite Superior
Média	0,6390	0,0072	88,4294	< 0,0001	0,6253	0,6527
x_1 moringa (L)	0,0355	0,0051	6,9384	0,0002	0,0258	0,0451
x_1 moringa (Q)	-0,0294	0,0057	-5,1475	0,0013	-0,0402	-0,0186
x_2 pH (L)	0,0299	0,0051	5,8547	0,0006	0,0202	0,0396
x_2 pH (Q)	-0,0580	0,0057	-10,1560	< 0,0001	-0,0688	-0,0472

Fonte: Autoria própria.

O modelo reparametrizado é representado pela equação 13.

Equação 13 - Remoção de cor reparametrizado pelo processo FAD utilizando moringa

$$\text{Remoção de Cor} = 0,6390 + 0,0355 x_1 - 0,0294 x_1^2 + 0,0299 x_2 - 0,0580 x_2^2$$

x_1 – Concentração de Moringa (mg.L^{-1});

x_2 – pH.

A tabela 56 apresenta os valores experimentais e os previstos pelo modelo para a remoção de cor. Também, apresenta os erros de ajuste e os erros relativos para cada ensaio do DCCR.

Tabela 56 - Valores de remoção de cor experimentais, previstas pelo modelo e desvios para o DCCR

Ensaio	Remoção de Cor experimental	Remoção de Cor prevista	Erro de Ajuste	Erro relativo (%)
1	0,4605	0,4862	-0,0257	-5,57
2	0,5550	0,5571	-0,0021	-0,38
3	0,5495	0,5460	0,0035	0,63
4	0,6076	0,6169	-0,0093	-1,52
5	0,5422	0,5300	0,0122	2,25
6	0,6349	0,6303	0,0046	0,72
7	0,4968	0,4806	0,0162	3,25
8	0,5658	0,5652	0,0006	0,10
9	0,6276	0,6390	-0,0114	-1,80
10	0,6349	0,6390	-0,0041	-0,64
11	0,6476	0,6390	0,0086	1,33
12	0,6458	0,6390	0,0068	1,05

Fonte: Autoria própria.

Na região estudada os erros relativos que apresentaram o maior percentual foram os ensaios 1, 7 (-5,57%; 3,25%, respectivamente). Em valores de unidade de cor este percentual representa 14 e 9 UC respectivamente.

7.2 RESPOSTA TURBIDEZ

Para a variável resposta turbidez todos os termos foram significativos. A tabela 57 apresenta o cálculo da ANOVA.

Tabela 57 - ANOVA para a resposta turbidez

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor	R ²
Regressão	0,1557	5	0,0311	7,5190	< 0,0145	86,24 %
Resíduos	0,0248	6	0,0041			
Total	0,1805	11				

Fonte: Autoria própria.

Analisando a tabela 57, verifica-se que a porcentagem de variação explicada (R²) foi de 86,24% e o p-valor (< 0,0145). Os valores de R² e p-valor são significativos, o que indica que o modelo se ajusta aos dados experimentais.

O F_{tab} foi obtido através da tabela de limites unilaterais da distribuição F de Fisher-Snedecor ao nível de 10% de probabilidade, onde na variável 1 foi utilizado o valor do grau de liberdade da regressão e na variável 2 o valor do grau de liberdade dos resíduos, o que resultou em um F_{tab} = F_{5;6;0,10} = 3,11. Como o F_{cal} foi de 7,5190 (tabela 57) o “Teste F” para regressão atende a prerrogativa de F_{cal} > F_{tab}, indicando que o modelo é representativo.

A equação 14 caracteriza o modelo de remoção de turbidez (vide tabela 58).

Equação 14 - Remoção de turbidez pelo processo FAD utilizando moringa

$$\text{Remoção de Turbidez} = 0,7821 + 0,0580 x_1 - 0,0527 x_1^2 + 0,0849 x_2 - 0,0848 x_2^2 - 0,0643 x_1 x_2$$

x₁ – Concentração de Moringa (mg.L⁻¹);

x₂ – pH.

Tabela 58 - Coeficientes de regressão para a resposta turbidez

Fatores	Coeficientes de regressão	Erro padrão	t(6)	p - valor	Estimativas por Intervalo (90%)	
					Limite Inferior	Limite Superior
Média	0,7821	0,0322	24,3077	< 0,0001	0,7196	0,8447
x ₁ moringa (L)	0,0580	0,0228	2,5496	0,0435	0,0138	0,1022
x ₁ moringa (Q)	-0,0527	0,0254	-2,0709	0,0838	-0,1021	-0,0032
x ₂ pH (L)	0,0849	0,0228	3,7324	0,0097	0,0407	0,1291
x ₂ pH (Q)	-0,0848	0,0254	-3,3344	0,0157	-0,1343	-0,0354
x ₁ *x ₂ moringa (L)*pH (L)	-0,0643	0,0322	-1,9979	0,0927	-0,1268	-0,0018

Fonte: Autoria própria.

A tabela 59 apresenta os valores experimentais e os previstos pelo modelo para a remoção de turbidez. Também apresenta os erros de ajuste e os erros relativos para cada ensaio do DCCR.

Tabela 59 - Valores de remoção de turbidez experimentais, previstas pelo modelo e desvios para o DCCR

Ensaio	Remoção de Turbidez experimental	Remoção de Turbidez prevista	Erro de Ajuste	Erro relativo (%)
1	0,3429	0,4374	-0,0946	-27,58
2	0,6429	0,6820	-0,0392	-6,09
3	0,7000	0,7358	-0,0358	-5,12
4	0,7429	0,7233	0,0196	2,63
5	0,6714	0,5947	0,0767	11,42
6	0,7571	0,7588	-0,0017	-0,22
7	0,5714	0,4924	0,0790	13,82
8	0,7286	0,7326	-0,0040	-0,55
9	0,7714	0,7821	-0,0107	-1,38
10	0,7714	0,7821	-0,0107	-1,38
11	0,8000	0,7821	0,0179	2,23
12	0,7857	0,7821	0,0036	0,45

Fonte: Autoria própria.

Na região estudada os erros relativos que apresentaram o maior percentual foram os ensaios 1, 5, 7 (-27,58%; 11,42%; 13,82%, respectivamente). Em valores de unidade nefelométrica de turbidez este percentual representa 6, 5, 5 UNT respectivamente.

7.3 RESPOSTA DQO

No caso da variável resposta DQO, o coagulante moringa linear e a interação entre o coagulante moringa e o pH não foram significativos pelo método estatístico utilizado, sendo incorporado aos resíduos para cálculo da ANOVA (tabela 60).

Tabela 60 - ANOVA para a resposta DQO reparametrizado

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor	R^2
Regressão	0,0471	3	0,0157	7,3500	< 0,0110	73,38 %
Resíduos	0,0171	8	0,0021			
Total	0,0642	11				

Fonte: Autoria própria.

Analisando a tabela 60, verifica-se que a porcentagem de variação explicada (R^2) foi de 73,38% e o p-valor (< 0,0110). Os valores de R^2 e p-valor são significativos, o que indica que o modelo se ajusta aos dados experimentais.

O F_{tab} foi obtido através da tabela de limites unilaterais da distribuição F de Fisher-Snedecor ao nível de 10% de probabilidade, onde na variável 1 foi utilizado o valor do grau de liberdade da regressão e na variável 2 o valor do grau de liberdade dos resíduos, o que resultou em um $F_{tab} = F_{3;8;0,10} = 2,92$. Como o F_{cal} foi de 7,35 (tabela 60) o “Teste F” para regressão atende a prerrogativa de $F_{cal} > F_{tab}$, indicando que o modelo é representativo.

A tabela 61 apresenta os coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta DQO.

Tabela 61 - Coeficientes de regressão do modelo reparametrizado para a resposta DQO

Fatores	Coeficientes de regressão	Erro padrão	t(8)	p - valor	Estimativas por Intervalo (90%)	
					Limite Inferior	Limite Superior
Média	0,3879	0,0231	16,7812	< 0,0001	0,3449	0,4308
x_1 moringa (Q)	-0,0400	0,0183	-2,1914	0,0598	-0,0740	-0,0061
x_2 pH (L)	0,0486	0,0163	2,9714	0,0178	0,0182	0,0790
x_2 pH (Q)	-0,0600	0,0183	-3,2812	0,0112	-0,0939	-0,0260

Fonte: Autoria própria.

O modelo reparametrizado é representado pela equação 15.

Equação 15 - Remoção de DQO reparametrizado pelo processo FAD utilizando moringa

$$\text{Remoção de DQO} = 0,3879 - 0,0400 x_1^2 + 0,0486 x_2 - 0,0600 x_2^2$$

x_1 – Concentração de Moringa (mg.L^{-1});

x_2 – pH.

A tabela 62 apresenta os valores experimentais e os previstos pelo modelo para a remoção de DQO. Também apresenta os erros de ajuste e os erros relativos para cada ensaio do DCCR.

Tabela 62 - Valores de remoção de DQO experimentais, previstas pelo modelo e desvios para o DCCR

Ensaio	Remoção de DQO experimental	Remoção de DQO prevista	Erro de Ajuste	Erro relativo (%)
1	0,1939	0,2393	-0,0454	-23,39
2	0,1766	0,2393	-0,0627	-35,49
3	0,3498	0,3364	0,0133	3,81
4	0,2770	0,3364	-0,0594	-21,43
5	0,3498	0,3078	0,0420	12,00
6	0,3428	0,3078	0,0351	10,22
7	0,2597	0,1993	0,0605	23,27
8	0,3532	0,3366	0,0166	4,69
9	0,3809	0,3879	-0,0069	-1,81
10	0,3740	0,3879	-0,0139	-3,70
11	0,4017	0,3879	0,0139	3,44
12	0,3948	0,3879	0,0069	1,75

Fonte: Autoria própria.

Na região estudada os erros relativos que apresentaram o maior percentual foram os ensaios 1, 2, 4, 5, 6, 7 (-23,39%; -35,49%; -21,43%; 12,00%; 10,22%; 23,2750%, respectivamente). Em valores de mg.L^{-1} de DQO este percentual representa 16; 18; 15; 13; 11; 16 mg.L^{-1} respectivamente.

7.4 RESPOSTA SST

No caso da variável resposta sólidos suspensos totais todos os termos foram significativos. A tabela 63 apresenta o cálculo da ANOVA.

Tabela 63 - ANOVA para a resposta SST

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor	R ²
Regressão	0,0824	5	0,0165	7,1097	< 0,0166	85,56 %
Resíduos	0,0139	6	0,0023			
Total	0,0964	11				

Fonte: Autoria própria.

Analisando a tabela 63, verifica-se que a porcentagem de variação explicada (R²) foi de 85,56% e o p-valor (< 0,0166). Os valores de R² e p-valor são significativos, o que indica que o modelo se ajusta aos dados experimentais.

O F_{tab} foi obtido através da tabela de limites unilaterais da distribuição F de Fisher-Snedecor ao nível de 10% de probabilidade, onde na variável 1 foi utilizado o valor do grau de liberdade da regressão e na variável 2 o valor do grau de liberdade dos resíduos, o que resultou em um F_{tab} = F_{5;6;0,10} = 3,11. Como o F_{cal} foi de 7,1097 (tabela 63) o “Teste F” para regressão atende a prerrogativa de F_{cal} > F_{tab}, indicando que o modelo é representativo.

Observa-se pela tabela 64 que o modelo para a resposta SST fica caracterizado pela equação 16.

Equação 16 - Remoção de SST pelo processo FAD utilizando moringa

$$\text{Remoção de SST} = 0,6038 + 0,0350 x_1 - 0,0472 x_1^2 + 0,0672 x_2 - 0,0472 x_2^2 - 0,0566 x_1 x_2$$

x₁ – Concentração de Moringa (mg.L⁻¹);

x₂ – pH.

Tabela 64 - Coeficientes de regressão para a resposta SST

Fatores	Coeficientes de regressão	Erro padrão	t(6)	p - valor	Estimativas por Intervalo (90%)	
					Limite Inferior	Limite Superior
Média	0,6038	0,0241	25,0749	< 0,0001	0,5570	0,6506
x ₁ moringa (L)	0,0350	0,0170	2,0540	0,0858	0,0019	0,0681
x ₁ moringa (Q)	-0,0472	0,0190	-2,4779	0,0479	-0,0842	-0,0102
x ₂ pH (L)	0,0672	0,0170	3,9458	0,0076	0,0341	0,1003
x ₂ pH (Q)	-0,0472	0,0190	-2,4779	0,0479	-0,0842	-0,0102
x ₁ *x ₂ moringa (L)*pH (L)	-0,0566	0,0241	-2,3508	0,0570	-0,1034	-0,0098

Fonte: Autoria própria.

A tabela 65 apresenta os valores experimentais e os previstos pelo modelo para a remoção de SST. Também apresenta os erros de ajuste e os erros relativos para cada ensaio do DCCR.

Tabela 65 - Valores de remoção de SST experimentais, previstas pelo modelo e desvios para o DCCR

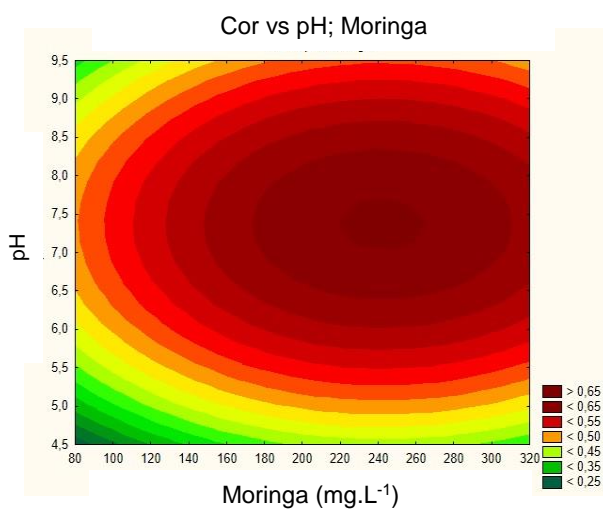
Ensaio	Remoção de SST experimental	Remoção de SST prevista	Erro de Ajuste	Erro relativo (%)
1	0,2830	0,3507	-0,0677	-23,90
2	0,5094	0,5338	-0,0244	-4,78
3	0,5849	0,5982	-0,0133	-2,28
4	0,5849	0,5550	0,0299	5,11
5	0,5094	0,4600	0,0495	9,70
6	0,5472	0,5589	-0,0117	-2,14
7	0,4717	0,4144	0,0573	12,14
8	0,5849	0,6044	-0,0195	-3,34
9	0,6226	0,6038	0,0189	3,03
10	0,5849	0,6038	-0,0189	-3,22
11	0,5849	0,6038	-0,0189	-3,22
12	0,6226	0,6038	0,0189	3,03

Fonte: Autoria própria.

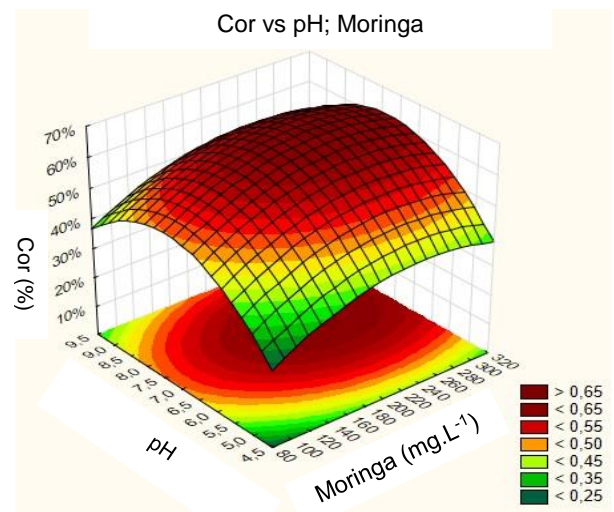
Na região estudada os erros relativos que apresentaram o maior percentual foram os ensaios 1, 5, 7 (-23,90%; 9,70%; 12,14%, respectivamente). Em valores de mg.L⁻¹ de SST este percentual representa 8, 4, 4 mg.L⁻¹ respectivamente.

7.5 CURVAS DE CONTORNO E SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

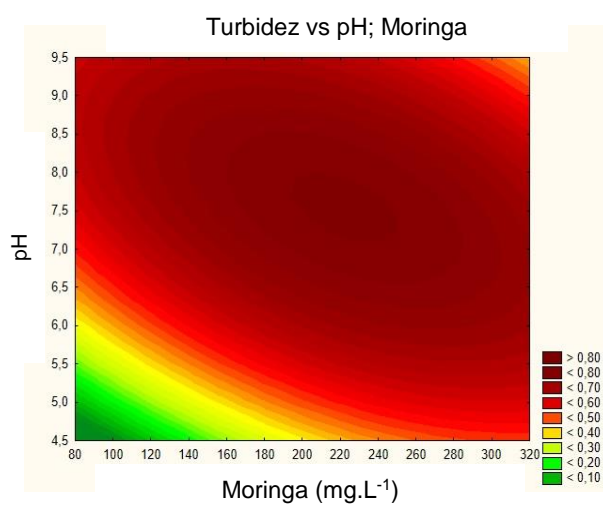
As curvas de contorno e a superfície de resposta das variáveis resposta cor aparente, turbidez, DQO e SST apresentam a influência da moringa e pH na faixa de concentração estudada. A concentração de moringa utilizada foi de 100 a 300 mg.L⁻¹ e o pH de 5 a 9.



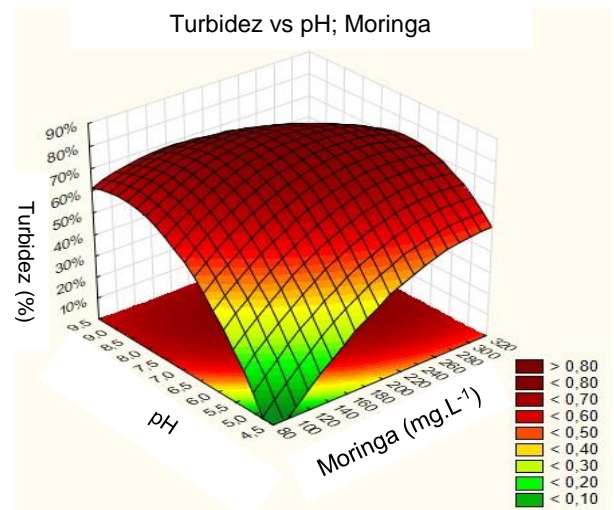
(a)



(b)



(c)



(d)

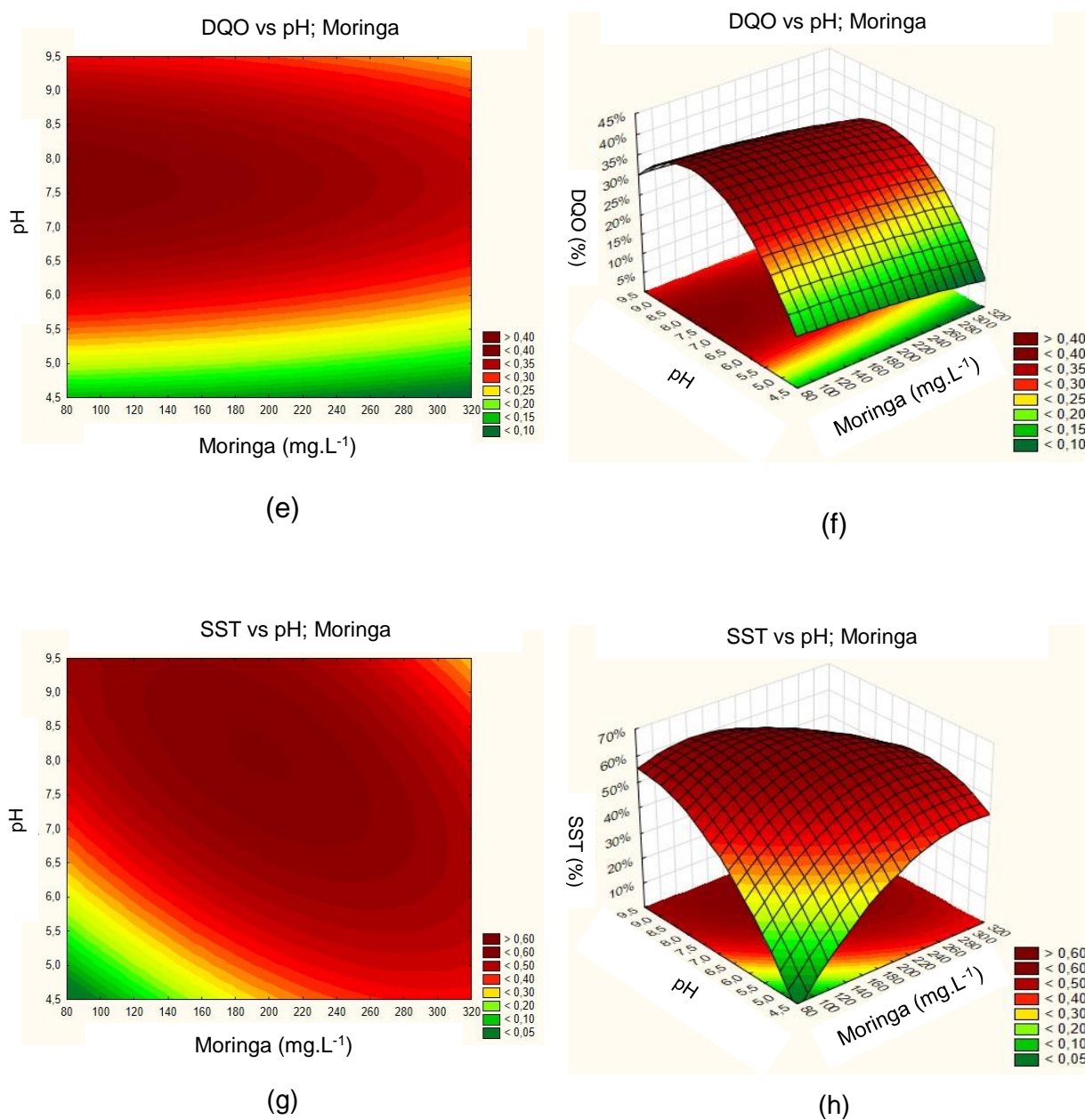


Figura 14 – Ensaio FAD em função de concentração de Moringa e pH: Curvas de contorno (a) e Superfície de resposta (b) para a resposta cor; Curvas de contorno (c) e Superfície de resposta (d) para a resposta turbidez; Curvas de contorno (e) e Superfície de resposta (f) para a resposta DQO; Curvas de contorno (g) e Superfície de resposta (h) para a resposta SST
Fonte: Autoria própria.

A eficiência de remoção de cor aparente relacionada com as variáveis moringa e pH apresentaram a maior eficiência (vide Figura 14, itens a, b) em área superior a 65% de remoção. Esta área possui valores de concentração de moringa entre 220 e 270 mg.L⁻¹ e pH entre 7,0 e 7,5.

Para a eficiência de remoção da turbidez com as variáveis moringa e pH foi verificado uma área de remoção ótima com eficiência acima de 80%. A área possui valores de dosagem de moringa entre 200 e 250 mg.L⁻¹ e pH entre 7,0 e 8,0 (vide Figura 14, itens c, d).

A variável DQO apresentou uma área ótima com eficiência de remoção acima de 40%. Esta eficiência é alcançada com a concentração de moringa na faixa de 80 a 140 mg.L⁻¹ e pH entre 7,0 e 8,5 (vide Figura 14, itens e, f).

A eficiência de remoção de sólidos suspensos totais apresentou área com eficiência maior que 60% na dosagem de moringa no intervalo de 180 a 220 mg.L⁻¹ e pH entre 7,5 e 8,5 (vide Figura 14, itens g, h).

Eficiências para a remoção de cor, turbidez e DQO utilizando o coagulante moringa *oleífera* foram reportados nos estudos:

a) Heredia et al. (2009) tratou solução de corantes Índigo Carmine com concentração de 100 a 400 mg.L⁻¹. Os ensaios foram realizados com diferentes dosagens de moringa 2 a 350 mg.L⁻¹, temperatura no intervalo de 10 a 40 °C e pH 7. A eficiência de 80% de remoção do corante foi obtida utilizando 343 mg.L⁻¹ de moringa e temperatura de 11,2 °C. Nesse estudo de Heredia et al. (2009) o pH não influencia no processo de coagulação e a temperatura influenciou negativamente, por causa das proteínas presentes na semente da moringa.

b) Nos estudos de Pritchard et al. (2010) foi tratado água colorida produzida artificialmente por *kaolin*, com o parâmetro de qualidade cor 20 abs/m e turbidez de 160 UNT. Os ensaios foram realizados com concentração de moringa de 750, 1000 e 1250 mg.L⁻¹ e pH 7,5. A eficiência de 83% de remoção de cor e de 97% de remoção de turbidez foram obtidas com dosagem de 1000 mg.L⁻¹ de moringa.

c) Ströher et al. (2012) realizou o tratamento de efluente de lavagem de jeans com os parâmetros de qualidade cor igual a 1017 UC e turbidez de 449 FAU. Os ensaios foram realizados com a concentração de moringa de 1400, 1600, 1800, 2000, 2200, 2400 e 2600 mg.L⁻¹. A eficiência superior a 80,33% e 91,10% de remoção de cor e turbidez respectivamente foram obtidas com dosagem de 1400 mg.L⁻¹ de moringa.

d) Nas pesquisas de Veeramalini et al. (2012) realizou o tratamento de solução com corante reativo amarelo. Os ensaios foram realizados com a concentração de moringa de 100, 200, 300, 400, 500 mg.L⁻¹ e pH de 2 a 10. Foi

alcançada a eficiência de remoção de 62% e 37% de cor e DQO respectivamente utilizando concentração de 500 mg.L⁻¹ de moringa e pH na faixa de 8 a 10. O pH influenciou na remoção do corante e DQO, em que a melhor eficiência de remoção foi com pH maior. Conforme Veeramalini et al. (2012) a melhor eficiência de remoção com o maior pH é devido a superfície ativa dos coagulantes serem carregados negativamente.

e) Ströher et al. (2013) tratou efluente de lavagem de jeans com os parâmetros de qualidade cor, turbidez e DQO igual 1400 UC, 375 FAU e 491 mg.L⁻¹ respectivamente. Os ensaios foram realizados com a concentração de moringa de 1400, 1600, 1800, 2000, 2200, 2400 e 2600 mg.L⁻¹. A eficiência de 73,5% e 78,6% de remoção de cor e turbidez respectivamente foram obtidas com concentração 1600 mg.L⁻¹ de moringa. Para o parâmetro DQO teve aumento de 12,4% em relação ao efluente bruto. De acordo com Ströher et al. (2013) esse aumento é devido à matéria orgânica presente nas sementes de moringa.

Nas pesquisas analisadas, exceto na de Veeramalini et al. (2012), apresentaram a eficiência de remoção de cor superior ao obtido neste estudo. Para a resposta turbidez, exceto a pesquisa de Ströher et al. (2013), todas as demais apresentaram a eficiência de remoção de turbidez superior ao obtido neste estudo. Entretanto, alguns parâmetros utilizados por estes pesquisadores diferenciaram do presente estudo, como por exemplo: a) concentração maior de moringa (Heredia et al., 2009; Pritchard et al., 2010; Ströher et al., 2012; Ströher et al., 2013); b) temperatura da solução na realização do ensaio (Heredia et al., 2009); c) tipo de efluente, em que, (Heredia et al., 2009; Veeramalini et al., 2012) tratou solução de corante têxtil e Pritchard et al. (2010) solução de água colorida produzida artificialmente por kaolin. O estudo de Ströher et al. (2013) apresentou a eficiência de remoção de turbidez semelhante ao do presente estudo, entretanto, com uma concentração muito superior de moringa (1600 mg.L⁻¹).

Para o parâmetro DQO, todas as pesquisas analisadas a eficiência de remoção de DQO foi inferior ao obtido neste estudo. Nos estudos de Veeramalini et al. (2012) apresentou os parâmetros dos ensaios semelhante ao do presente estudo, entretanto, a eficiência de remoção de DQO foi menor que 37%. E na pesquisa de Ströher et al. (2013) ocorreu um aumento de 12,4% do parâmetro DQO.

Comparando as curvas de contorno e a superfície de resposta produzidas para as respostas cor, turbidez, e SST foi verificado uma tendência de resposta mais eficiente para os valores de concentração de moringa no intervalo de 180 a 270 mg.L⁻¹ e pH de 7,0 a 8,5 (vide Figuras 14 itens a, b, c, d, g, h). A curva de contorno e superfície de resposta para a resposta DQO a eficiência máxima é obtida com concentração de moringa na faixa de 80 a 140 mg.L⁻¹ e pH no intervalo de 7,0 a 8,5 (vide Figura 14, itens e, f).

A diferença nos valores do intervalo da concentração da moringa para a resposta DQO em relação as outras respostas pode ser por causa da presença de matéria orgânica das sementes de moringa, a qual em maior concentração influencia em uma menor eficiência de remoção da DQO.

Nos estudos de Heredia et al. (2009) o pH não afetou a eficiência de remoção de cor. Entretanto nos estudos de Veeramalini et al. (2012) e neste estudo o pH influenciou os resultados o qual teve a melhor atuação no intervalo de 7,0 a 8,5 em que proporcionou as melhores eficiências de remoção das respostas cor, turbidez, DQO e SST. O pH abaixo de 7,0 ou acima de 8,5 proporciona eficiências menores de remoção de cor, turbidez, DQO e SST.

8. ANÁLISE DOS RESULTADOS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DE LAVANDERIA INDUSTRIAL TÊXTIL

Ao longo da pesquisa se produziu uma quantidade significativa de informações, no entanto se faz aqui necessária uma apresentação mais breve a respeito dos principais pontos em que se alcançou, bem como a uma posição conclusiva em relação aos temas abordados. Os itens a serem discutidos são: melhor eficiência de remoção dos parâmetros cor aparente, turbidez, DQO, SST por meio dos processos eletroquímico e FAD (com uso de tanino, PAC / polímero, moringa); e os pontos elencados nos objetivos específicos.

Pelos resultados da eficiência de remoção dos parâmetros cor aparente, turbidez, DQO e SST obtidas nos ensaios eletroquímico e FAD realizados, constatou-se que o melhor tratamento foi utilizando tanino seguido pelo PAC e polímero e eletroquímico. A pior eficiência de remoção foi com o coagulante moringa. A tabela 66 apresenta a eficiência de remoção dos parâmetros cor aparente, turbidez, DQO e SST para os ensaios eletroquímico e FAD.

Tabela 66 - Eficiência de remoção de cor aparente, turbidez, DQO, SST

Parâmetros	Tratamentos				
	Eletroquímico	Flotação por Ar Dissolvido			
		Tanino	PAC / Polímero	Moringa	
Eficiência de Remoção (%)	Cor Aparente	86	90	93	65
	Turbidez	58,93	96,90	93,65	80,00
	DQO	75,2	61,4	71,8	40,2
	SST	66,3	94,1	88,8	62,3

Fonte: Autoria própria.

Trabalhar com variáveis de acordo com os ensaios eletroquímico e FAD efetuados foi possível remover do efluente bruto as respectivas unidades de cor aparente, turbidez, DQO e SST, conforme a tabela 67.

Tabela 67 - Remoção do efluente bruto em unidade de cor aparente, turbidez, DQO, SST

Parâmetros	Tratamentos	Flotação por Ar Dissolvido			
		Eletroquímico	Tanino	PAC / Polímero	Moringa
Cor Aparente (UC)		433	580	403	357
Turbidez (UNT)		33	250	59	56
DQO (mg.L ⁻¹)		214	191	188	115
SST (mg.L ⁻¹)		60	64	94	66

Fonte: Autoria própria.

A partir dos dados elencados na tabela 80 pode-se afirmar que para a resposta cor e turbidez, a melhor remoção desses parâmetros foi com o tratamento FAD com tanino. Para a DQO a melhor remoção foi com o processo eletroquímico e o segundo melhor com o processo de FAD com tanino. E para SST a melhor remoção foi com o processo FAD com PAC e polímero e o segundo melhor com FAD com moringa e tanino.

8.1 COR APARENTE

Para a cor aparente os ensaios avaliados apresentaram eficiências e valores absolutos finais (vide Tabelas 66 e 67) nas quais o tanino e o PAC / polímero possuem remoções superiores a 90%, com destaque do tanino para remoção em valores absolutos. O processo eletroquímico apresentou uma remoção próxima de 86% seguido do coagulante moringa (aproximadamente 65% de remoção).

O tanino teve remoção ótima superior a 90% na concentração acima de 110 mg.L⁻¹ e pH no intervalo entre 6,5 e 7,3 enquanto o PAC e o polímero apresentaram eficiência superior a 90% com concentrações de polímero acima de 11,5 mg.L⁻¹ e PAC variando em toda a faixa de valores estudada, e também com a dosagem de polímero no intervalo de 5 e 6 mg.L⁻¹ e PAC acima de 1,10 mL.L⁻¹.

A eficiência acima de 85% de remoção de cor pelo processo eletroquímico foi obtida com corrente elétrica no intervalo de 500 a 800 mA (correspondente a densidade de corrente de 20,83 a 33,33 mA.cm⁻²) e tempo de coagulação acima de

15 minutos. Com o coagulante moringa a eficiência próximo a 65% foi conseguida com dosagem na faixa de 220 a 270 mg.L⁻¹ e pH entre 7,0 e 7,5.

O modelo de remoção de cor utilizando o coagulante tanino é representado pela equação 5.

Equação 5 - Remoção de cor reparametrizado pelo processo FAD utilizando tanino

$$\text{Remoção de Cor} = 0,8661 + 0,0335 x_1 - 0,0131 x_1^2 - 0,0388 x_2 - 0,0159 x_2^2$$

x_1 – Concentração de Tanino (mg.L⁻¹);

x_2 – pH.

O modelo de remoção de cor utilizando os coagulantes PAC e polímero é representado pela equação 9.

Equação 9 - Remoção de cor pelo processo FAD utilizando PAC e polímero

$$\text{Remoção de Cor} = 0,8012 + 0,0403 x_1 + 0,0136 x_1^2 + 0,0394 x_2 + 0,0407 x_2^2 - 0,0237 x_1 x_2$$

x_1 – Concentração de PAC (mL.L⁻¹);

x_2 – Concentração de Polímero (mg.L⁻¹).

8.2 TURBIDEZ

Para a turbidez os ensaios avaliados apresentaram eficiências e valores absolutos finais (vide Tabelas 66 e 67) nas quais o tanino e o PAC / polímero possuem remoções superiores a 90%, com destaque do tanino para remoção em valores absolutos. O coagulante moringa apresentou uma remoção de 80% seguido do processo eletroquímico (aproximadamente 60% de remoção).

A baixa eficiência do processo eletroquímico pode ser devido ao alumínio resultante no processo, o que gerou uma turbidez residual.

O tanino teve remoção ótima de mais de 96% na faixa de concentração de 70 a 150 mg.L⁻¹ e pH entre 6,5 e 8,6 enquanto o PAC e o polímero apresentaram

eficiência superior a 93% com concentrações de polímero acima de 11 mg.L⁻¹ e PAC acima de 5 mL.L⁻¹.

Para o coagulante moringa, a eficiência de 80% de remoção de turbidez foi conseguida com dosagem na faixa de 200 a 250 mg.L⁻¹ e pH entre 7,0 e 8,0. A eficiência de 60% pelo processo eletroquímico foi obtida com a corrente elétrica no intervalo de 500 a 650 mA (correspondente a densidade de corrente de 20,33 a 27,08 mA.cm⁻²) e tempo de coagulação entre 12 e 16 minutos.

O modelo de remoção de turbidez utilizando o coagulante tanino é representado pela equação 6.

Equação 6 - Remoção de turbidez pelo processo FAD utilizando tanino

$$\begin{aligned} & \text{Remoção de Turbidez} \\ & = 0,9593 + 0,0250 x_1 - 0,0131 x_1^2 - 0,0210 x_2 - 0,0121 x_2^2 + 0,0126 x_1 x_2 \end{aligned}$$

x_1 – Concentração de Tanino (mg.L⁻¹);

x_2 – pH.

O modelo de remoção de turbidez utilizando os coagulantes PAC e polímero é representado pela equação 10.

Equação 10 - Remoção de turbidez reparametrizado pelo processo FAD utilizando PAC e polímero

$$\text{Remoção de Turbidez} = 0,8048 + 0,0396 x_1 + 0,0387 x_2 + 0,0389 x_2^2$$

x_1 – Concentração de PAC (mL.L⁻¹);

x_2 – Concentração de Polímero (mg.L⁻¹).

8.3 DQO

Para a DQO os ensaios avaliados apresentaram eficiências e valores absolutos finais (vide Tabelas 66 e 67) nas quais o processo eletroquímico e o PAC / polímero possuem remoções superiores a 70%, com destaque do tanino para remoção em valores absolutos. O coagulante tanino apresentou uma remoção maior que 61% seguido da moringa (aproximadamente 40% de remoção).

O processo eletroquímico teve remoção ótima de mais de 70% com a corrente elétrica na faixa de 550 a 800 mA (corresponde a densidade de corrente de 22,92 a 33,33 mA.cm⁻²) e tempo de coagulação entre 12 a 18 minutos enquanto o PAC e o polímero apresentaram eficiência superior a 70% com concentrações de polímero no intervalo de 6,0 a 8,5 mg.L⁻¹ e PAC acima de 1,1 mL.L⁻¹.

Para o coagulante tanino, a eficiência acima de 60% de remoção de DQO foi conseguida com concentração acima de 100 mg.L⁻¹ e pH entre 6,4 e 6,5. A eficiência de 40% utilizando o coagulante moringa foi obtida com dosagem no intervalo entre 80 a 140 mg.L⁻¹ e pH entre 7,0 e 8,5.

O modelo de remoção de DQO utilizando o processo eletroquímico é representado pela equação 3.

Equação 3 - Remoção de DQO reparametrizado pelo processo eletroquímico

$$\text{Remoção de DQO} = 0,7181 + 0,0664 x_1 - 0,0415 x_1^2 + 0,0461 x_2 - 0,0266 x_2^2$$

x_1 – Corrente Elétrica (mA);

x_2 – Tempo Coagulação (minutos).

O modelo de remoção de DQO utilizando os coagulantes PAC e polímero é representado pela equação 11.

Equação 11 - Remoção de DQO reparametrizado pelo processo FAD utilizando PAC e polímero

$$\text{Remoção de DQO} = 0,6572 + 0,0246 x_1 - 0,0329 x_2 - 0,0294 x_2^2$$

x_1 – Concentração de PAC (mL.L⁻¹);

x_2 – Concentração de Polímero (mg.L⁻¹).

8.4 SST

Para os SST os ensaios avaliados apresentaram eficiências e valores absolutos finais (vide Tabelas 66 e 67) nas quais o tanino e o PAC / polímero possuem remoções próximos a 90%, com destaque do PAC e polímero para

remoção em valores absolutos. O processo eletroquímico apresentou uma remoção maior que 66% seguido da moringa (aproximadamente 62% de remoção).

O tanino teve remoção ótima de mais de 90% com dosagem no intervalo de 50 a 140 mg.L⁻¹ com pH entre 6,5 e 6,6, e também concentração de tanino superior a 140 mg.L⁻¹ e pH acima de 6,5 enquanto o PAC e o polímero apresentaram eficiência superior a 88% com concentrações de polímero acima de 12 mg.L⁻¹ e PAC entre 0,3 a 0,5 mL.L⁻¹, e também dosagem de polímero no intervalo entre 5 a 6 mg.L⁻¹ e PAC com valores acima de 1,15 mL.L⁻¹.

O processo eletroquímico a eficiência acima de 66% de remoção de DQO foi conseguida com a corrente elétrica superior a 750 mA (correspondente a densidade de corrente superior a 31,25 mA.cm⁻²) e tempo de coagulação acima de 15 minutos. A eficiência superior a 60% utilizando o coagulante moringa foi obtida com dosagem no intervalo entre 180 a 220 mg.L⁻¹ e pH entre 7,5 e 8,5.

O modelo de remoção de SST utilizando o coagulante tanino é representado pela equação 8.

Equação 8 - Remoção de SST reparametrizado pelo processo FAD utilizando tanino

$$\text{Remoção de SST} = 0,8235 + 0,0857 x_1 - 0,0753 x_2 + 0,0588 x_1 x_2$$

x_1 – Concentração de Tanino (mg.L⁻¹);

x_2 – pH.

O modelo de remoção de SST utilizando os coagulantes PAC e polímero é representado pela equação 12.

Equação 12 - Remoção de SST reparametrizado pelo processo FAD utilizando PAC e polímero

$$\text{Remoção de SST} = 0,7844 + 0,0500 x_1 + 0,0554 x_2 - 0,0656 x_1 x_2$$

x_1 – Concentração de PAC (mL.L⁻¹);

x_2 – Concentração de Polímero (mg.L⁻¹).

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta seção apresenta às considerações finais deste trabalho, as quais se baseiam em uma análise concisa dos resultados obtidos e recomendações em função dos objetivos estabelecidos.

9.1 CONCLUSÕES

As principais conclusões sobre este projeto são:

- o efluente objeto de estudo apresentou os parâmetros de qualidade conforme os intervalos: cor 433 a 643 UC, turbidez 56 a 258 UNT, DQO 263 a 311 mg.L⁻¹ e SST 68,0 a 106,67 mg.L⁻¹

- as melhores eficiências no ensaio eletroquímico foram obtidas empregando as seguintes configurações: para a cor, corrente elétrica de 712,13 mA (correspondente a densidade de corrente de 29,67 mA.cm⁻²) e tempo de coagulação de 15,54 minutos; para a turbidez e SST, corrente elétrica de 500 mA (correspondente a densidade de corrente de 20,83 mA.cm⁻²) e tempo de coagulação de 12 minutos; e para DQO, corrente elétrica de 500 mA (correspondente a densidade de corrente de 20,83 mA.cm⁻²) e tempo de coagulação de 17 minutos.

- as eficiências máximas utilizando o tanino foram obtidas com as seguintes configurações: para a cor, concentração de tanino de 135,4 mg.L⁻¹ e pH 6,9; para a turbidez, concentração de tanino de 135,4 e 150 mg.L⁻¹ e pH 6,9 e 7,7; para a DQO, concentração de tanino de 100 mg.L⁻¹ e pH 6,5; e para SST, concentração de tanino de 100 e 150 mg.L⁻¹ e pH 6,5 e 7,7.

- para o PAC e polímero as melhores eficiências foram alcançadas com as seguintes concentrações: para a cor, PAC 0,75 mL.L⁻¹ e polímero 11,77 mg.L⁻¹; para a turbidez e SST, PAC 0,75 e 1,1 mL.L⁻¹ e polímero 11,77 e 8,60 mg.L⁻¹; para a DQO, PAC 1,0 mL.L⁻¹ e polímero 6,34 mg.L⁻¹.

- para a moringa foram obtidas as eficiências máximas com as seguintes configurações: para a cor, turbidez, DQO e SST concentração de moringa de 200 mg.L⁻¹ e pH 7,0.

De modo geral, foi possível observar que o tratamento FAD utilizando os coagulantes PAC e polímero apresentaram os melhores resultados para as respostas cor, turbidez e DQO. Porém, esta diferença pode ter sido proporcionada pelas variações dos parâmetros de qualidade do efluente bruto.

Assim, em função dos resultados apresentados, conclui-se que os ensaios que melhor responderam ao tratamento do efluente de lavanderia industrial têxtil foram respectivamente: processo FAD utilizando tanino, PAC e polímero, processo eletroquímico e o FAD associado ao coagulante moringa.

Pelo comparativo entre as resoluções do CONAMA 357 e pelos resultados alcançados, apenas o ensaio de FAD com o coagulante moringa teria problemas devido a sua cor aparente estar elevada, em torno de 194 mg.PtCo.L⁻¹ o que ultrapassa os padrões das águas doces de classe 2, no qual a cor verdadeira limitada até 75 mg.PtCo.L⁻¹.

Apesar da eficácia encontrada nos processos eletroquímicos e FAD com PAC/polímero é importante destacar que os coagulantes naturais abordados nessa pesquisa não possuem metais pesados em sua composição, e, além disso, são biodegradáveis. Pode-se dizer que o tanino e a moringa são alternativas promissoras no tratamento de efluentes de lavanderia industrial têxtil.

Não obstante, tem-se a certeza de que o presente estudo traz contribuições úteis para instituições de ensino/pesquisa, empresas e setores envolvidos com o tratamento de efluentes de lavanderia industrial têxtil.

9.2 RECOMENDAÇÕES

Este trabalho contribui para a temática de tratamento de efluentes do setor têxtil, especificamente para efluentes de lavanderia industrial têxtil, que pode ser caracterizado como um processo dinâmico e ainda em desenvolvimento.

Este estudo possibilita uma maior discussão para uso de processos eletroquímicos no tratamento de efluentes têxteis. Desta forma, recomenda-se:

- pesquisas visando uma otimização e maior investigação em relação aos materiais dos eletrodos;
- desenvolvimento de estudos de processos FAD com tanino associados a processos físico-químicos específicos com corantes;
- para o processo FAD com moringa existe uma maior averiguação em relação a preparação da solução da moringa com a solução salina e a eficiência de remoção do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADHOUM, Nafaâ et al. Decolourization and removal of phenolic compounds from olive mill wastewater by eletrocoagulation. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 43, n. 10, p. 1281-1287, out. 2004.

AISSE, M. M. et al. Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios por sistemas de flotação. In: CHERNICHARO, Carlos A. L. (Coord.). **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: PROSAB, 2001. p. 333-376.

ALCÂNTARA, M. R.; DALTIM, D. A química do processo têxtil. **Química Nova**, v.19, n. 3, p. 320-330, 1996.

ANDRADE, Flávio de. **Remoção de cor de efluentes têxteis com tratamento de lodos ativados e um polieletrólito orgânico**. 2003. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

ANDREOLI, Cleverson V. (Org.). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001.

ANWAR, Farooq; LATIF, Sajid; ASHRAF, Muhammad; GILANI, Anwarul H. Moringa oleifera: a food plant with multiple medicinal uses. **Phytotherapy Research**, v. 21, n. 1, p. 17-25, jan. 2007.

APHA - American Public Health Association. **Standard methods for the examination for water and wastewater**. 19. ed. Washington, D.C.: AWWA/WPCF, 1998.

ARAÚJO, Mário; CASTRO, E. M. M. **Manual de Engenharia Têxtil**. vol. II. Lisboa: Fundação Colouste Gulbenkian, 1987.

ARBOLEDA, Jorge V. **Teoría y práctica de la purificación del agua**. Colômbia: Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental – ACODAL, 1992. 648 p.

AZEVEDO NETTO, Jose M. de et al. **Técnicas de abastecimento e tratamento de água**. 2. ed., v. 2. São Paulo: CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1979.

BALAN, DORALICE S. L. A Indústria Têxtil e o Meio Ambiente, Tecnologia Limpa e Controle Ambiental. Faculdade de Tecnologia de Americana. **Revista Química Têxtil**, mar. 2001.

BAUGHMAN, George L. et al. Fate of dyes in aqueous systems: I. Solubility and partitioning of some hydrophobic dyes and related compounds. **Environmental Toxicology and Chemical**, v. 7, n. 3, p. 183-199, mar. 1988.

BERGNA, Giovanni et al. GAC adsorption of ozonated secondary textile effluents for industrial water reuse. **Water Science and Technology**, v. 40, n. 4-5, p. 435-422, nov. 1999.

BHATIA, Subhash et al. Coagulation-flocculation process for POME treatment using Moringa oleifera seeds extract: Optimization studies. **Chemical Engineering Journal**, v. 133, n. 1-3, p. 205-212, set. 2007.

BRAILE, P. M. **Manual de Tratamento de Águas Residuárias Industriais**. São Paulo: CETESB, 1979.

CAN, O. T. et al. Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation. **Chemosphere**, v. 62, n. 2, p. 181-187, jan. 2006.

CASTRO-SILVA, M. A. et al. Microrganismos associados ao tratamento de águas de abastecimento com coagulante orgânico vegetal (tanato quaternário de amônio) – I. Microrganismos Filamentosos. **Revista Estudos de Biologia**, v. 26, n. 54, p. 21-27, jan./mar. 2004.

CERQUEIRA, Alexandre A. **Aplicação da técnica de eletrofloculação no tratamento de efluentes têxteis**. 2006. 111 f. Dissertação (Mestrado Química) - Universidade do Estado Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CHANG, Cheng-Nan et al. On-line Monitoring and Control of Textile wastewater color removal process. **Water Science and Technology**, v. 30, n. 3, p. 265-274, 1994.

CHEN, Guohua. Electrochemical technologies in wastewater treatment. **Separation and Purification Technology**, v. 38, n. 1, p. 11-41, jul. 2004.

CHEN, Xueming et al. Separation of pollutants from restaurant wastewater electrocoagulation. **Separation and Purification Technology**, v. 19, n. 1-2, p. 65-76, jun. 2000.

CHEN, Xuejun et al. Advanced treatment of textile wastewater for reuse using electrochemical oxidation and membrane filtration. **Water SA**, v. 31, n. 1, jan. 2005.

CIARDELLI, Gianluca et al. The treatment and reuse of wastewater in the textile industry by means of ozonation and eletrofloculation. **Water Research**, v. 35, n. 2, p. 567-572, fev. 2001.

COLBORN, T. et al. **O futuro roubado**, L&PM ed. Porto Alegre, 2002.

CONAMA. Resolução 357, de 17 de março de 2005. In: **Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>>. Acesso em: 10 jan. 2015.

CONAMA. Resolução 430, de 13 de maio de 2011. In: **Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acesso em: 10 jan. 2015.

CPRH, COMPANHIA PERNAMBUCANA DO MEIO AMBIENTE. **Roteiro Complementar de Licenciamento e Fiscalização: Tipologia Galvanoplastia**. Recife: CPRH/GTZ. 2001.

CRESPILHO, Frank N., REZENDE, M.O.O., **Eletroflotação: Princípios e Aplicações**. 1. ed. São Carlos: Rima, 2004.

DANESHVAR, N. et al. Decolorization of basic dye solution by electrocoagulation: An investigation of the effect of operational parameters. **Journal of Hazardous Materials**, v. 129, n. 1-3, p. 116-122, fev. 2006.

DANESHVAR, N. et al. Decolorization of C.I. Acid Yellow 23 solution by electrocoagulation process: Investigation of operational parameters and evaluation of specific electrical energy consumption (SEEC). **Journal of Hazardous Materials**, v. 148, n.1, p. 566-572, mar. 2007.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. v.1. São Carlos: Rima, 2005.

DRONDINA, R. V. et al. Electrochemical technology of fluorine removal from underground and wastewaters. **Journal of Hazardous Materials**, v. 37, n. 1, p. 91-100, abr. 1994.

DURÁN, Nelson et al. Degradation and toxicity reduction of textile effluent by combined photocatalytic and ozonization processes. **Chemosphere**. v. 40, n. 4, p. 369-373, fev. 2000.

ECKENFELDER, Jr., W. W. **Industrial Water Pollution Control**. New York: McGraw-Hill Book, 1989.

EDZWALD, James K. Review: Dissolved air flotation and me. *Water Research*, v. 44, n. 7, p. 2077-2106, abr. 2010.

ESTATCAMP - **Consultoria Estatística e Qualidade**. Disponível em: <<http://www.portalação.com.br/content/62-teste-de-kolmogorov-smirnov>>. Acesso em: 10 jan. 2015.

FIEMG (Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais) – CIRCUITO ABIT – TEXBRASIL. **Competitividade e internacionalização, 2014**. Disponível em: <http://www.abit.org.br/conteudo/links/apresentacoes/circuito_texbrasil/divinopolis/abit.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2015.

GALLÃO, Maria I. et al. Avaliação química e estrutural da semente de Moringa. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 37, n. 1, p. 106-109, 2006.

GAO, Ping et al. Removal of chromium (VI) from wastewater by combined electrocoagulation-electroflotation without a filter. **Separation and Purification Technology**, v. 43, n. 2, p. 117-123, mai. 2005.

GE, Jiantuan et al. New bipolar electrocoagulation-electroflotation process for the treatment of laundry wastewater. **Separation and Purification Technology**, v. 36, n. 1, p. 33-39, abr. 2004.

GHEBREMICHAEL, Kebeab A. et al. A simple purification and activity assay of the coagulant protein from Moringa oleífera seed. **Water Research**, v. 39, n. 11, p. 2338-2344, jun. 2005.

Gregory, J.; Rossi, L. Dynamic testing of water treatment coagulants. **Water Science & Technology: Water Supply**, v. 1, n. 4, p. 65-72, 2001.

GUARANTINI, C. C. I. et al. Corantes Têxteis. **Química Nova**, v. 23, n. 1, p. 71-78, 2000.

HASSEMER, M. E. N. **Tratamento de Efluente Têxtil – Processo físico-químico com ozônio e floculação em meio granular**. 2000. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

HENRIQUES, Danielle, M. **Degradação de nonilfenol polietoxilado e de efluente têxtil por meio de eletrocoagulação e processos fenton**. 2004. 98 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

HEREDIA, J. Beltrán et al. Removal of Carmine Indigo Dye with *Moringa oleifera* Seed Extract. **Ind. Eng. Chem. Res.**, v. 48, p. 6512-6520, 2009.

HEREDIA, J. Beltrán et al. Long-chain anionic surfactants in aqueous solution. Removal by *Moringa oleifera* coagulant. **Chemical Engineering Journal**, v. 180, p. 128-136, 2012.

HOLT, Peter K. et al. A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 211, n. 2-3, p. 233-248, dez. 2002.

HOSNY, Ashraf Y. Separating oil from oil-water emulsion by electroflotation technique. **Separations Technology**, v. 6, n. 1, p. 9-17, fev. 1996.

HUITLE, Carlos A. M. et al. Applicability of diamond electrode/anode to the electrochemical treatment of a real textile effluent. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 674, n. 1, p. 103-107, jun. 2012.

INAN, H. et al. Olive oil mil wastewater treatment by means of electrocoagulation. **Separations and Purification Technology**, v. 36, n. 1, p. 23-31, abr. 2004.

JORDÃO, E. P; PESSOA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 3. ed. Rio de Janeiro: ABES, 1995.

JUNIOR, Osorio M. C. et al. Estudo sobre a coagulação e floculação de tratamento de efluentes da indústria têxtil. **Acta Scientiarum - Technology**, v. 35, n. 1, p.83-88, jan./mar. 2013.

KARADI, R. V. et al. Effect of *Moringa oleifera* Lam. root-wood on ethylene glycol induced urolithiasis in rats. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 105, p. 306-311, 2006.

KARCHER, S. et al. Removal of reactive dyes by sorption/complexation with cucurbituril.

Water Science and Technology, v. 40, n. 4-5, p. 425-433, nov. 1999.

KIN, Tak-Hyun et al. Effects of Cl-based chemical coagulants on electrochemical oxidation of textile wastewater. **Desalination**, v. 155, n. 1, p. 59-65, mai. 2003.

KOBYA, Mehmet et al. Treatment of textile wastewater by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 100, n. 1-3, p. 163-178, jun. 2003.

KOUBA, J. F.; PING, Z. Color Removal for Textiles dyeing Wastewater. **Fluid Particle Separation Journal**, v. 7, n. 3, p. 87-90, 1994.

KUNZ, A. et al. Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. **Química Nova**, v. 25, p. 78-82, 2002.

LEE, Bing-Nan et al. Photocatalytic Decolorization of Methylene Blue in Aqueous TiO₂ Suspension. **Environmental Engineering Science**, v. 16, n. 3, p. 165-175, mai./jun. 1999.

LEVIN, Jack et al. **Estatística para ciências humanas**. 11. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2012.

LOPEZ, R. et al. Descoloração de águas residuais da indústria têxtil. **Química Têxtil**, v. 59, p. 66-69, 2000.

LORA, E. E. S. **Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2002.

MARTÍN, J. Sánchez et al. Surface water and wastewater treatment using a new tannin-based coagulant. Pilot plant trials. **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 10, p. 2051-2058, out. 2010.

MARTINEZ, F. L. **Taninos vegetais e suas aplicações**. Cuba: Universidade de Havana, 1996.

MARTINEZ, F. L. et al. **Resinas de taninos vegetais para a Remoção de metais**. Cuba: Universidade de Havana, 1997.

MATTESON, Michael J. et al. Electrocoagulation and separation of aqueous suspensions of ultrafine particles. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 104, n. 1, p. 101-109, nov. 1995.

MENDES, Carlos G. da N. **Estudo de coagulação e floculação de água sintéticas e naturais com turbidez e cor variáveis**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia São Carlos da Universidade do Estado de São Paulo. São Carlos, 1989.

MERZOUK, B. et al. Effect of modification of textile wastewater composition on electrocoagulation efficiency. **Desalination**, v. 275, n. 1-3, p. 181-186, jul. 2011.

METCALF & EDDY. **Inc. Wastewater Engineering – treatment and reuse**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

MOLLAH, M.Yousuf A. et al. Electrocoagulation (EC): science and applications. **Journal of Hazardous Materials**, v. 84, n. 1, p. 29-41, jun. 2001.

MORETTI, Renata C. Aplicação da flotação para clarificação final do efluente de um sistema de tratamento de esgoto sanitário constituído de reatores anaeróbios (UASB) seguidos de lagoa aerada. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 21 Feira Internacional de Tecnologias de Saneamento Ambiental, 2001, Paraíba**. Anais Paraíba: 2001.

MOSTEFA, N. M. et al. Coupling flocculation with electroflotation for waste oil/water emulsion treatment. Optimization of the operating conditions. **Desalination**, v. 161, n. 2, p. 115-121, fev. 2004.

MURUGANANTHAR, M. et al. Separation of pollutants from tannery effluents by electro flotation. **Separation and Purification Technology**, v. 40, n. 1, p. 69-75, nov. 2004.

NDABIGENGESERE Anselme et al. Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera*. **Water Research**, v. 29, n. 2, p.703-710, fev. 1995.

NDABIGENGESERE, Anselme; NARASIAH, K Subba. Quality of water treated by coagulation using *Moringa oleifera* seeds. **Water Research**, v. 32, n. 3, p. 781-791, mar. 1998.

NIGAM, P. et al. Physical removal of textile dyes from effluent and solid-state fermentation of dyeadsorbed agricultural residues. **Bioresource Technology**, v. 72, n. 3, p. 219-226, mai. 2000.

NKURUNZIZA, T. et al. The effect of turbidity levels and *Moringa oleifera* concentration on the effectiveness of coagulation in water treatment. **Water Science & Technology**, v. 59, n. 8, p. 1551-1558, 2009.

NWAIWU, N. E.; LINGMU, B. Studies on the effect of settling time on coliform reduction using *Moringa oleifera* seed powder. **Journal of applied Sciences in Environmental Sanitation**, v.6, n. 3, p. 279-286, 2011.

PASCHOAL, F. M. M.; FILHO, G. T. Aplicação da tecnologia de eletrofloculação na recuperação do corante índigo blue a partir de efluentes industriais. **Química Nova**, v. 28, n. 5, p. 766-772, 2005.

PAVANELLI, Gerson. **Eficiência de diferentes tipos de coagulante na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada**. 2001. 216 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2001.

PERES, C. S.; ABRAHÃO, A. J. Características e sistemas de águas residuais das indústrias têxteis. Uma primeira abordagem. **Revista Química Têxtil**, p. 22-39, 1998.

PIOLTINE, Andre; REALI, Marco A. P. Emprego de bomba multifásica como unidade geradora de microbolhas de ar em sistema de flotação aplicado ao pré-tratamento de efluente têxtil. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 12, n. 2, p. 167-174, abr./jun. 2011.

PRITCHARD, M. et al. A comparison between *Moringa oleifera* and chemical coagulants in the purification of drinking water – An alternative sustainable solution

for developing countries. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 35, n. 13-14, p. 798-805, 2010.

QUARTAROLI, Larissa et al. Aplicação de polímeros aniônico e catiônico na flotação por ar dissolvido como forma de pós-tratamento de efluente de indústria de papel e celulose. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 101, p. 57-67, mar. 2014.

RAGHU, S.; BASHA, C. Ahmed. Chemical or electrochemical techniques, followed by ion exchange, for recycle of textile dye wastewater. **Journal of Hazardous Materials**, v. 149, n. 1, p. 324-330, abr. 2007.

RESENDE, Leticia P. Reúso na indústria têxtil e lavanderias. **Hydro**, abr. 2012.

RICHTER, C. A.; AZEVEDO, J. H. **Tratamento de água: tecnologia atualizada**. São Paulo: Edgar Blücher, 1995.

RODRIGUES, Rafael T.; RUBIO, Jorge. DAF-dissolved air flotation: Potential applications in the mining and mineral processing industry. **International Journal of Mineral Processing**, v. 82, n. 1, p. 1-13, fev. 2007.

SANFAN, Wang; QINLAI, Wang. Experimental studies on pretreatment process of brackish water using electrocoagulation (EC) method. **Desalination**, v. 66, p. 353-364, dez. 1987.

SANGHI, Rashmi et al. *Ipomoea dasysperma* seed gum: an effective natural coagulant for the decolorisation of textile dye solutions. **Journal of Environmental Management**, v. 81, n.1, p. 36-41, out. 2006.

SANIN, L. B. B. Tecnologia e Meio Ambiente. **Associação Brasileira de Químicos Coloristas Têxteis**, v. 4, p. 13-14, 1996.

SANTOS, E. P. C. C. et al. Estudo da coagulação aplicada à filtração direta descendente. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 12, n. 4, 2007.

SANTOS, Felipe S. dos et al. Avaliação da Eficiência do Processo de Coagulação/Floculação Aplicado ao Tratamento Primário de Efluente da Indústria Petroquímica. **Engvista**, v. 16, n. 4, p. 404-413, dez. 2014.

SHEN, Feng et al. Electrochemical removal of fluoride ions from industrial wastewater. **Chemical Engineering Science**, v. 58, n. 1-3, p. 987-993, mar. 2003.

SIDDHURAJU, Perumal; BECKER, Klaus. Antioxidant Properties of Various Solvent Extracts of Total Phenolic Constituents from Three Different Agroclimatic Origins of Drumstick Tree (*Moringa oleifera* Lam.) Leaves. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 51, n. 8, p. 2144-2155, mar. 2003.

SILVA, Ana C. L. da et al. Remoção de DQO e de cor através do tratamento eletrolítico. In: **ABES – XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2000, Porto Alegre. Anais Porto Alegre: ABES, 2000.

SILVA, F. J. A. et al. Descolorização de efluente da indústria têxtil utilizando coagulante natural (*Moringa oleifera* e quitosana). In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 21, 2001**, João Pessoa. Anais João Pessoa: ABES, 2001.

SILVA, Telma S. S. **Estudo de tratabilidade físico-química com uso de taninos vegetais em água de abastecimento e de esgoto**. 1999. 87 f. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) - Escola Nacional de Saúde Pública – Fundação Oswaldo Cruz, São Paulo, 1999.

Solari, J. A. **Avanços recentes no tratamento de efluentes por flotação a ar dissolvido**. Rio de Janeiro: Engenharia Sanitária, 1981. p. 332-335.

SPINELLI, Viviane A. **Quitosana, polieletrólito natural para o tratamento de água potável**. 2001. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

SRIVASTAVA, Vimal C. et al. Treatment of pulp and paper mill wastewater with poly aluminium chloride and bagasse fly ash. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 260, n. 1-3, p. 17-28, jun. 2005.

STRÖHER, Ana P. et al. Aplicação de *Moringa Oleífera* Lam no Tratamento de Efluente Proveniente da Lavagem de Jeans. *E-xacta*, v. 5, n. 1, p. 61-66, jul. 2012.

STRÖHER, Ana P. et al. Utilização de Coagulantes Naturais no Tratamento de Efluente Proveniente de Lavagem de Jeans. **Engvista**, v. 15, n.3, p. 255-260, dez. 2013.

TANAC. **TANFLOC SG**. Disponível em:
<http://www.tanac.com.br/sites/default/files/CT_TANFLOC_SG_PT_0.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2015.

TANAKA, Keiichi et al. Photocatalytic degradation of commercial azo dyes. **Water Research**, v. 34, n. 1, p. 327-333, jan. 2000.

TOLEDO, R. A. S. Tecnologia da Reciclagem. **Química Têxtil**, p. 8-14, mar. 2004.

VEERAMALINI, J. B. et al. Removal of Reactive Yellow Dye from Aqueous Solutions by Using Natural Coagulant (Moringa Oleifera). **International Journal of Science, Environment and Technology**, v. 1, n. 2, p. 56-62, 2012.

VERMA, Akshaya K. et al. 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, jan. 2012.

VIK, Eilen A. et al. Electrocoagulation of potable water. **Water Research**, v. 18, n. 11, p. 1355-1360, 1984.

WATANABE, M; USHIYAMA, T. Characteristics and effective applications of polymer coagulants. Technology Exchange Dept. Japan External Trade Organization. Tokio – Japan. In: **Energy and Environmental Technology Diffusion and Cooperation**, p. 1-17, 2000.

WIENDL, W. G. **Processos eletrolíticos no tratamento de esgotos sanitários**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABES, 1998.

WILLMOTT, Nicola et al. The biotechnology approach to colour removal from textile effluent. **Journal of the Society of Dyers and Colourists**. v. 114, n. 2, p. 38-41, fev. 1998.

XU, Xinhua et al. Treatment of refractory oily wastewater by electro-coagulation process. **Chemosphere**, v. 56, n. 10, p. 889-894, set. 2004.

ZAROUAUL, Z. et al. Contribution to the study of electrocoagulation mechanism in basic textile effluent. **Journal of Hazardous Materials**, v. 131, n. 1-3, p. 73-78, abr. 2006.