

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

**TÉCNICA DE ELETROFLOTAÇÃO APLICADA NA
REMOÇÃO DE CORES DE EFLUENTES TÊXTEIS**

**Dissertação submetida e apresentada a
exame de qualificação de Mestrado na
Faculdade de Engenharia Química
como parte dos requisitos exigidos para
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Química.**

Autor: Ricardo Augusto Camboim

Orientador: Prof. Dr. João Sinézio de Carvalho Campos

**CAMPINAS - SÃO PAULO
JULHO DE 2010**

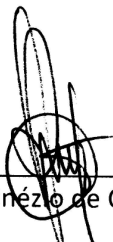
C142t Camboim, Ricardo Augusto
Técnica da eletroflotação aplicada na remoção de
cores de efluentes têxteis / Ricardo Augusto Camboim. --
Campinas, SP: [s.n.], 2010.

Orientador: João Sinézio de Carvalho Campos.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Flotação. 2. Tratamento de efluentes. 3. Indústria
têxtil. 4. Corantes. 5. Cores. I. Campos, João Sinézio
de Carvalho. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Programa de Pós Graduação: Engenharia Química

Dissertação de Mestrado defendida por Ricardo Augusto Camboim e aprovada em
23 de Julho de 2010 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



Prof. Dr. João Sinézio de Carvalho Campos (orientador)

Faculdade de Engenharia Química / UNICAMP



Profa. Dra. Doralice de Souza Luro Balan

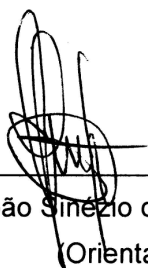
Faculdade de Tecnologia / Bragança Paulista – S.P.



Profa. Dra. Lúcia Helena I. Mei

Faculdade de Engenharia Química / UNICAMP

Este exemplar corresponde à versão final da Dissertação de Mestrado em Engenharia Química

A handwritten signature in black ink, consisting of several loops and a horizontal stroke, positioned above a horizontal line.

Prof. Dr. João Sinezio de Carvalho Campos
(Orientador)

Dedicatória

**Aos meus avós Emília e Syro (*in memorian*),
Meus pais Agostinho (*in memorian*) e Neusa e meus irmãos Sonia (*in memorian*) e Carlos
Sendo que cada um me incentivou ao estudo à sua maneira
A minha amada esposa Regina por toda compreensão e
pela ajuda de todas as formas para a realização deste trabalho e
Aos meus filhos Letícia e Leonardo pela alegria de tê-los comigo todos os dias.**

AGRADECIMENTOS

À indústria CS Comércio e Beneficiamentos Têxteis Ltda. – pela disponibilização do efluente e pelas análises realizadas.

À Wellington Alves Teixeira pela disposição, carinho e ajuda prestada, em todos os âmbitos, na realização deste trabalho

A Caio Raphael Vanoni Forcinitti e Ligia Rodrigues Aydar pelas análises realizadas.

À Família Looney que de uma forma ou de outra sempre me apoiou e tornaram os meus dias mais felizes.

Ao meu orientador Prof. Dr. João Sinézio de Carvalho Campos pela orientação, pela dedicação e em especial pela amizade demonstrada.

A Prof. Dr^a Silgia Aparecida da Costa pela paciência, ajuda, apoio e oportunidade de sempre disponibilizar o seu laboratório.

Frase:

*“E conhecereis a Verdade
e a Verdade vos Libertará”*

Jesus Cristo – João 8:32

RESUMO:

Com o aumento da preocupação do homem com o meio ambiente, as indústrias passaram a se preocupar mais com o descarte de seus efluentes, com isso, vem sendo desenvolvidas técnicas para tratamento de efluentes.

No presente trabalho utiliza-se a técnica de eletroflotação, para o tratamento de efluente de tinturaria de tecidos, a qual utiliza corantes reativos. Para tal montou-se um reator composto por: Uma cuba com capacidade para 50 litros, uma fonte de tensão com potencia ajustável e eletrodos metálicos com geometria retangular com área efetiva de 216 cm².

Os parâmetros estudados compreendem o tipo de material utilizado como eletrodo (ferro, aço inox e alumínio), o pH, temperatura e turbidez. Também foi feito a análise espectrofotométrica para avaliar a remoção de cor, também fizemos analise de DBO, DQO, Turbidez e Sólidos Totais no inicio e no final do tratamento.

De acordo com os resultados observa-se uma drástica redução da turbidez, um leve aumento do pH (cerca de 10% do valor inicial) e aumento da temperatura (tipicamente 10%) no final do tratamento.

Cabe ressaltar que neste processo de eletroflotação não se utiliza nenhum produto químico, somente energia elétrica.

Assim tal processo torna-se bastante interessante devido à alta eficiência na remoção total da coloração do efluente em pouco tempo de tratamento em comparação com tratamentos convencionais. Ainda mais, pela análise visual do sobrenadante, verifica-se adicionalmente uma significativa remoção de material orgânico, tornando-o atrativo do ponto de vista ambiental.

Palavras – chave: Eletroflotação, Tratamento de Efluentes, Cor, Têxtil

ABSTRACT

With the increase of man's concern with the environment, industries began to worry more about the disposal of their waste, thereby, have been developed techniques for effluents treatment.

The present work uses the technique of electroflotation for the treatment of effluents from dyeing of fabrics, which uses reactive dyes. In order to do this, a reactor was set up being composed by a tank with a capacity of 50 liters, a source of tension with adjustable power and metal electrodes with rectangular geometry with effective area of 216 cm².

The parameters studied include the type of material used as electrode (iron, steel and aluminum), pH, temperature and turbidity was also made a spectrophotometric analysis to evaluate the removal of color, we also examine the BOD, COD, Turbidity and Total Solids from the beginning and from the end of treatment.

According to the results there is a drastic reduction in turbidity, a slight increase in pH (about 10% over baseline) and increased temperature (typically 10%) at the end of treatment.

It is noteworthy that this electroflotation process do not use any chemicals, only electric power.

So this process becomes quite interesting because of the high efficiency in removal of the color of the effluent in a short time of treatment compared with conventional treatments. Moreover, from the visual analysis of the supernatant, there is additionally a significant removal of organic material, making it attractive from an environmental standpoint

Keywords: *Treatment of Effluent, Electroflotation, Colour and Textile*

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	A INDÚSTRIA TÊXTIL	6
2.1.1	VISÃO GERAL	6
2.1.2	FUNDO HISTÓRICO	8
2.1.3	MERCADO TÊXTIL	13
2.1.4	CADEIA TÊXTIL	16
2.1.4.1	FIBRAS	17
2.1.4.2	FIAÇÃO	21
2.1.4.3	TECELAGEM	25
2.1.4.4	MALHARIA	25
2.1.4.5	TINTURARIA	27
2.2	ÁGUA	49
2.2.1	INTRODUÇÃO	49
2.2.2	DISTRIBUIÇÃO	51
2.2.3	CRESCIMENTO DEMOGRÁFICO	54
2.2.4	DEGRADAÇÃO	56
2.2.5	GESTÃO	58
2.2.6	NA INDÚSTRIA	61
2.2.7	NO PROCESSO TÊXTIL	64

2.2.8	CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE TÊXTIL	73
2.3	ELETROFLOTAÇÃO	82
2.3.1	FUNDAMENTOS DO PROCESSO	86
2.3.1.1	REATOR	87
2.3.1.2	FLOTAÇÃO	91
2.3.1.3	REAÇÕES QUÍMICAS	94
2.3.1.4	FATORES QUE INFLUENCIAM O PROCESSO	99
2.3.2	PARÂMETROS ASSOCIADOS À ELETROFLOTAÇÃO	102
2.3.2.1	pH	102
2.3.2.2	CONDUTIVIDADE	103
2.3.2.3	TEMPERATURA	104
2.3.2.4	SOBRENADANTE	105
2.3.2.5	VELOCIDADE DE ASCENSÃO DAS BOLHAS	106
2.3.2.6	PRODUÇÃO DE GASES	110
2.3.2.7	TURBIDEZ	111
2.3.2.8	CONCENTRAÇÃO DE ÓLEOS E GRAXAS	112
2.3.2.9	SÓLIDOS TOTAIS	112
2.3.2.10	CARBONO ORGÂNICO TOTAL	113
2.3.2.11	DBO	113
2.3.2.12	DQO	114
2.3.2.13	MATERIAL DOS ELETRODOS	114
2.3.2.14	DISTANCIA ENTRE OS ELETRODOS	115
2.3.2.15	CONSUMO DOS ELETRODOS	116

2.3.2.16	TEMPO DE DESGASTE DOS ELETRODOS	117
2.3.2.17	PASSIVAÇÃO DOS ELETRODOS	118
2.3.2.18	DENSIDADE DE CORRENTE	119
2.3.2.19	EFICIÊNCIA DA CORRENTE	122
2.3.2.20	DENSIDADE DE CARGA	123
2.3.2.21	CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA	124
2.3.2.22	CUSTO DA OPERAÇÃO	125
2.3.2.23	EFICIÊNCIA DA REMOÇÃO	126
2.3.3	VANTAGENS E DESVANTAGENS DA ELETROFLOTAÇÃO	126
2.3.3.1	VANTAGENS DA ELETROFLOTAÇÃO	127
2.3.3.2	COMPARAÇÃO ENTRE ELETROFLOTAÇÃO E TRATAMENTOS FÍSICO-QUÍMICOS CONVENCIONAIS	129
2.3.3.3	COMPARAÇÃO ENTRE ELETROFLOTAÇÃO E TRATAMENTO POR LODO ATIVADO	131
2.3.3.4	DESVANTAGENS DA ELETROFLOTAÇÃO	133
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	134
3.1	COLETA E PRESERVAÇÃO DAS AMOSTRAS	134

3.1.1	COLETA DOS EFLUENTES	134
3.1.2	PRESERVAÇÃO DAS AMOSTRAS	136
3.1.3	COLETA E PRESERVAÇÃO DAS AMOSTRAS TRATADAS	137
3.2	REATOR DE ELETROFLOTAÇÃO	138
3.3	PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO	141
3.4	PARÂMETROS E METODOLOGIAS ANALÍTICAS	141
3.4.1	PARÂMETROS FÍSICOS E QUÍMICOS	141
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	152
4.1	OBJETIVOS	152
4.2	PROBLEMAS E SOLUÇÕES	152
4.3	RESULTADOS	154
4.3.1	ENSAIO COM ELETRODOS DE ALUMÍNIO	155
4.3.2	ENSAIO COM ELETRODOS DE FERRO	161
4.3.3	ENSAIO COM ELETRODOS DE FERRO E ALUMÍNIO	167
4.3.4	COMPARATIVO DOS PARÂMETROS OBTIDOS	176
	4.3.4.1 pH	176
	4.3.4.2 CONDUTIVIDADE	177
	4.3.4.3 TEMPERATURA	178
	4.3.4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	179
4.3.5	EFICIÊNCIA DA REMOÇÃO DE COR COM ELETRODOS DE ALUMÍNIO	181

4.3.5.1	ESTUDO NA ÁREA DO VISÍVEL	186
4.3.5.2	ESTUDO NA ÁREA DO ULTRAVIOLETA	189
4.3.5.3	ENSAIO COM EFLUENTES SIMULADOS	194
5.	CONCLUSÕES	200
6.	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	201
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA	202
8.	APÊNDICE	217

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1	FLUXO DE PRODUÇÃO DA CADEIA TÊXTIL	7
FIGURA 2	CONSUMO MUNDIAL DE FIBRAS TÊXTEIS	14
FIGURA 3	ESQUEMA SIMPLIFICADO DA CADEIA TÊXTIL	16
FIGURA 4	ESTRUTURA QUÍMICA DA CELULOSE	19
FIGURA 5	FLUXOGRAMA DE UMA FIAÇÃO DE ALGODÃO CARDADO	23
FIGURA 6	FLUXOGRAMA DE UMA FIAÇÃO DE ALGODÃO PENTEADO	24
FIGURA 7	FASES DO TINGIMENTO	44
FIGURA 8	DISTRIBUIÇÃO DAS RESERVAS DE ÁGUA NO PLANETA	50
FIGURA 9	SETORES CONSUMIDORES DE ÁGUA	55
FIGURA 10	EFICIÊNCIA NA REMOÇÃO DE DQO, MBAS, FOSFATO E TURBIDEZ EM FUNÇÃO DO pH	85
FIGURA 11	DESENHOS DOS ARRANJOS DOS ELETRODOS EM SÉRIE	88
FIGURA 12	DESENHOS DOS ARRANJOS DOS ELETRODOS EM PARALELO	89
FIGURA 13	DESENHO ESQUEMÁTICO DE UM REATOR	89
FIGURA 14	MODELO ESQUEMÁTICO DE UM REATOR ELETROQUÍMICO	90
FIGURA 15	FENÔMENO DE CAPTURA	91
FIGURA 16	DIAGRAMA DE HIDROLISE DO ALUMÍNIO	96
FIGURA 17	DIAGRAMA DE ATIVIDADE DO FERRO	99

FIGURA 18	CONFIGURAÇÃO ESQUEMÁTICA DA DUPLA CAMADA ELÉTRICA	101
FIGURA 19	GRÁFICO CARTESIANO BILOGARÍTMICO DA TEMPERATURA COM O DIÂMETRO DAS BOLHAS	110
FIGURA 20	COMPORTAMENTO DA DENSIDADE DE CORRENTE	121
FIGURA 21	EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE ÓLEO NA EFICIÊNCIA DO TRATAMENTO	129
FIGURA 22	EFICIÊNCIA DA REMOÇÃO DOS CONTAMINANTES	130
FIGURA 23	PONTO DE COLETA DO EFLUENTE	135
FIGURA 24	REATOR ELETROLÍTICO	138
FIGURA 25	SISTEMA DE FONTE	139
FIGURA 26	ESQUEMA DE MONTAGEM DO ELETRODO	140
FIGURA 27	DESENHO ESQUEMÁTICO DE UM REATOR	140
FIGURA 28	pHMÊTRO	142
FIGURA 29	CONDUTIVÍMETRO	143
FIGURA 30	ESPECTROFOTÔMETRO	150
FIGURA 31	PLACAS DE ALUMÍNIO CORROÍDAS PELA ELETRÓLISE	153
FIGURA 32	GRÁFICO DO pH COM ELETRODOS DE ALUMÍNIO	156
FIGURA 33	GRÁFICO DA CONDUTIVIDADE COM ELETRODOS DE ALUMÍNIO	157
FIGURA 34	GRÁFICO DA TEMPERATURA COM ELETRODOS DE ALUMÍNIO	158

FIGURA 35	GRÁFICO DA ABSORBÂNCIA DO EFLUENTE BRUTO	159
FIGURA 36	GRÁFICO DA ABSORBÂNCIA DO EFLUENTE TRATADO COM ALUMÍNIO	160
FIGURA 37	GRÁFICO DO pH COM ELETRODOS DE FERRO	162
FIGURA 38	GRÁFICO DA CONDUTIVIDADE COM ELETRODOS DE FERRO	163
FIGURA 39	GRÁFICO DA TEMPERATURA COM ELETRODOS DE FERRO	164
FIGURA 40	GRÁFICO DA ABSORBÂNCIA DO EFLUENTE BRUTO	165
FIGURA 41	GRÁFICO DA ABSORBÂNCIA DO EFLUENTE TRATADO COM FERRO	166
FIGURA 42	TRATAMENTO DE EFLUENTE COM ELETRODOS DE FERRO	167
FIGURA 43	GRÁFICO DO pH COM ELETRODOS DE FERRO E ALUMÍNIO	169
FIGURA 44	GRÁFICO DA CONDUTIVIDADE COM ELETRODOS DE FERRO	170
FIGURA 45	GRÁFICO DA TEMPERATURA COM ELETRODOS DE FERRO	171
FIGURA 46	GRÁFICO DA ABSORBÂNCIA DO EFLUENTE BRUTO	173
FIGURA 47	GRÁFICO DA ABSORBÂNCIA DO EFLUENTE TRATADO COM FERRO E ALUMÍNIO	174
FIGURA 48	FOTOS DO EFLUENTE TRATADO COM FERRO E ALUMÍNIO	175
FIGURA 49	GRÁFICO DA ABSORBÂNCIA DO EFLUENTE BRUTO AZUL	181
FIGURA 50	GRÁFICO DA ABSORBÂNCIA DO EFLUENTE TRATADO 1h AZUL	182
FIGURA 51	GRÁFICO DA ABSORBÂNCIA DO EFLUENTE TRATADO 5h AZUL	182

FIGURA 52	FOTOS DO EFLUENTE TRATADO AZUL COM ALUMÍNIO	183
FIGURA 53	GRÁFICO DA ABSORBÂNCIA DO EFLUENTE BRUTO VERMELHO	184
FIGURA 54	GRÁFICO DA ABSORBÂNCIA DO EFLUENTE TRATADO 1h VERMELHO	184
FIGURA 55	GRÁFICO DA ABSORBÂNCIA DO EFLUENTE TRATADO 5h VERMELHO	185
FIGURA 56	GRÁFICO DA ABSORBÂNCIA DO EFLUENTE AZUL NA ÁREA DO VISÍVEL	187
FIGURA 57	GRÁFICO DA ABSORBÂNCIA DO EFLUENTE VERMELHO NA ÁREA DO VISÍVEL	187
FIGURA 58	GRÁFICO DA ABSORBÂNCIA DO EFLUENTE AZUL NA ÁREA DO ULTRAVIOLETA	189
FIGURA 59	GRÁFICO DA ABSORBÂNCIA DO EFLUENTE VERMELHO NA ÁREA DO ULTRAVIOLETA	190
FIGURA 60	GRÁFICO DA ABSORBÂNCIA DO DISPERSANTE	191
FIGURA 61	GRÁFICO DA ABSORBÂNCIA DO ANTIQUEBRADURA	191
FIGURA 62	GRÁFICO DA ABSORBÂNCIA DO PERÓXIDO	192
FIGURA 63	GRÁFICO DA ABSORBÂNCIA DO DESLIZANTE	192
FIGURA 64	GRÁFICO DA ABSORBÂNCIA DO SEQUESTRANTE	193
FIGURA 65	GRÁFICO DA ABSORBÂNCIA DOS PRODUTOS AUXILIARES	193
FIGURA 66	GRÁFICO DA ABSORBÂNCIA DO EFLUENTE SIMULADO AMARELO	194

FIGURA 67	GRÁFICO DA ABSORBÂNCIA DO EFLUENTE SIMULADO AMARELO NA REGIÃO DO VISÍVEL	195
FIGURA 68	FOTOS DO TRATAMENTO NO EFLUENTE SIMULADO AMARELO	195
FIGURA 69	GRÁFICO DA ABSORBÂNCIA DO EFLUENTE SIMULADO VERMELHO	196
FIGURA 70	GRÁFICO DA ABSORBÂNCIA DO EFLUENTE SIMULADO VERMELHO NA REGIÃO DO VISÍVEL	196
FIGURA 71	FOTOS DO TRATAMENTO NO EFLUENTE SIMULADO VERMELHO	197
FIGURA 72	GRÁFICO DA ABSORBÂNCIA DO EFLUENTE SIMULADO AZUL	197
FIGURA 73	GRÁFICO DA ABSORBÂNCIA DO EFLUENTE SIMULADO AZUL NA REGIÃO DO VISÍVEL	198
FIGURA 74	FOTOS DO TRATAMENTO NO EFLUENTE SIMULADO AZUL	198

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	PRINCIPAIS INVENÇÕES E SEUS INVENTORES	9
TABELA 2	FICHA TÉCNICA DO SETOR TÊXTIL PAULISTA	15
TABELA 3	CLASSIFICAÇÃO DAS FIBRAS	17
TABELA 4	AGENTES E SUAS AÇÕES NA CELULOSE	20
TABELA 5	TEOR DE IMPUREZAS DO ALGODÃO	28
TABELA 6	PROCESSO DE PURGA	29
TABELA 7	PROCESSO DE ALVEJAMENTO	31
TABELA 8	PRINCIPAIS PRODUTOS QUÍMICOS UTILIZADOS NO TINGIMENTO	34
TABELA 9	TIPOS DE CORANTES UTILIZADOS PARA CADA TIPO DE FIBRA	37
TABELA 10	CORANTES E SUAS DESCRIÇÕES	38
TABELA 11	CARACTERÍSTICAS DO CORANTE REATIVO	43
TABELA 12	INFORMAÇÕES BÁSICAS SOBRE BACIAS HIDROGRÁFICAS BRASILEIRAS	53
TABELA 13	TARIFA RESIDENCIAL E INDUSTRIAL DA SABESP	60
TABELA 14	TRATAMENTOS TERCIÁRIOS PARA ELIMINAÇÃO DA COR	67
TABELA 15	CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE TÊXTIL	75
TABELA 16	NORMAS TÉCNICAS	75
TABELA 17	CARACTERÍSTICAS DO EFLUENTE TÊXTIL	75

TABELA 18	CONTRIBUIÇÃO DOS AUXILIARES TÊXTEIS NA DQO DO EFLUENTE	76
TABELA 19	CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE EM CADA ETAPA DO TINGIMENTO	77
TABELA 20	METAIS PESADOS NO EFLUENTE TÊXTIL E SUA FONTE DE CONTAMINAÇÃO	80
TABELA 21	RELAÇÃO ENTRE VELOCIDADE TEÓRICA DE ASCENSÃO DAS BOLHAS	109
TABELA 22	COMPARAÇÃO ENTRE O PROCESSO ELETROLÍTICO E LODOS ATIVADOS	132
TABELA 23	CRITÉRIOS DE VOLUME E PRESERVAÇÃO DAS AMOSTRAS	136
TABELA 24	RESULTADOS DOS ENSAIOS COM ELETRODOS DE ALUMÍNIO	155
TABELA 25	RESULTADOS DOS ENSAIOS COM ELETRODOS DE FERRO	161
TABELA 26	RESULTADOS DOS ENSAIOS COM ELETRODOS DE FERRO E ALUMÍNIO	168
TABELA 27	pH INICIAL E FINAL NOS ENSAIOS	176
TABELA 28	CONDUTIVIDADE INICIAL E FINAL NOS ENSAIOS	177
TABELA 29	TEMPERATURA INICIAL E FINAL NOS ENSAIOS	178
TABELA 30	EFICIÊNCIA PERCENTUAL DOS TRATAMENTOS RELATIVO AOS PARÂMETROS pH, CONDUTIVIDADE E TEMPERATURA	180
TABELA 31	PERCENTUAL DE REMOÇÃO DE COR	186
TABELA 32	PERCENTUAL DE REMOÇÃO DE COR	199

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A.E.C. – Antes da Era Cristã

ABIT – Associação Brasileira da Indústria Têxtil

ANA – Agência Nacional de Água

AOX - Organohalogenados Adsorvíveis

BNDES – Banco Nacional do Desenvolvimento

CE50 - concentração efetiva média

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

CI - Carbono Inorgânico

CL50 – concentração letal média

CNTP – Condições Normais de Temperatura e Pressão

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

COT – Carbono Orgânico Total

d.d.p – Diferença de potencial

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

EB – Efluente Bruto

E.C. – Era Cristã

EF – Eletroflotação

ETE – Estação de Tratamento de Efluentes

FAO – Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação

GP – Grau de Polimerização

IEDI – Instituto de Estudos para o Desenvolvimento Industrial

ITMA – Feira Internacional de Produtos e Maquinário Têxtil

M. E. – Microscopia Eletrônica

OD – Oxigênio Dissolvido

OMS – Organização Mundial da Saúde

ONG – Organização Não Governamental

p.p.b. – Partes por Bilhão

PIB – Produto Interno Bruto

RB – Relação de Banho

SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

SS – Sólidos Suspensos

ST – Sólidos Totais

STF – Sólidos Totais Fixos

STV – Sólidos Totais Voláteis

UNESCO – Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

UNICEF - Fundo das Nações Unidas para a Infância

WWF - World Wide Fund For Nature

NOMENCLATURA

α - Equivalente eletroquímico da substância (g/C)

μ_{Ag} – Coeficiente de viscosidade (dinâmica) da água (kg.s/m²)

ΔT – Diferença entre as temperaturas final e inicial do efluente.

ρ_{Ag} – Densidade da água (massa específica/g), kg.s²/m⁴.

ρ_g – Densidade do gás (massa específica/g), kg.s²/m⁴.

$\frac{\partial c}{\partial x}$ = *Gradiente de concentração*

$\frac{\partial s}{\partial t}$ = *Velocidade de difusão*

ΔM_{teor} – Massa da colméia teoricamente consumida durante a EF em g

α – Equivalente eletroquímico do material do eletrodo em g/A.h,

δ – Densidade de corrente em A/m².

ε – Constante conhecida como absorbtividade molar

η – Eficiência de remoção em %,

ρ – Densidade do material do eletrodo em g/L,

φ – Eficiência da corrente, em %.

A – Área

a – Custo de energia, R\$/kWh.

A – Aabsorvância medida;

$A_{\text{eletrodos}}$ – Área efetiva do eletrodo (m²)

A_{anodo} – Área total dos anodos em m².

b – Custo mássico da placa, R\$/kg de eletrodo.

d_b – Diâmetro de bolhas

c – Concentração da substância.

$c_{eletrodo}$ – Consumo do eletrodo, kg/m^3 efluente.

$C_{energia}$ – Consumo de energia, em kW.h/m^3 de efluente.

C_f – Concentração final em mg/L .

C_f – Densidade de carga em F/m^3 .

C_i – Concentração inicial em mg/L

$C_{operação}$ – Custo de operação em $\text{R\$/m}^3$ de efluente.

C_p – Capacidade calorífica da água ($= 1 \text{ cal/g.}^\circ\text{C}$)

D - Diâmetro da bolha (esférica) (m)

D – Coeficiente de difusão

d – Distância entre os eletrodos, m

d_p – Diâmetro de partículas

F – Constante de Faraday ($9,65 \times 10^4 \text{ C/mol}$)

F_d – Força de cisalhamento

F_g – Força de atração gravitacional

g – Aceleração da gravidade, $9,80 \text{ m/s}^2$.

i – Intensidade de corrente (A)

I_0 – Intensidade da luz incidente a um dado comprimento de onda;

i_t – Corrente total nos eletrodos (A)

k – Condutividade do eletrólito, S/m .

L – Caminho óptico pela amostra (distância que a luz percorreu por ela),

M – Massa molar do elemento predominante do eletrodo, g/mol .

m_{el} – Quantidade máxima do eletrodo consumida (g)

M_0 – Massa inicial da colméia, em g.

n – Número de elétrons envolvidos na reação de oxidação do elemento do anodo.

P – Potência consumida

P – Potencia consumida em W

P_a – Probabilidade de adesão
 P_c – Probabilidade de colisão
 P_f – Probabilidade de flotação
 Q – Efeito Joule (kWhm^{-3})
 r_c – Raio crítico
 T – Temperatura (K)
 t – Tempo de eletrólise (s)
 t – Tempo de aplicação da corrente em s.
 t – Tempo de desgaste do eletrodo em horas,
 t_d – Tempo de deslocamento do filme
 t_i – Tempo de indução
 t_r – Tempo de ruptura
 U – Tensão aplicada em V
 V – Perda de volume do eletrodo desgastado em L,
 V – Volume de efluente tratado, m^3 .
 V_B – Velocidade de ascensão da bolha (m/s)

1 – INTRODUÇÃO

“Water is for life not to dye”.

“Água é para a vida não para tingir” esse foi o grande mote da última ITMA realizada em 2007.

Hoje o grande problema que a indústria têxtil enfrenta é a otimização no uso da água, afinal de contas a água é um recurso que está ficando cada vez mais raro e com isso cada vez mais caro.

Há um grande problema ambiental envolvendo a água, primeiro que ela é um recurso limitado, e o crescimento demográfico faz aumentar a demanda de água. A quantidade de chuvas no mundo inteiro permanece um tanto quanto estável, mas o crescimento demográfico é explosivo. Dados do Fundo das Nações Unidas para a Infância (UNICEF) e da Organização Mundial da Saúde (OMS) afirmam que o consumo de água dobrou pelo menos duas vezes neste século, e alguns estimam que possa dobrar de novo nos próximos 20 anos. As projeções da Organização das Nações Unidas indicam que, se a tendência continuar, em 2050 mais de 45% da população mundial estará vivendo em países que não poderão garantir a cota diária mínima de 50 litros de água por pessoa.

Naturalmente, uma população cada vez maior exige não só mais água potável, mas também mais alimentos. Produzir alimentos, por sua vez, exige muita água. E a agricultura precisa competir com as demandas de água da indústria e das pessoas. Com a expansão das cidades e das áreas industriais, a agricultura muitas vezes sai perdendo. De onde virão os alimentos? Como poderemos abastecer 10 bilhões de pessoas se mal conseguimos abastecer 6 bilhões, sendo que já estamos desviando água da agricultura? Essas são algumas questões que merecem nossa reflexão e principalmente uma atenção especial da parte das autoridades.

Nos países em desenvolvimento observa-se um maior crescimento populacional e, em muitos deles, a água já é escassa. Infelizmente, esses países têm menos dinheiro e tecnologia para lidar com os problemas decorrentes da utilização da água.

Outro ponto que merece atenção é o fato de a água não estar exatamente onde se quer e principalmente aonde se precisa dela, ou seja, sua distribuição é desigual. Segundo o

Programa Hidrológico Internacional da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO), a Ásia tem 36% da água que enche os lagos e rios do mundo, mas esse continente abriga 60% da população mundial. Em contraste, o rio Amazonas contém 15% das águas fluviais do mundo, mas apenas 0,4% da população mundial vivem suficientemente perto para utilizá-las. Também desigual é a distribuição de chuvas. Há regiões da Terra permanentemente secas; outras, embora não sejam sempre secas, sofrem estiagens periódicas.

Tudo isso gera, não só, uma preocupação ecológica e ambiental, mas, faz com que as leis ambientais se tornem cada vez mais rígidas, tornando assim esse recurso, tão precioso à vida, cada dia mais caro.

Devido à maior fiscalização na utilização racional dos recursos naturais por parte dos órgãos ambientais, as indústrias têxteis têm buscado modernizar seus equipamentos e produtos, bem como processos ecologicamente corretos, visando uma menor utilização desses recursos.

Por isso, a maioria das empresas já está investindo em suas pesquisas a fim de obter máquinas para tingir que usem uma relação de banho cada vez mais baixa.

A relação de banho é a quantidade de banho de tingimento usada por massa de substrato têxtil a ser tingido. Segundo CEGARRA *et al.* (1992) o efeito da relação de banho sobre a uniformidade obtida em um tingimento é significativo.

Por exemplo, as máquinas antigas, utilizavam uma relação de banho de 20:1, ou seja, em cada banho utiliza-se 20 litros de água para cada quilo de tecido a ser tingido, lembrando que para o tecido ficar pronto são necessários diversos banhos, o do tingimento, os das diversas lavagens, o do amaciamento e os dos demais acabamentos.

Hoje temos no mercado empresas procurando desenvolver novas tecnologias para tingimento sem água, como por exemplo, feito à base de espuma, porém, esta ainda está em fase experimental. O que temos de concreto são máquinas que prometem tingir com uma Relação de Banho (RB) de 4:1 e algumas até mesmo de 3:1, com isso, gasta-se menos água para tingir a mesma quantidade de tecido, cabe ressaltar que utilizando menos água isso implica em utilizar uma menor quantidade de corantes, produtos auxiliares e de energia, contribuindo assim para uma redução de custo e preservação do meio ambiente.

Isso se deve porque, em média, tem-se um gasto de 100 litros de água para cada quilo de tecido tinto, podendo variar, dependendo do tipo de equipamento, processo ou fibra utilizada.

Para o setor têxtil, a água tem a função de transportar os produtos químicos que serão utilizados e que entram no processo produtivo ao longo da cadeia, assim como para a retirada do excesso daqueles produtos considerados indesejáveis para o substrato têxtil.

De acordo com CORRÊA JR. E FURLAN (2003) o desafio será reduzir o consumo de água, sem afetar a otimização do processo, ou seja, necessita-se da busca por uma redução de consumo sem afetar os rendimentos do negócio.

Segundo a Associação Brasileira da Indústria Têxtil – ABIT no que se refere ao consumo da indústria total, o setor têxtil consome aproximadamente 15% da água.

De acordo com MORAN *et al.* (1997), a indústria têxtil possui uma das mais altas cargas poluidoras em seu efluente, devido às variações em seus processos e produtos utilizados, que tornam seus efluentes um composto complexo.

O potencial contaminante da indústria têxtil, em sua totalidade, é considerado médio, entretanto a tinturaria e o acabamento são considerados as etapas, do processo produtivo têxtil, mais contaminantes se comparadas com a fiação e a tecelagem (TOLEDO, 2004).

Ao analisar as duas citações acima chegamos às seguintes conclusões: desde 1997, quando MORAN *et al.* cita que a carga de poluente têxtil em seus efluentes é alta, o avanço da tecnologia permitiu que fossem desenvolvidos novos equipamentos, utilizando Relação de Banho (R.B.) menor, como também, os corantes que tiveram sua substantividade aumentada e os produtos auxiliares foram melhorados. Isso tudo fez com que o processo de tingimento, como um todo, melhorasse o que explicaria a observação de TOLEDO (2004).

Dentro deste contexto, o setor industrial preocupa-se em investir em novas tecnologias, para reduzir custos e a poluição do meio ambiente. Atualmente, grandes investimentos são realizados na pesquisa e aplicação de tecnologias limpas, as quais, através de um único investimento, visam à economia energética, de água e a redução da poluição.

A economia de água nos processos produtivos merece especial atenção devido ao seu alto custo, bem como a algumas previsões de escassez já para o início deste século. Pode-se citar como exemplo, a previsão feita pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), que estimou que já em 2010 a demanda de água deverá ser superior à disponibilidade hídrica do Estado. (*Folha de São Paulo*, dezembro 2005).

Quanto ao tratamento de efluentes, os desafios são cada vez maiores. Estudos para reutilizar e ou remediar uso de efluentes vêm sendo realizados e já aplicados, aliados a isso a busca por novas tecnologias e a combinação das já existentes visam diminuir o desperdício de água e a emissão de poluentes no meio ambiente.

Estes tem se tornado uma importante resposta à legislação, cada vez mais rígida, que obriga as indústrias a aumentarem a eficiência de seus sistemas de tratamento de efluentes a fim de se adequarem aos padrões exigidos, além da inserção da importante variável ecológica na mentalidade do setor produtivo.

Neste trabalho apresentaremos no tópico REVISÃO BIBLIOGRÁFICA, um panorama geral da indústria têxtil e todo seu processo produtivo a fim de se compreender a complexidade do efluente que será tratado, passaremos pelo fundo histórico e a análise do mercado, sempre demonstrando a importância deste insumo tão vital, que é a água.

Além disso, será explicado o funcionamento da técnica da eletroflotação, enfocando desde os princípios de remoção de substâncias em estado coloidal, as principais reações envolvidas, o funcionamento e os principais tipos de reatores de eletroflotação, até as variáveis mais importantes para este processo.

Serão abordadas também as principais vantagens e desvantagens dessa técnica e compararemos a sua eficiência na remoção das concentrações de poluentes em relação às técnicas de coagulação/decantação e lodos ativados utilizadas para tratamento dos efluentes.

No tópico MATERIAIS E MÉTODOS são apresentadas as metodologias de coleta e preservação de amostras, bem como os principais padrões e reagentes utilizados nas determinações analíticas. São devidamente especificadas as características do reator, os tipos de materiais utilizados, as condições dos ensaios e o procedimento de coleta das amostras, tratadas por eletroflotação.

Na verificação das concentrações dos vários parâmetros, são mostrados os instrumentos utilizados, as condições experimentais de cada ensaio e a metodologia utilizada para análise dos dados coletados.

E, por fim, o trabalho será concluído realizando-se uma interpretação dos resultados práticos obtidos pela técnica de eletroflotação.

No tópico RESULTADOS E DISCUSSÕES são apresentados os resultados da caracterização dos efluentes com e sem tratamento por eletroflotação, utilizando eletrodos de ferro e alumínio, além de avaliar a aplicabilidade da técnica da eletroflotação para o tratamento do efluente têxtil.

Serão considerados os melhores valores das variáveis para operação do reator, de maneira a se obter a melhor eficiência dentro das condições experimentais. Foram feitas comparações, através da redução nas concentrações dos vários parâmetros analisados, para cada tipo de eletrodo e a eficiência desse método em relação ao tratamento convencional utilizado para coagulação da matéria orgânica e inorgânica e, por fim, são apresentadas sugestões para realização de futuros trabalhos.

Adicionalmente o ANEXO I apresenta uma matéria publicada pela Revista Química Têxtil, n. 99 de junho de 2010, contendo parte deste trabalho.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para melhor compreensão das pertinências que envolvem a temática deste trabalho este capítulo de Revisão Bibliográfica foi dividido em três partes que são de suma importância para a boa compreensão deste trabalho:

1. A indústria têxtil,
2. A água, como um dos seus insumos mais importantes
3. A Eletroflotação.

2.1 – A INDÚSTRIA TÊXTIL

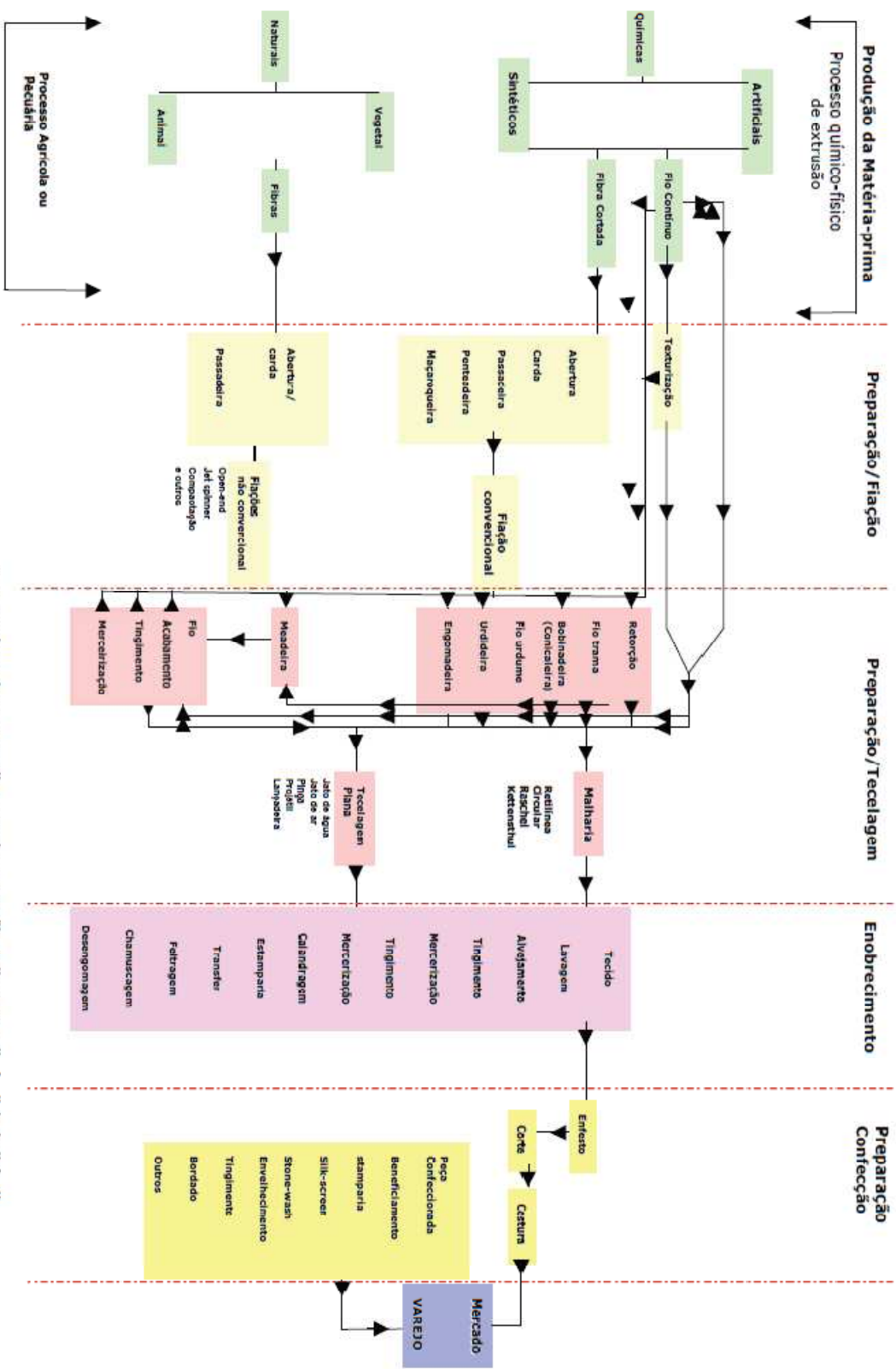
2.1.1 – VISÃO GERAL

No Brasil a cadeia têxtil passou por significativas reestruturações durante toda a década de 90. Muitas empresas pequenas, de ordem familiar e/ou obsoletas, foram tragadas pelo mercado. Em compensação, as empresas que resistiram provaram seu amadurecimento para a competitividade. (LA ROVERE *et al.*, 2001)

A cadeia têxtil é bastante extensa e sua abrangência vai desde a obtenção e fabricação de fios até o produto final confeccionado e acabado.

A Figura 1 a seguir, denominada “Fluxo de Produção da Cadeia Têxtil” nos dá esta noção de quão ampla é esta cadeia.

Fluxo de Produção da Cadeia Têxtil



Fonte: Adaptado por Napoli Jr com base Textília, Editora Brasil Têxtil / Sinditêxtil.

O tratamento, proposto neste trabalho, será realizado na fase denominada enobrecimento, entretanto, para se entender a complexidade do efluente, é necessário conhecer todos os processos anteriores. Sendo assim, a seguir, vai ser setorizada a cadeia têxtil, para compreendê-la melhor.

A cadeia têxtil possui várias ramificações, conforme podemos verificar no “Fluxo de Produção da Cadeia Têxtil” (Figura 1), e para analisar a ramificação correta o primeiro passo é determinar o tipo de fio que será utilizado para então situar em qual ramificação será feita a pesquisa.

O fio é feito a partir das fibras, que normalmente são classificadas como naturais e sintéticas, neste trabalho focamos uma fibra natural, *o Algodão*.

Portanto o fluxograma da indústria têxtil seguido e explicado será o fluxograma do algodão, como há diversos tipos de corantes utilizados para tingir este tipo de fibra, este trabalho se utilizou dos corantes reativos que são aqueles corantes usados, em larga escala, para tingi-la

2.1.2 – FUNDO HISTÓRICO

Na história da humanidade, a mitologia e as lendas desempenham sempre um papel importantíssimo na cultura dos povos.

Assim, torna-se difícil diferenciar entre o que é verdadeiramente histórico e aquilo que é efetivamente lendário (ARAÚJO, 1984).

No Egito, a deusa Isis é tida como inventora das artes têxteis, já os gregos e os romanos atribuem a mesma invenção à Atena e Minerva, respectivamente. Já os Incas creditam tal feito a Mamacolla.

Porém, o registro histórico mais confiável que temos está nas páginas da bíblia.

A bíblia fala a respeito de Adão e Eva se preocupando com a vestimenta logo após pecarem, assim, a preocupação com vestimenta vem desde o começo da história da humanidade, neste caso as roupas eram feitas de pele animal.

As fibras naturais começaram a ser fiadas e utilizadas bem depois disto, na fiação de fibras o processo era todo feito à mão e os primeiros utensílios de que temos registro, conhecidos como a Roca e o Fuso, datam de cerca de 4000 anos.

Entre 800 A.E.C. e 750 E.C. deu-se a mecanização do fuso, muito provavelmente na Índia. Essa roda ficou conhecida como “Charkha”.

Segue abaixo uma tabela (Tabela 1) com os principais inventos e inventores que contribuíram para o desenvolvimento da tecnologia da fiação

TABELA 1: PRINCIPAIS INVENÇÕES DA FIAÇÃO E SEUS INVENTORES.

ANO	INVENTO	INVENTOR
4000 AC	APARECIMENTO DA ROCA DE FUSO	
500 AC – 750 DC	ROCA DE FIAR INDIANA PARA FIBRAS CURTAS	
1500	APERFEIÇOAMENTO DA ROCA DE FIAR	LEONARDO DA VINCI
1530	ROCA DE FIAR PARA FIBRAS LONGAS	JOHAN JURGEN
1738	MÁQUINA DE FIAR DE CILINDROS	LEWIS PAUL
1748	MÁQUINAS DE CARDAR	LEWIS PAUL E DANIEL BOURNE
1764	“JENNY”	JAMES HARGREAVES
1769	“WATER FRAME”	RICHARD ARKWRIGHT
1775	“MULE”	SAMUEL

		CROMPTON
1775	CARDAÇÃO MECÂNICA	RICHARD ARKWRIGHT
1780	LAMINADOR PARA ESTIRAR FITAS	RICHARD ARKWRIGHT
1793	DESCAROÇADORA DE ALGODÃO	ELI WHITNEY
1807	FIAÇÃO “OPEN-END”	WILLIAMS
1820	TORCE	COOKER
1825	AUTOMATIZAÇÃO DO MULE	RICHARD ROBERTS
1830	FIAÇÃO COM ANEL E VIAJANTE	ADDISON, STEPHENS E JENKS
1833	PENTEADEIRA CIRCULAR	HOLDEN
1834	TORCE COM DIFERENCIAL	SALADIN
1845	PENTEADEIRA RETILÍNEA INTERMITENTE	HEILMANN
1912	DISPOSITIVO DE MOVIMENTAÇÃO DIFERENCIAL PARA MULE AUTOMÁTICA	TAINE
1913	SISTEMA DE GRANDE ESTIRAGEM	CASABLANCAS
1947	AUTOLEVELLER	RAPER

Fonte: ARAÚJO (1984).

Depois de feito o fio, inicia-se o processo conhecido como tecelagem, que, grosso modo, é o processo pelo qual se produzem os tecidos.

Pouco se sabe a respeito da origem da tecelagem, sendo impreciso e até mesmo um campo aberto a polêmicas. (ARAÚJO, 1984).

Por exemplo, existem evidências de processos de tecelagem na Mesopotâmia e Egito. Na Mesopotâmia 3000 A.E.C. aparece o tear vertical simples.

Outra forma de tecido são as malhas.

Não se sabe ao certo a origem do processo de malharia.

Sabe-se, porém, que o desenvolvimento da tecnologia de tricotagem teve início no fim do século XVI, podendo-se dizer que o objetivo de tal desenvolvimento era: o aumento da produtividade através da mecanização e simplificação dos processos.

Inicialmente, as máquinas que realizavam o processo de tricotagem eram denominadas teares circulares.

Depois do tecido feito, é necessário o tratamento final, muitas vezes, chamado de acabamento, enobrecimento ou beneficiamento do tecido, e é nesse segmento específico da cadeia têxtil que iremos nos ater um pouco mais, pois é onde será explorado em maiores detalhes o processo de eletroflotação.

A arte de repassar determinadas tonalidades e matizes a fios, tecidos e outros materiais por meio de corantes era conhecida e praticada antes dos dias de Abraão, e provavelmente é tão antiga como a arte de tecelagem.

Os processos de tingidura variavam de lugar em lugar. Às vezes tingia-se o fio, ao passo que em outros casos o corante era aplicado ao tecido. O fio era banhado duas vezes no corante, sendo espremido depois da segunda remoção do tanque, para que se pudesse conservar o valioso corante. O fio era então estendido para secar.

Cada tecido tinha de ser tratado de modo diferente. Às vezes, embora raramente, o corante tinha uma afinidade natural com a fibra a ser tingida, mas, quando isso não acontecia, era necessário tratar o tecido primeiro com um mordente, uma substância que possui atração tanto pela fibra como pelo corante. Para servir como mordente, a substância

precisa pelo menos ter atração pelo corante, para combinar com ele, a fim de formar um composto colorido insolúvel.

As descobertas revelam que os egípcios, que eram famosos pelos seus tecidos tingidos de cores especialmente brilhantes, usavam mordentes nos processos de tingidura. Por exemplo, o vermelho, o amarelo e o azul eram três das cores que eles usavam, e diz-se que esses corantes não podiam ter sido fixados sem o uso de óxidos de arsênico, ferro e estanho como mordentes.

Após o declínio do Egito, Tiro e outras cidades fenícias tornaram-se importantes centros de tingidura.

Sobre o tingimento, PERSPICAZ (1991) aborda o tingimento de tecido entre os Fenícios, a Fenícia era especialmente famosa por sua indústria de tintura de púrpura. Mantos de púrpura régia ou tíria obtinham os mais altos preços, pois, mesmo para poucos metros de tecido, eram necessários muitos milhares de moluscos múrices, os quais, cada um, produzia apenas uma só gota de corante.

O corante variava em matiz, dependendo de onde, ao longo das margens do Mediterrâneo, o molusco era apanhado, e este fato, junto com as habilidades especiais dos mestres-tintureiros fenícios, que freqüentemente usavam um processo de tingimento duplo ou triplo, resultava em muitas variedades de tecidos caros, procurados por pessoas de elevada posição e da nobreza.

DESPERTAI (2007) afirma que até a segunda metade do século 19, as substâncias usadas para tingir tecidos eram exclusivamente extraídas da natureza — como de plantas, insetos e mariscos. Por exemplo, a planta pastel-dos-tintureiros produzia um corante azul, o lírio-dos-tintureiros, um corante amarelo e a ruiva-dos-tintureiros, um corante vermelho. Um corante preto era feito da árvore pau-campeche, e um líquen chamado urzela produzia um corante violeta. O molusco múrex produzia um corante púrpuro muito caro, conhecido como púrpura tíria, ou púrpura-imperial. Esse corante tingia as vestimentas usadas pelos imperadores romanos.

Muito antes dos imperadores romanos, os ricos e as pessoas de destaque usavam roupas tingidas com substâncias naturais. Por exemplo, corantes vermelhos eram produzidos da fêmea do pulgão. Pelo visto, essa era a fonte dos corantes carmíneos usados

na mobília do tabernáculo do Israel antigo, bem como na vestimenta do sumo sacerdote dessa nação. DESPERTAI (2007).

Relacionado com materiais tingidos, é interessante a inscrição num prédio do rei assírio Tiglate-Pileser III. Depois de contar as suas campanhas militares contra a Palestina e contra a Síria, ele declara que recebeu tributo de certo Hirão, de Tiro, e de outros governantes. Os objetos alistados incluem “vestes de linho com enfeites multicoloridos, . . . lã tingida de azul, lã tingida de roxo, . . . também cordeiros, cujas peles esticadas eram tingidas de roxo, (e) aves silvestres, cujas asas estendidas eram tingidas de azul”. — *Ancient Near Eastern Texts* (Textos Antigos do Oriente Próximo), editado por J. Pritchard, 1974, pp. 282, 283.

Feito um fundo histórico da indústria têxtil é importante conhecer aspectos econômicos, a seguir alguns dados sobre o mercado têxtil no Brasil.

2.1.3 – MERCADO TÊXTIL

Segundo dados da Associação Brasileira da Indústria Têxtil – ABIT, o Brasil se encontra entre os 10 principais mercados mundiais no setor da indústria têxtil, é o segundo fornecedor de índigo, o terceiro de malha, está entre os cinco principais países produtores de confecção e o sexto na produção de fios, filamentos e tecidos (ABIT, 2009).

O faturamento estimado da cadeia têxtil e de confecção é de US\$ 47,5 bilhões, colaborando com cerca de 5,0 % do PIB brasileiro.

O setor possui cerca de 30 mil empresas, e emprega 1,65 milhões de trabalhadores formais e informais, dos quais 75% são representados pela mão de obra feminina, além de ser a segunda área que mais gera o primeiro emprego (ABIT, 2007).

O chefe do departamento de bens de consumo e serviços do BNDES, Carlos Eduardo Castello Branco, em entrevista à revista ABITTexbrasil (2009), reconhece o valor do setor: “A indústria têxtil e de confecção é de grande importância para o País, pois atende todo o mercado interno, e suas exportações também são significativas. É um grande gerador de empregos.”

O economista e consultor do IEDI (Instituto de Estudos para o Desenvolvimento Industrial), Julio Sérgio Gomes de Almeida, também concorda: *“Apenas os setores de alimentos e bebidas empregam mais que a área têxtil e de confecção. Além disso, é uma cadeia muito longa, que passa por diversas camadas de profissionais importantes, sendo capaz de gerar efeitos dinâmicos para trás (matéria prima) e para frente (englobando comércio, reparação, design, moda, etc.)”*.

Abaixo temos a Figura 2 mostrando o mercado têxtil mundial em milhões de toneladas:

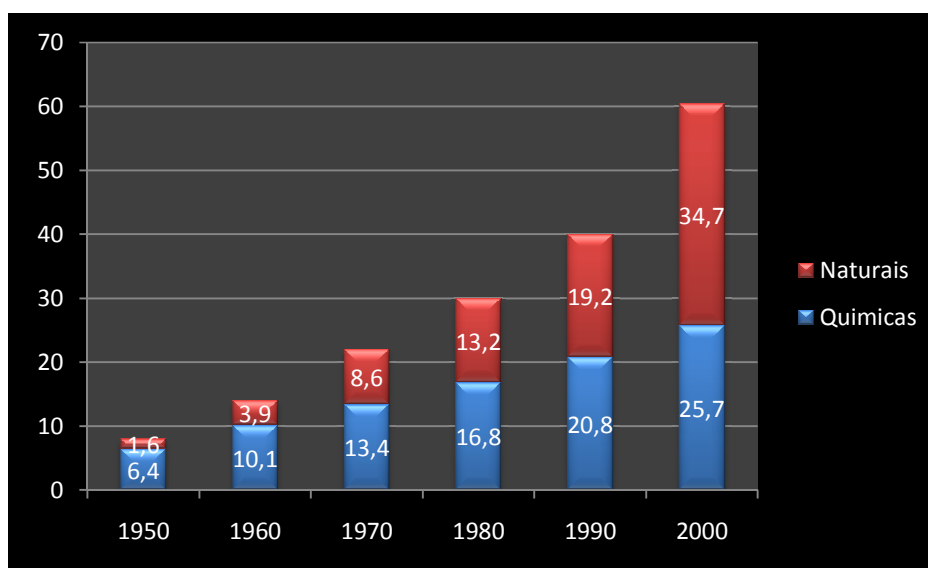


Figura 2: Consumo Mundial de Fibras Têxteis

Fonte: Fiber Organon

A indústria têxtil ocupa o 3º lugar na geração de empregos diretos no nosso país, e é o 6º em faturamento. Segundo o informe da ABIT do ano de 2008, o setor têxtil brasileiro investe uma média de US\$ 1 bilhão por ano para manter seus parques sempre atualizados, com tecnologia de ponta, respeitando as leis ambientais e investindo em profissionais capacitados. O setor paulista apresentou um crescimento em torno de 5% no faturamento em 2007, saltando de US\$ 12,5 bilhões em 2006 para US\$ 13,1 bilhões.

De janeiro a outubro/2007, o Estado de São Paulo, que detém 25% das exportações nacionais de têxteis e confeccionados, acumulou US\$ 466 milhões de

faturamento externo (5% mais que no mesmo período em 2006). Na Tabela 2, a seguir, são apresentados os dados registrados no ano de 2007.

TABELA 2: FICHA TÉCNICA DO SETOR TÊXTIL PAULISTA

FATURAMENTO	US\$ 12,9 Bilhões
BALANÇA COMERCIAL	US\$ 227 milhões de déficit contra US\$ 88 milhões de déficit em 2006
EXPORTAÇÕES DE SÃO PAULO	US\$ 561 milhões contra US\$ 535 milhões no mesmo período 2006
IMPORTAÇÕES DE SÃO PAULO	US\$ 788 milhões contra US\$ 623 milhões no mesmo período 2006
EMPREGOS	465 mil empregos diretos
PRODUÇÃO	Têxtil cresceu 5,28% e vestuário em 3,46%
VAREJO	Crescimento de 12,46%

Fontes: ABIT, IEMI, IBGE, MDIC, adaptado pela ABIT/Sinditêxtil (2009)

Através dos números apresentados, observa-se que a indústria têxtil tem uma importância econômica indiscutível, porém, agrega-se a isso o seu potencial poluente que é bastante significativo, principalmente em razão do elevado consumo de água no processo de tingimento, e o baixo aproveitamento dos insumos como no caso dos corantes. Em geral, estima-se que aproximadamente 90% das espécies químicas utilizadas no beneficiamento das fibras são eliminados nos efluentes após cumprirem sua função (ZANONI, 2001).

Tais fatores levam à geração de grandes volumes de efluentes, que se caracterizam por apresentar uma elevada carga orgânica e forte coloração (BERTAZZOLI *et al*, 2001).

O tipo de fibra e a forma do material têxtil afeta igualmente o tipo de máquinas, produtos e processos a serem utilizados, interferindo assim, diretamente, no tipo de efluentes que serão gerados. Com isso, faz-se necessário conhecer todo o processo.

2.1.4 – CADEIA TÊXTIL

Esta abordagem mais ampla a respeito da cadeia industrial têxtil se faz necessária devido à complexidade do nosso efluente. Visto que este trabalho terá uma abordagem focada na fase final do acabamento do substrato têxtil, é importante ressaltar que tal efluente possui resquícios de outros produtos como as ceras, óleos de encimagem e outros itens advindos de processos anteriores da cadeia têxtil, por isso propõem-se aqui um maior conhecimento da Indústria Têxtil.

A indústria têxtil é muito ampla e possui diversas etapas desde a matéria prima até o acabamento final. A seguir na Figura 3 temos uma esquematização simplificada da cadeia têxtil.

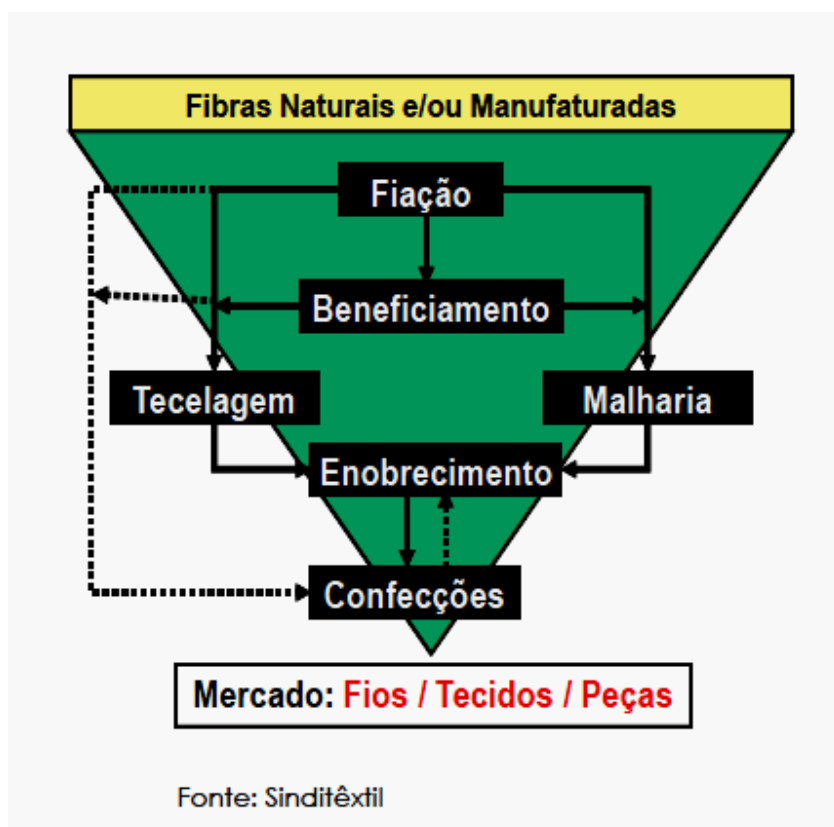


Figura 3: Esquema simplificado da Cadeia Têxtil

O tipo de fibra é determinante no processo de beneficiamento, por isso, o primeiro elo da cadeia têxtil, aquele que vai dar a diretriz de todos os demais elos, é o das fibras.

2.1.4.1 – FIBRAS

As fibras têxteis podem ter várias origens, e é esse o critério usualmente mais utilizado para sua classificação.

A seguir, apresenta-se a tabela 3, contendo as principais fibras utilizadas no processo têxtil, juntamente com sua origem, e símbolo. Temos em destaque a fibra que será analisada neste trabalho: *O Algodão*.

TABELA 3: CLASSIFICAÇÃO DAS FIBRAS

ORIGEM/ NATUREZA		PROCEDÊNCIA	NOME	SÍMBOLO
NATURAIS	Vegetais (celulósicas)	Caule	Linho	CL
			Rami	CR
		Folha	Juta	CJ
			Cânhamo	CH
			Sisal	CS
			Caroa	CN
		Fruto	Coco	CK
		Semente	Algodão	CO
		Carneiro	Lã	WO
		Cabra angorá	Mohair	WM
		Cabra cachemere	Cachemere	WK

ARTIFICIAIS	Animais (Protéicas)	Coelho angorá	Angora	WA	
		Coelho	Pelo de coelho	WE	
		Bombix mori (bicho da seda)	Seda	S	
	Minerais	Rochas	Amianto	A	
	Regeneradas/ Artificiais	Celulose	Rayon viscose	CV	
			Modal e (Tencel)	CM e (CLY)	
			Cupro	CC	
	Vegetal	Polpa de madeira	Acetato	CA	
			Triacetato	CT	
	SINTÉTICAS	Sintéticas	Matérias primas	Poliéster	PES
				Poliamidas	PA
		Petróleo	Sintetizadas	Poliacrílicas	PAN
				Elastanos	EL
				Polipropileno	PP

FONTE: DADOS TÉCNICOS PARA A INDÚSTRIA TÊXTIL (2003)

A fibra de algodão possui importantes características de qualidade, que proporcionam a quem utiliza benefícios, tais como: bem-estar, toque agradável, conforto térmico, boa resistência, durabilidade, boa absorção de umidade, e com isso o algodão torna-se a fibra mais consumida em todo mundo.

Segundo MORRISON & BOYD (1996) o Algodão é constituído quase que exclusivamente de celulose, o algodão tem 92,3% a 94,6% de celulose.

A celulose é o composto químico mais importante na constituição das plantas e conseqüentemente, das fibras delas derivadas.

A celulose é um carboidrato não redutor, que é insolúvel em água, constituído por uma cadeia linear, obtida através de condensação de mais de 3000 unidades de β -Glicose ($C_6H_{10}O_5$), o que lhe confere um caráter de alto peso molecular, aproximadamente 10000 g/mol, com baixa resistência a ácidos fortes, entretanto, resiste bem aos ácidos fracos e também aos álcalis em geral.

Pode-se afirmar que esta estrutura celulósica é um polímero, onde o motivo base ou monomérico é repetido grande número de vezes. O número de repetições é chamado de Grau de Polimerização (GP).

Explicando sucintamente a sua estrutura química, a celulose do algodão é um polímero com a seguinte composição:

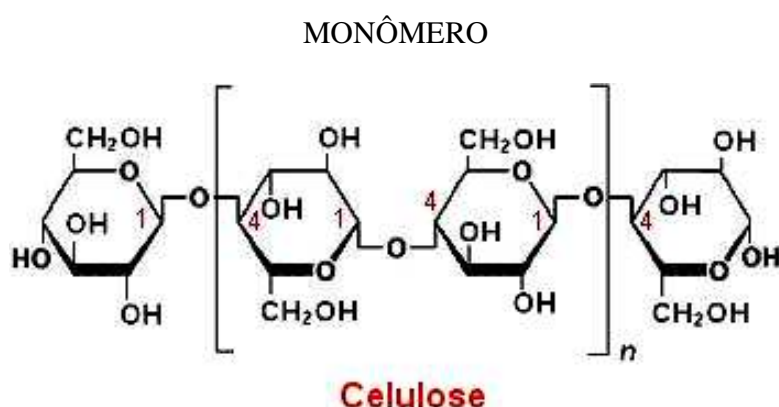


Figura 4: Estrutura química da celulose (SALEM, 2000)

Esta fórmula demonstra que a celulose contém, em cada unidade glicosídica, três grupos hidroxilas livres, um primário e dois secundários, responsáveis pela grande quantidade de pontes de hidrogênios, ligações estas que mantêm a coesão de toda estrutura molecular da fibra.

A celulose, quando seca, possui um caráter neutro, entretanto, em meio aquoso, seus grupos hidroxilas se dissociam, deixando-a com um caráter aniônico.

SALEM (2000) relata que esta ionização aumenta proporcionalmente ao aumento da alcalinidade do banho.

A concentração de íons g/dm^3 de [celulose-O]⁻ aumenta em 10 vezes para cada aumento de uma unidade de pH entre 7 e 11, o que faz com que o banho de tingimento e, conseqüentemente, o caudal do efluente tenha um alto teor alcalino.

Estudos realizados por meio de Microscopia Eletrônica (M. E.) e de Raios-X, mostram que as cadeias celulósicas não se dispõem de forma totalmente ordenadas no interior das fibras.

Há sim, um alternar aleatório de regiões cristalinas e amorfas na estrutura, possibilitando explicar o grande número de características ligadas ao comportamento das fibras, que acabam por produzir diferentes comportamentos físicos.

Entre eles, a resistência, que está ligada às regiões cristalinas. Já a absorção de água e, conseqüentemente, a absorção de produtos químicos e corantes, estão ligadas às regiões amorfas.

Alguns destes produtos químicos e suas ações estão descritos na tabela 4 abaixo.

TABELA 4: AGENTES E SUAS AÇÕES NA CELULOSE

AGENTES	AÇÃO
ÁCIDOS	Não resiste a ação de ácidos minerais concentrados. Hidrolisa com ácidos diluídos
ÁLCALIS	Resiste à ação de álcalis. Intumescce com lixívia de soda (merceriza)
ALVEJANTES E SOLVENTES	Resiste a solventes orgânicos e alvejantes. Degrada em ação de hipoclorito de sódio
LUZ	Perda de resistência e amarelecimento

Fonte: CETEX

Naturalmente, existem outras características ligadas à região amorfa, como: elasticidade, flexibilidade, torcionabilidade e alongamento.

O algodão, depois de colhido, quer por processo mecânico ou processo manual, tem que ser processado na fiação, a seguir, então, vai se discorrer brevemente sobre este processo, a fiação.

2.1.4.2 – FIAÇÃO

Por definição, fiação é a técnica ou conjunto de operações necessárias para transformar mecanicamente materiais fibrosos naturais ou químicos em fios. São pré-definidos alguns parâmetros para que se chegue a uma finura, de forma que se consiga obter a consistência necessária que suporte a força de torção que será aplicada. (ARAÚJO, 1984), as características físicas das fibras são fatores determinantes do tipo de tecnologia a ser utilizada.

Como neste trabalho o efluente a ser tratado está relacionado com o tingimento de algodão, então será abordada, especificamente, a fiação da fibra de algodão. Na fiação, o algodão é processado nos abridores, batedores, cardas, passadores, penteadeiras, maçaroqueiras, filatórios, retorcedeiras e conicaleiras (ABRAHÃO E SILVA, 2002).

O material fibroso, chega na forma de fardos que são abertos, e passarão por um processo de limpeza, paralelização e seguidas estiragens. O processo de fiação completo pode compreender três aspectos que podem ou não coexistir simultaneamente, como será explanado logo na sequência, são eles:

1. Limpeza, abertura e homogeneização da matéria prima
2. Regularização e redução de massa por unidade de comprimento
3. Coesão de massa fibrosa linear.

LIMPEZA OU DEPURAÇÃO:

Depois de colhido o algodão é enfardado e chega à fiação. O sistema de abertura tem como função promover a abertura e também a flocagem das fibras que se encontram prensadas no fardo.

O intuito é retirar impurezas existentes como: cascas, folhas, sementes, terra, pedras, partes metálicas ou quaisquer outros tipos existentes, com o objetivo de fornecer um material mais homogêneo.

REGULARIZAÇÃO E REDUÇÃO DE MASSA:

As operações de preparação à fiação podem agrupar-se em 02 subgrupos.

No primeiro estão englobados todos os tratamentos sobre a matéria mais ou menos individualizada, com a finalidade principal de continuar a limpeza e conseguir que o produto final tenha uma boa regularidade, sem procurar, no entanto, uma redução da massa fibrosa por unidade de comprimento. É nesse conjunto de operações que habitualmente se aproveita para fazer a mistura de vários componentes fibrosos a fim de conseguir uma mistura íntima, homogênea e regular.

No segundo subgrupo, procura-se prioritariamente obter uma redução de massa fibrosa por unidade de comprimento, numa forma progressiva ao longo das várias máquinas constituintes do processo.

COESÃO DE MASSA FIBROSA LINEAR.

Esta é a operação, durante a qual, a matéria prima já preparada será reduzido à finura final (ou massa por unidade de comprimento) previamente fixada, obtendo ainda a consistência necessária a sua utilização posterior através da aplicação de torção

Nas Figuras 5 e 6 são apresentados os fluxogramas de uma fiação que está processando o algodão cardado (Figura 5) e algodão penteado (Figura 6).

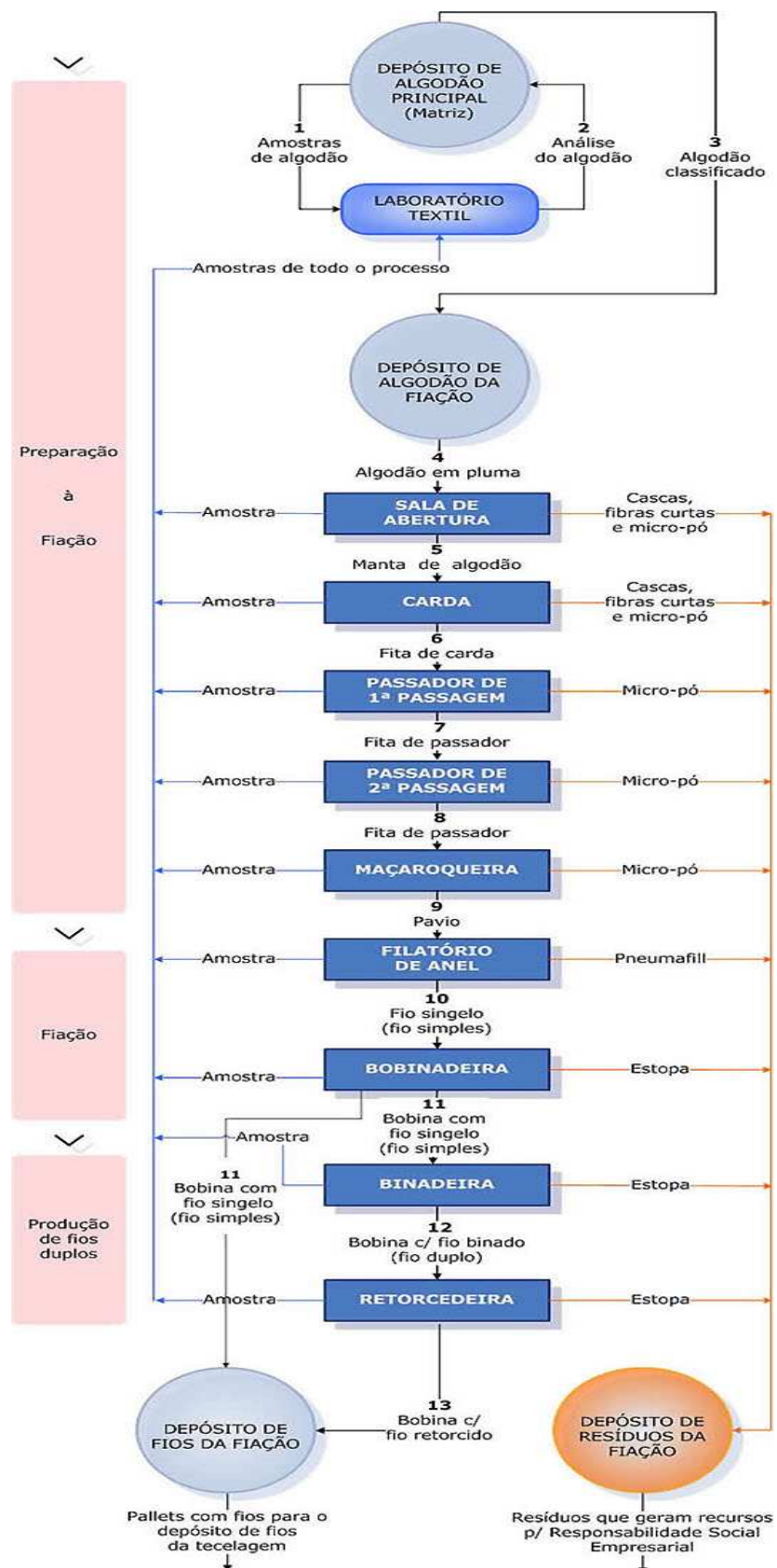


Figura 5: Fluxograma de uma fiação para algodão cardado, Cataguases (2009)

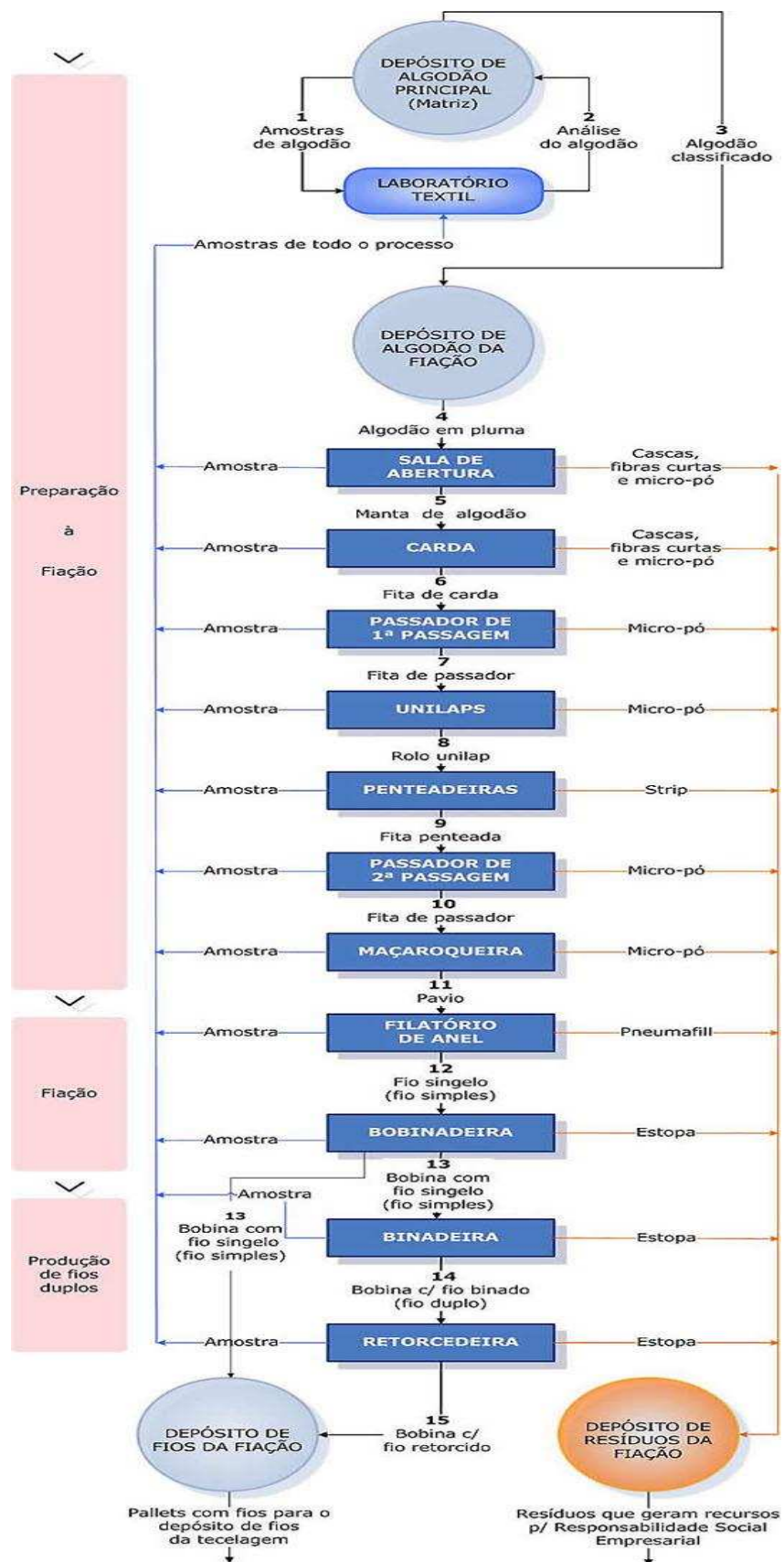


Figura 6: Fluxograma de uma fiação para algodão penteado, Cataguases (2009)

Após a obtenção do fio, ele segue para a tecelagem, ou malharia conforme o destino desejado.

2.1.4.3 – TECELAGEM

Designa-se, geralmente, por tecelagem o processo pelo qual se produzem tecidos. (ARAÚJO, 1984)

Os tecidos são artigos formados pelo entrelaçamento de fios, segundo um desenho denominado: padronagem.

Tecidos fabricados em tear são formados pelo entrelaçamento perpendicular alternativo dos fios de urdume (fios no sentido do comprimento do tecido) com os fios da trama (fios no sentido da largura do tecido), esse tipo de tecido é denominado de *tecido plano*.

Os tecidos planos são amplamente utilizados na indústria do vestuário, na fabricação de calças sociais, *jeans*, jaquetas, casacos, ternos, artigos de decoração, cama e mesa, entre outros.

2.1.4.4 – MALHARIA

Neste processo os tecidos são formados a partir do entrelaçamento de fios consecutivos, no sentido único da trama ou do urdume, gerando a malha.

Esses tecidos possuem de um modo geral elasticidade e flexibilidade superiores aos tecidos planos.

A produção de um tecido de malha pode ser efetuada de duas maneiras, na *malharia de urdume* e na *malharia de trama*.

Malharia de urdume: quando a malha é tricotada no sentido vertical, pelo entrelaçamento de diversos fios simultaneamente.

Malharia de Trama: Malha produzida no sentido horizontal, a partir de um ou mais fios de trama, esta é amplamente usada na fabricação de camisetas, artigos esportivos em geral e artigos que necessitam apresentar boa elasticidade.

Visto que o efluente que iremos tratar é do beneficiamento e enobrecimento da malha de trama é neste artigo que vai se concentrar este trabalho.

Devido ao grande aumento da produtividade de certos teares, tornou-se necessário desenvolver uma série de dispositivos, com o objetivo de melhorar a qualidade e diminuir o desgaste do tear.

Como os teares tiveram sua velocidade aumentada rapidamente e, em muitos casos, essa velocidade ultrapassou os limites da resistência dos fios a serem tecidos, fez-se necessário fazer certas adaptações mecânicas, sendo assim diversos componentes passaram a ter maior importância no equipamento, como por exemplo, o sistema de lubrificação automático.

Este sistema tem por objetivo proteger o coração dos teares, isto é, o cilindro, o disco, seus sistemas de pedras, de agulhas e de platinas. Neste processo é necessário que pulverize todos estes elementos com óleo solúvel. Conseqüentemente este óleo será arrastado pelos fios e será depositado no substrato. Em alguns casos, esse óleo representa 4% do peso total do substrato.

Para ter uma igualização e um tingimento perfeito, esse óleo proveniente do sistema de lubrificação tem que ser eliminado durante o processo de tingimento. O óleo é um dos elementos que é encontrado na composição do efluente têxtil, que será tratado na Estação de Tratamento de Efluentes (ETE).

Feito a malha esta passa para o processo de tingimento, que é abordado a seguir, e é nesta fase que será gerado o efluente final e conseqüentemente aplicada a técnica da eletroflotação. Por isso, a seguir será feito uma análise dos principais processos da tinturaria.

2.1.4.5 – TINTURARIA

Por definição o tingimento é uma modificação físico-química do substrato de forma que a luz refletida provoque uma percepção de cor. ARAÚJO (1984).

Quando o tecido sai da tecelagem ou da malharia ele não tem um aspecto atrativo nem um toque agradável para uso em vestuário, para que ele obtenha características como: conforto, durabilidade e outras propriedades mais específicas, é necessário beneficiá-lo, ou enobrecê-lo, e assim aumentar seu valor agregado.

O processo de tingimento é também conhecido como acabamento, pois é a fase final da obtenção de um produto têxtil.

Nas fases do acabamento têxtil são utilizados, além dos substratos têxteis, diversos insumos como a água, resinas, corantes e tensoativos dentre outros produtos químicos. (ABRAÃO E SILVA, 2002).

Os processos de beneficiamentos são inúmeros e numa tinturaria existem simultaneamente vários processos em andamento, o que faz com que o efluente seja muito complexo, a seguir uma relação de alguns processos que são feitos na tinturaria, lembrando que esta lista não esgota todos os processos existentes:

- Desengomagem
- Purga
- Alvejamento
- Mercerização
- Alvejamento óptico
- Termofixação
- Tingimento
- Aplicação de amaciantes,
- Aplicação de repelentes a óleo, sujeira, água, impermeabilizantes, anti-estático, anti-chama, anti-rugas, etc.

Será feito uma análise dos principais processos e produtos utilizados de forma que fique claro o comportamento deste efluente, começando pelos pré-tratamentos.

PRÉ-TRATAMENTOS

É preciso que se considere o pré-tratamento um estágio tão importante quanto o tingimento, por ser a base para a obtenção de um tecido de boa qualidade, sendo que as primeiras etapas são constituídas pela desengomagem e a lavagem (ANDRADE *et al*, 1987).

Entretanto, não será abordado neste trabalho o processo da desengomagem porque este é realizado em tecidos planos (feito em tecelagem), enquanto que o estudo realizado utiliza o efluente de uma tinturaria de malhas, que não se utiliza deste processo.

Um pré-tratamento deficiente gera um tingimento deficiente, que dificilmente pode ser corrigido, mesmo a custo elevado. Embora essa observação seja válida para todos os tecidos, ela é especialmente válida para os tecidos de algodão, pois a fibra de algodão contém um apreciável teor de impurezas, que é ainda maior nos tecidos crus, como mostra a Tabela 5 abaixo:

TABELA 5: TEOR DE IMPUREZAS DO ALGODÃO

Impurezas	Teores (%)
Impurezas naturais: hemicelulose, pectinas, proteínas, ceras	8-12
Aplicadas ao fio: Amido, acrilatos, PVC, CMC, aminas, graxas, ceras de parafina	10-15

Fonte: DADOS TÉCNICOS PARA A INDÚSTRIA TÊXTIL (2003)

No tingimento de malha, como primeiro processo químico (pré-tratamento), temos a realização da *purga*. Nesta fase objetiva-se eliminar do substrato as impurezas naturais do algodão, materiais não celulósicos, tais como: ceras, metais, graxas, óleos das máquinas, pó, manchas e etc. Favorecendo assim uma uniformidade no tingimento.

Produtos químicos relativamente fortes e agressivos ao meio ambiente são utilizados nos métodos tradicionais de purga.

Neste processo, também, utiliza-se produtos com o objetivo de aumentar a hidrofiliidade (absorção de água) do algodão, para que esse possa ser umectado e com isso absorver corantes e outros produtos necessários ao processo.

Observa-se abaixo na Tabela 6 o processo da purga

Tabela 6: Processo de purga

<i>Definição</i>	<i>Processo de retirada de impurezas</i>
Mecanismos	Emulsificação Saponificação
Emulsificação	Com o auxílio de produtos tensoativos consegue-se formar dispersões relativamente estáveis de óleo em água (emulsão) e, desse modo, extrair as impurezas oleosas do substrato
Saponificação	Mediante a reação dos óleos com lixívia de soda caustica obtém-se produtos solúveis e com propriedades detergentes (sabões)
Purga	Nos processos de purga propriamente dito costuma-se utilizar ambos os mecanismos preparando-se um banho contendo detergentes e hidróxidos alcalinos
Purga de Algodão	NaOH + Detergente → 100 – 110 °C.

Fonte: DADOS TÉCNICOS PARA A INDÚSTRIA TÊXTIL (2003)

Terminada a etapa da purga, pode-se realizar o processo de *alveamento*.

O alveamento consiste na continuação da purga visando a obtenção dos seguintes resultados:

- a) Remoção completa das cascas das sementes;
- b) Extração de impurezas coloridas de tipo indeterminado, causada pelas condições de crescimento;
- c) Hidrólise, oxidação e remoção de goma residual;
- d) Obtenção do grau de alvura necessário, com o mínimo possível de degradação das fibras;
- e) Melhoria da absorbância do tecido e sua uniformidade.

Devido às suas vantagens técnicas, prefere-se geralmente o Peróxido de Hidrogênio (H_2O_2) como agente de alveamento, pois ele pode ser utilizado em processos a frio e a quente, e seu efeito de alvura é sólido à luz.

Existem dois tipos de alveamento, um *químico*, conhecido como alveamento propriamente dito, o outro tipo de alveamento é o *óptico*. No alveamento químico o objetivo é eliminar substâncias coloridas das fibras de algodão, já que o algodão é uma fibra que apresenta como característica uma aparência amarelada, em seu estado natural, que para GUARATINI E ZANONI (2000), se deve ao fato, principalmente, do algodão ser composto por materiais orgânicos e também por absorverem luz particularmente na faixa de baixo comprimento de onda.

Neste tipo de alveamento utiliza-se água oxigenada (peróxido) e/ou cloro, com a finalidade de se obter a remoção da cor natural das fibras. (ABRAÃO E SILVA, 2002).

Já no branqueamento óptico torna-se necessário adicionar produtos fluorescentes chamados de corantes branqueadores, também denominados de *branqueadores ópticos* ou mesmo *branqueadores fluorescentes*.

Esses corantes apresentam grupos carboxílicos, azometino ($-N=CH-$) ou etilênicos ($-CH=CH-$) aliados a sistemas benzênicos, naftalênicos, pirênicos e anéis aromáticos que proporcionam reflexão por fluorescência na região de 430 a 440 nm quando excitados por luz ultravioleta (GUARATINI E ZANONI, 2000). Esses corantes têm como objetivo eliminar o fundo amarelado e ao mesmo tempo refletir cores violáceas ou azuláceas.

A seguir vemos na Tabela 7 o processo de destruição da cor existente no material têxtil.

TABELA 7: PROCESSO DE ALVEJAMENTO

<i>Definição</i>	<i>Processo de destruição da cor existente em materiais têxteis.</i>
Material de entrada	Tecidos previamente purgados
Mecanismos químicos	Alvejamento por redução Alvejamento por oxidação
Alvejamento por redução	Definição: é obtido mediante o uso de substâncias redutoras como: Hidrossulfito de sódio, bissulfito de sódio, formaldeído sulfoxilato de sódio
Alvejamento por oxidação	Definição: consiste na destruição da cor mediante oxidação Substâncias oxidantes: hipoclorito de sódio (água sanitária) peróxido de hidrogênio (água oxigenada) e clorito de sódio
Mecanismo de alvejamento mais indicado para a celulose	Alvejamento por oxidação com hipoclorito, clorito ou peróxido de hidrogênio.
Processos de alvejamento	Descontínuo Semi-contínuo (pad-roll) Contínuo em corda ou aberto
Variações do processo	Cozimento e alvejamento no mesmo banho (no caso de tecidos pouco sujos) Alvejamento e branqueamento óptico no mesmo banho Alvejamento e tingimento simultâneo (cores claras)

Fonte: DADOS TÉCNICOS PARA A INDÚSTRIA TÊXTIL (2003)

Além da purga e alveijamento, outro processo comum na tinturaria de algodão é o processo chamado *mercerização*, que é um tratamento no substrato à base de soda cáustica, normalmente, uma solução de hidróxido de sódio (NaOH), de 28 a 33 °Bé.

O objetivo é mudar a estrutura interna da fibra, a estrutura cristalina se modifica, tendo uma melhor orientação da região cristalina no sentido do seu eixo. O primeiro resultado é um aumento significativo da afinidade dos corantes chegando até a 25%. Outro objetivo da mercerização é dar uma melhor acessibilidade aos produtos químicos do acabamento.

O aumento do grau de orientação é responsável pelo aumento da resistência à tração e maior estabilidade dimensional.

Algumas propriedades obtidas pela mercerização são:

- Aumento substancial do brilho;
- Encolhimento de 20 a 30% que deve, ao menos em parte, ser evitado por tracionamento;
- Aumento da resistência à tração;
- Aumento da afinidade tintorial;
- Aumento da maciez;
- Aumento da hidrofiliade, e
- Melhoria da afinidade tintorial e da estabilidade dimensional.

Como esse processo utiliza muita soda cáustica, ela precisa ser reciclada diminuindo assim, tanto os custos de produção como a poluição da água residual. Mesmo assim, neste processo ainda são eliminadas grandes quantidades de NaOH para o efluente têxtil.

Cabe ressaltar que nem todo o tecido precisa ser mercerizado, então feito ou não a mercerização, passamos para a etapa seguinte que é o *tingimento*.

TINGIMENTO

O tingimento, propriamente dito, é o processo onde são aplicados os corantes ao substrato têxtil. Neste trabalho o método utilizado é do *esgotamento*, onde o corante é deslocado do banho para a fibra.

Neste processo (esgotamento) ocorre o contato freqüente entre o banho e a fibra mediante movimentação de um deles ou dos dois e, com isso, o corante se desloca do banho para a fibra devido à *substantividade*, que, segundo SALEM (2000), é a propriedade do corante de se deslocar do banho do tingimento para a fibra.

O tipo de corante que será utilizado e que é o grande objetivo deste estudo é o que é mais utilizado para o tingimento de algodão, que é o *corante reativo*, o qual será detalhado um pouco mais à frente.

E para finalizar o processo de tingimento é feito o amaciamento do tecido, proporcionando um melhor toque ao tecido.

Abaixo, na tabela 8, está uma relação dos principais produtos utilizados no tingimento e que podem fazer parte do nosso caudal junto com todos os produtos acima citados, além de outros possíveis resíduos do processo de fabricação da fibra e do tecido como sujeiras, cascas, sementes, óleo solúvel, branqueadores óticos, corantes, amaciantes e outros.

TABELA 8: PRINCIPAIS PRODUTOS QUÍMICOS USADOS EM TINGIMENTOS

<i>Descrição</i>	<i>Composição</i>	<i>Função</i>
Sais	Cloreto de sódio Sulfato de sódio	Retardantes
Ácidos	Acético Sulfúrico	Controle de pH
Bases	Hidróxido de sódio Carbonato de sódio	Controle de pH
Sequestrantes	EDTA	Sequestrante
Dispersantes e surfactantes	Aniônicos, Catiônicos e Não-iônico	Dispersante de corante
Agentes Oxidantes	Peróxido de hidrogênio Nitrito de sódio	Insolubilizantes de corantes
Agentes redutores	Hidrossulfito de sódio Sulfeto de sódio	Remoção de corantes não reagidos; solubilizantes
Carriers	Organoclorados	Aumento de adsorção

Fonte: STEINHART (2000), PERES & ABRAHÃO (1998)

Os produtos da tabela acima são chamados também de produtos auxiliares porque são utilizados para preparar o substrato para a etapa do tingimento propriamente dito, fase esta onde são aplicados corantes ao material têxtil.

Conforme descreve STEINHART (2000), na sua maioria, os produtos auxiliares utilizados no processo de tingimento na indústria têxtil são formulações à base de *tensoativos*, que são substâncias constituídas por uma parte hidrófila (polar) e uma hidrófoba (apolar) que têm a propriedade de reduzir a tensão superficial dos líquidos.

Conforme são combinados os diferentes tensoativos, obtém-se uma determinada ação e, conseqüentemente, uma diferente aplicação. Tais produtos auxiliares são importantes porque, certamente, fazem parte do efluente a ser tratado.

A ação dos tensoativos nas diferentes aplicações têxteis é definida por STEINHART (2000) da seguinte forma:

- **Amaciantes:** Conferem a sensação de maciez e volume, que é dada pela parte hidrófoba da base amaciante. Por esse motivo, a adsorção de água dos materiais têxteis fica comprometida quando da aplicação de amaciantes;
- **Antiespumantes:** Agem na estrutura da espuma, fazendo com que a mesma perca elasticidade e se rompa;
- **Detergentes:** São tensoativos que possuem a propriedade de umectar os substratos têxteis, permitindo que, pela quebra da tensão superficial da água, as impurezas sejam facilmente removidas, não permitindo que se reaglomerem e se depositem na superfície do substrato. Tem a propriedade de emulsionar as gorduras ou óleos presentes no substrato têxtil;
- **Dispersantes:** também denominados *colóide protetor*. Tem como principal característica impedir a reaglomeração dos sólidos;
- **Igualizantes:** São produtos específicos para determinadas fibras e corantes. Existem três tipos de ação dos igualizantes.
 - Ter afinidade com a fibra,
 - Ter afinidade com o corante
 - Ter sua ação exclusivamente na alteração da tensão superficial, não possuindo afinidade com o corante ou fibra;
- **Retardantes:** São igualizantes constituídos por tensoativos catiônicos.

O processo de aplicação do corante é determinante para o sucesso comercial dos produtos têxteis, pois, o consumidor exige algumas características básicas do produto, como por exemplo, que a camiseta tenha boa solidez à lavagem, à luz e a fricção; que o maiô tenha boa solidez à água do mar, à água clorada da piscina, à luz, que o tecido não desbote no decorrer do uso, etc.

De modo que, para garantir essas propriedades, as substâncias utilizadas para a coloração da fibra devem apresentar alta afinidade, uniformidade na coloração, resistência aos agentes desencadeadores do desbotamento e, ainda, serem economicamente viáveis.

No final do processo de tintura são necessárias várias lavagens em banhos correntes para retirada do excesso de corante e do corante hidrolisado não fixado nas etapas precedentes, o que faz com que se gaste uma quantidade elevada de água e que o efluente seja colorido, danificando, e muito, o meio ambiente. (ABRAHÃO E SILVA, 2002).

Neste tópico foi possível observar os principais processos que ocorrem, junto com os produtos químicos utilizados em uma tinturaria. Como esses processos, geralmente, estão sendo feitos simultaneamente nos diversos equipamentos tornando o efluente complexo.

Como já foi detalhado todos os principais produtos e resíduos dos substratos, a seguir será feito uma descrição detalhada sobre o corante, abordando o conceito histórico, características, propriedades, classificações e outros detalhes importantes a seu respeito.

O CORANTE

A definição técnica de um corante é: Um composto químico que pode ser fixado a um material qualquer, por exemplo, numa fibra têxtil, de forma mais ou menos permanente, e que produz na mente humana a sensação visual de uma dada cor. (DADOS TÉCNICOS PARA A INDÚSTRIA TÊXTIL (2003).

Os corantes, atualmente sintéticos, são compostos orgânicos complexos capazes de colorir substratos têxteis ou não têxteis, de forma que a cor seja relativamente resistente (sólida) à luz e a tratamentos úmidos.

No início, a maioria dos corantes era de origem vegetal. A produção dos corantes sintéticos só se iniciou em 1856, com a descoberta do corante púrpura “mauveine”, por Willian Henry Perkin.

Desde a obtenção do primeiro corante sintético, os fabricantes de corantes têm investigado a obtenção de corantes com tonalidades cada vez mais brilhantes e maior solidez à luz, à água, ao sabão, etc.

Também tentaram formular corantes mais solúveis em água e ajustar a composição dos banhos de tingimento de maneira que a solubilidade seja máxima.

Sem duvida todos esses esforços, para facilitar a aplicação e conservação de corantes sobre o substrato têxtil, trabalham na contramão da sua eliminação da água residual. Existe uma variedade muito ampla de corantes e, na Tabela 9, são mostrados alguns de seus tipos, mais comumente usados, e para que tipo de fibra eles se adéqüem.

TABELA 9: TIPOS DE CORANTES UTILIZADOS PARA CADA TIPO DE FIBRA:

Tipo de corante	Tipo de fibra					
	Protéica (lã, seda)	Celulósicas (Algodão, viscose)	Acetato e triacetato	Poliamida	Poliéster	Acrílica
Ácido	XX			XX		
Azóico		XX	X	X	X	X
Básico						XX
À tina	X	XX				
Indigóides	X	XX			X	
Diretos	X	XX		X		
Dispersos			XX	XX	XX	XX
Reativo	XX	XX		X		
Sulfuroso		XX				

XX casos normais X casos especiais

Fonte: DADOS TÉCNICOS PARA A INDÚSTRIA TÊXTIL (2003)

Segundo WALLACE (2001) a maioria dos corantes hoje em dia não apresenta nenhuma toxicidade, mas sua presença nos rios impede que parte da luz solar chegue ao fundo dos mesmos e com isso prejudicam alguns ciclos biológicos, principalmente o processo de fotossíntese, o que traz drásticas consequências ambientais, além de provocar um efeito visual nos rios, já que pequenas quantidades (ordem de mg/L) são capazes de produzir uma importante coloração, pois o olho humano detecta concentração de corante reativo da ordem de 5 p.p.b. em um rio limpo.

Já STYLIDI, KONARIDES & VERYKROS (2003), analisaram o problema criado por algumas aminas aromáticas, que resultam da degradação natural dos corantes, que podem ter caráter carcinogênico, com isso o desenvolvimento de alternativas mais eficientes para o tratamento dos resíduos contendo corantes deste tipo se tornam uma prioridade.

A Tabela 10 abaixo apresenta uma breve descrição de alguns tipos de corante, seus produtos com potenciais poluentes, e o processo utilizado para o tingimento, sua substantividade, e o tipo de fibras a que são destinados.

TABELA 10: CORANTES E SUAS DESCRIÇÕES

Corante	Descrição	Poluentes	Processo	Fixação	Fibra
Ácido	Compostos aniônicos aplicado em meio ácido aquoso	Ácidos orgânicos, corantes por fixar, cor	Esgotamento/ Contínuo	80-93%	Poliamida, Lã
Básico	Compostos catiônicos solúveis em água	Corantes por fixar, cor, agentes igualizadores	Esgotamento	97-98%	Acrílica Poliéster
Direto	Compostos catiônicos solúveis em água	Solventes, corantes por fixar, cor, sais, agentes fixantes	Esgotamento/ Contínuo	70-95%	Celulósica Protéica Poliamida

		catiônicos, surfactantes, agentes igualizadores, produtos de acabamento			
Dispersos	Compostos insolúveis em água, usados em dispersão aquosa	Ácidos orgânicos, carriers, corantes por fixar, cor, fosfatos, lubrificantes, dispersantes, agentes igualizadores, produtos de acabamento	Alta temperatura, Esgotamento/Contínuo	80-92%	Acrílica Poliéster Acetato Triacetato Poliamida
Reativo	Compostos aniônicos, solúveis em água	Solventes, cor, sais, soluções alcalina, corantes por fixar, surfactantes, produtos de acabamento	Esgotamento Pad batch (Frio/contínuo)	60-90%	Celulósica Protéica Poliamida
Sulfuroso	Compostos orgânicos, contendo enxofre ou sulfureto de enxofre	Cor, solução alcalina agentes redutores e oxidantes, cor por fixar	Esgotamento/C contínuo	60-70%	Celulósica
Cuba	Compostos insolúveis em água	Cor, solução alcalina agentes redutores e oxidantes, cor por fixar	Esgotamento/C contínuo	80-95%	Protéica Celulósica

Fonte: ABRAHÃO E SILVA (2002)

Esta variedade de corantes está coligada à diversidade de fibras existentes, uma vez que, cada tipo de fibra a ser colorida requer corantes com características próprias e, principalmente, devido à grande procura por novas cores e de corantes com maior capacidade de fixação e especificidades às fibras.

Segundo GUARATINI E ZANONI (2000), devido à grande exigência do mercado, milhões de compostos químicos coloridos têm sido sintetizados nos últimos 100 anos, dos quais cerca de 10.000 são produzidos em escala industrial. No entanto, estima-se, que atualmente, há cerca de 2.000 tipos de corantes disponíveis para a indústria têxtil.

Há características ou propriedades das cores que servem para diferenciá-las e classificá-las objetivamente, apesar de se iniciar sua diferenciação subjetivamente.

Os corantes se caracterizam como substâncias empregadas intensamente para a obtenção da cor em vários substratos. Podem ser retidos por adsorção física, formação de soluções, sais ou complexos com metais, retenção mecânicas ou ligações covalentes (ROSALEN *et al*, 2004). Eles podem ser solúveis ou dispersos no meio de aplicação (água). No tingimento, os corantes são adsorvidos e se difundem para o interior da fibra.

Durante o tingimento, as moléculas do corante devem de alguma forma, se difundir da fase externa, geralmente aquosa, para dentro da fibra. Como as regiões cristalinas são de difícil penetração, mesmo para a água, é importante no tingimento da fibra a relação “regiões cristalinas/regiões amorfas”.

Quanto mais perfeito for o alinhamento das cadeias do polímero ao longo do eixo da fibra, tanto mais ela é orientada, e mais difícil de ser penetrada pelo corante, principalmente se sua molécula for grande, o que é muito comum.

As moléculas de corante são compostas de dois grupos importantes, chamados *cromóforos* e *auxicromos*.

A presença dos grupos cromóforos possui a habilidade de criar certa cor. Assim, substâncias que possuem cromóforos em diferentes arranjos, produzirão a sensação de diferentes tonalidades de cor.

As propriedades que caracterizam uma cor são principalmente as seguintes: Matiz, luminosidade, tonalidade, saturação ou profundidade e brilho.

Segundo VANDEVIVERE *et al.* (1998), estas estruturas são responsáveis pela absorção da radiação visível e exposição da cor. O grupo cromóforo mais utilizado é o da família dos “azo” corantes (representado por uma ligação dupla entre dois nitrogênios $-N=N-$), que corresponde a aproximadamente 60 a 70% de todos os corantes têxteis produzidos.

A CETESB (2005) adverte que alguns corantes azóicos podem produzir aminas aromáticas quando clivados, gerando como subproduto substâncias capazes de causar câncer no organismo humano.

A outra parte da molécula do corante constituída pelo grupo auxicromos, é responsável pela fixação do corante à fibra têxtil e intensificação de sua cor. (SALES, 2003). Estes auxicromos também podem fornecer liga química, que fixa o corante à fibra. Assim sendo, os corantes em si, ou a combinação de corantes com outros aditivos, contribuem com os cromóforos e auxicromos.

Como foi utilizado neste estudo o substrato de Algodão, analisaremos o corante que é o mais usado para tingi-lo, que é o *corante reativo*.

CORANTES REATIVOS

Designam-se ***corantes reativos*** aqueles que, quando aplicados aos materiais têxteis, devem sua solidez à úmido pelas combinações químicas covalentes com a fibra. Ao reagir, esses corantes tornam-se quimicamente parte da fibra. DADOS TÉCNICOS PARA A INDÚSTRIA TÊXTIL (2003).

Os corantes reativos constituem uma classe de corantes que vêm sendo utilizadas em escala crescente pelas indústrias têxteis, devido à sua reatividade com as fibras, e estabilidade da cor, possuindo também tonalidades brilhantes, ampla gama de cores, procedimento de aplicação flexível e propriedades completas de cores sólidas dos tingimentos resultantes.

Estes corantes contem um grupo eletrofílico (reativo), que favorece a formação de ligações covalentes com o grupo hidroxila das fibras celulósicas, com grupos amina, hidroxila e tióis das fibras protéicas e também com os grupos amino das poliamidas. Este

grupo apresenta como característica uma alta solubilidade em água e o estabelecimento de ligações covalentes entre o corante e a fibra (GUARATINI E ZANONI, 2000).

Existem várias classes de corantes reativos, a classe estudada neste trabalho é a classe de bifuncionais caracterizados por um grupo monoclorotriazina e outro vinilsulfônico, onde o grupo reativo é o vinilsulfona ($-\text{SO}_2\text{CH}=\text{CH}_2$), e reage preferencialmente com o grupo hidroxila do carbono 6 da celulose, formando uma ligação covalente, por reações de adição ou substituições nucleofílicas.

Um exemplo de reação de adição nucleofílica entre o corante e a celulose é representado pelas equações abaixo:



A combinação química covalente significa a repartição de elétrons entre átomos para formar mais uma liga química do que uma associação eletrovalente, que é simplesmente uma atração de íons de carga oposta, como se dá com sais de metal. Como a liga química desses corantes à fibra não é influenciada pelos tratamentos a úmido, domésticos ou industriais, suas tonalidades não se alteram após sucessivas lavagens.

Esses corantes são versáteis também nos seus processos de aplicação, permitindo que ele seja aplicado desde à temperatura ambiente até através de vaporização.

Outro fator importante é que o corante fica hidrolisado no banho, sendo assim, ele também é um importante elemento no caudal do efluente tratado neste projeto.

Os corantes devem ser solúveis molecularmente, dispersíveis ou capazes de se tornar solúveis no meio em que são aplicados. Esse meio de aplicação é quase sempre a água.

Na maioria dos corantes a adsorção oscila desde níveis médios até níveis altos. Em contrapartida a classe dos corantes reativos apresenta uma adsorção muito baixa nas biomassas convencionais.

A seguir temos a tabela 11 com as principais características do corante reativo

TABELA 11 – CARACTERÍSTICAS DO CORANTE REATIVO

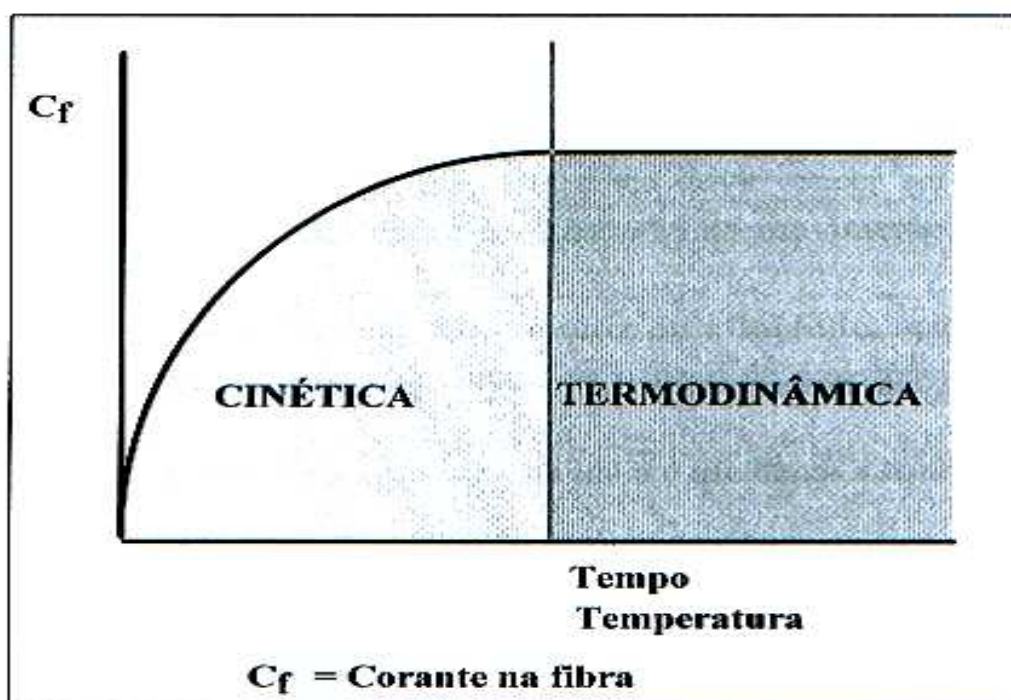
Caráter iônico	Aniônico
Definição	São corantes que preferem reagir quimicamente com a fibra
Classificação e reatividade	Monoclorotriazinílicos – baixa reatividade Diclorotriazinílicos – alta reatividade Tricloropiramidínicos – baixa reatividade Fluorclorpiramidínicos – alta reatividade Vinilsulfônicos – baixa reatividade 2,3 dicloroquinoxilina – baixa reatividade
Aplicáveis às seguintes fibras:	Principais: Celulósicas Secundárias: Protéicas e Poliamidas
Solubilidade	Facilmente solúveis em água
Processos de aplicação	Tingimento por esgotamento, Semicontínuo ou contínuo
Auxiliares de tingimento	Eletrólitos: Sulfato ou cloreto de sódio Álcalis: Carbonato, bicarbonato, silicato, trifosfato ou hidróxido de sódio
Solidez	À luz: Boa À lavagem: Boa a ótima Aos ácidos: Ruim a média Às bases: Média a boa
Descarga	Parcial: em banho ácido Total: banho redutor seguido de banho com hipoclorito de sódio.

Fonte: DADOS TÉCNICOS PARA A INDÚSTRIA TÊXTIL (2003)

Neste projeto, como foi utilizado o esgotamento, vale salientar que este processo só é efetivado com adição de sal, que auxilia no esgotamento do corante, sob condições de pH neutro ou relativamente baixo. Estas condições fazem com que o corante não reaja, ou reaja lentamente com a fibra, tendo lugar ao que chamamos de igualização. Depois aumentamos o pH do banho pela adição de álcalis, estes permitem que a reação se dê lentamente e só depois o pH é elevado ao seu valor final, de modo que a fixação de equilíbrio tenha lugar, esse álcali também fará parte do caudal final.

Segundo TEIXEIRA (2009) Nesta situação ocorre duas fases: uma *cinética* e uma *termodinâmica*. A Figura 7 demonstra através de um gráfico as duas fases que ocorrem no tingimento.

Figura 7: Fases do tingimento



Fonte: SALEM, 2000

Os fatores termodinâmicos e cinéticos no processo de tingimento são muito importantes, através deles pode-se conhecer melhor o mecanismo de reação corante/fibra (ABRAÃO E SILVA, 2002), conhecimento este que não seria alcançado baseando-se somente em experiências práticas. Estas duas fases serão descritas a seguir:

FASE CINÉTICA:

Segundo SALEM (2000), geralmente se confunde a velocidade em que o processo ocorre (cinética) e a grandeza da força que provoca o processo. A existência de uma força motriz em um sistema mecânico não é suficiente para garantir um movimento, visto que, esta força deve vencer certa resistência antes que o movimento seja possível. Quanto maior a resistência ao movimento, menor a velocidade para uma determinada força.

No tingimento admite-se uma força motriz ou afinidade, na fase cinética se determina a velocidade de deslocamento do corante para a superfície da fibra, também conhecida como a *velocidade de difusão*. Determinamos também a velocidade de deslocamento do corante para o interior da fibra, conhecida como *velocidade de adsorção*.

Na tinturaria existe o interesse de atingir ou aproximar-se do estado de equilíbrio, porém, é de extrema importância controlar a velocidade do tingimento, esta é a fase cinética, onde ocorrem as seguintes etapas:

- Desagregação das moléculas do corante
- Transferência do corante do banho para a fibra
- Adsorção do corante na superfície da fibra
- Difusão do corante pra o interior da fibra.
- Fixação do corante na fibra

Fatores que podem influenciar na cinética: a concentração de corante e eletrólitos, pH, temperatura e relação de banho. (ABRAÃO E SILVA, 2002).

No que diz respeito à temperatura, é freqüente aumentar gradualmente o seu valor no início do tingimento, para que a velocidade inicial não seja excessiva. Segundo CEGARRA (1981), os coeficientes de difusão aumentam quando a temperatura aumenta. A causa fundamental do incremento da energia cinética dos corantes é que estes se movem com maior rapidez, necessitando de menos tempo para difundir para o interior da fibra.

A difusão ocorre conforme a “Equação de Fick”, a seguir:

$$\frac{\partial s}{\partial t} = -D.A \frac{\partial c}{\partial x} \quad (3)$$

Onde:

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \text{Velocidade de difusão}$$

$$\frac{\partial c}{\partial x} = \text{Gradiente de concentração}$$

$$D = \text{Coeficiente de difusão}$$

$$A = \text{Área}$$

Nesta fase cinética, ocorre a maior parte dos problemas de tingimento. O fator determinante para se conseguir um tingimento igualizado e bem difundido reside no controle da velocidade de adsorção do corante pela fibra, pois se houver uma baixa difusão, causada por uma escolha inadequada de corante, ou por condições inadequadas de operação ao longo do processo, haverá um acúmulo de corante em certas regiões do substrato têxtil o que o deixa com baixo índice de uniformidade.

O estudo da cinética do tingimento é, portanto, tão importante quanto à fase de equilíbrio (fase termodinâmica), que será analisado a seguir.

FASE TERMODINÂMICA:

Através da fase termodinâmica é permitido conhecer a análise dos fatores que favorecem a fixação do corante na fibra, comumente conhecidos como fatores de “afinidade”.

A tendência de um sistema passar espontaneamente de um estado de alta energia a outro de menor energia é estudado pela termodinâmica, a qual relaciona as mudanças de energia no início e no final do processo, quando ocorre o equilíbrio, não considerando as fases intermediárias.

As moléculas de qualquer composto, na forma de gás, líquido ou solução, se encontram em um grau de liberdade de movimentação, tendendo a distribuir-se sobre o volume máximo acessível a elas. Ao proporcionar-lhes um maior volume, tratará de distribuir-se no volume total. Para reduzirmos o espaço ocupado se faz necessária uma força externa.

Em processos de tingimento, inicialmente, parece existir uma contradição ao princípio de liberdade de movimento, ou seja, uma solução relativamente diluída de corante se transfere, em pouco tempo, para um espaço bem mais reduzido na fibra. Uma força intervém para forçar as moléculas dos corantes a permanecer na fibra; esta força se conhece como “afinidade” (ABRAÃO E SILVA, 2002).

A permanência do corante é afetada por vários fatores; e, dentre eles, a vibração da estrutura molecular da fibra, faz com que esta assuma, a cada momento, novas configurações. Isto é melhor compreendido, sabendo-se do seguinte mecanismo:

Durante o tingimento, existe um constante choque entre as moléculas da água e do corante, dificultando sua fixação na fibra e propiciando a hidrólise. Esse corante hidrolisado, que não vai reagir com a fibra, portanto, um excedente, é o que causa o problema da coloração do efluente.

Com o aumento da temperatura do sistema aumenta também a vibração das moléculas da fibra e o bombardeio das moléculas da água.

Estes fatores físicos e químicos influenciam no esgotamento e justificam porque o rendimento não é total, nem a solidez aos tratamentos à úmido é absoluta. Após a fase cinética, o tingimento entra em equilíbrio com o corante remanescente no banho, o que constitui a fase termodinâmica. ABRAÃO E SILVA (2002)

Entretanto, permanece o problema da eliminação dos corantes reativos, e ele é acentuado também por sua baixa fixação na fibra.

Deve-se enfatizar que a grande maioria dos corantes sintéticos usados na indústria têxtil hoje é derivado de azo compostos (DOS SANTOS *et al*, 2005), o qual constitui o maior grupo de corantes orgânicos produzidos mundialmente (GUARATINI E ZANONI, 2000).

Deste modo, métodos para remoção da cor das águas de rejeito têm recebido enorme atenção nos últimos anos. De um modo geral, a efetividade da remoção da cor pode ser avaliada por um padrão espectrofotometricamente permitido, o qual pode ser usado para controlar a diluição do corante nas águas dos rios.

Assim, através da comparação direta entre absorbância da amostra de um efluente e o padrão de qualidade requerido para coloração em rios, é possível avaliar o grau de contaminação previsto (COOPER, 1993).

ABRAHAM (1993) fez um levantamento e afirmou que (in TALARPOSHTI *et al.* 2001), 700.000 toneladas de corantes têxteis são produzidos anualmente, onde, 50% são compostos azo (-N=N-) e que, devido o seu comportamento ambiental ser ainda desconhecido, são considerados especialmente perigosos (BUSTARD *et al.*, 1998). LAING (1991) coloca que de 2 a 10% dos corantes aplicados em processos de tingimento são descarregados no efluente, dependendo da tonalidade e do corante utilizado (in ROZZI *et al.*, 1998), e segundo ARSLAN, BALCOLI, BAHNEMANN (2000) esse numero pode chegar até 50%, tanto em sua forma reagida como hidrolisada. Esse corante é retirado através de sucessivas lavagens e despejado no efluente da tinturaria.

Tudo isso faz com que se use muita água no processo têxtil. Para a indústria têxtil a água é de primordial importância, além de ser o condutor dos produtos químicos, utilizada para gerar vapor. Com isso, muitos dos problemas que ocorrem no beneficiamento podem ter sido provocados, dentre outros motivos, por deficiências na qualidade da água.

Devido à sua própria natureza, os corantes são altamente detectáveis a olho nu, sendo visíveis em alguns casos mesmo em baixas concentrações, sendo que uma pequena quantidade lançada em efluentes aquáticos pode causar uma acentuada mudança de coloração dos rios, mas pode também ser facilmente detectada pelo público e autoridades que controlam os assuntos ambientais.

E com isso vem provocando reações justas e necessárias em segmentos da população, bem como em entidades governamentais e não governamentais, as ONGs, preocupadas com a preservação do ecossistema. Em virtude de tais preocupações, será agora desenvolvido o segundo tópico desta revisão: a água.

2.2 – ÁGUA

2.2.1 – INTRODUÇÃO

A água, essencial para o surgimento e manutenção da vida em nosso Planeta, na vida moderna, é indispensável para o desenvolvimento das diversas atividades criadas pelo ser humano, repercutindo por esta razão, em aspectos econômicos, sociais e culturais (MORAN, MORGAN & WIERSMA, 1986) e (BEECKMAN, 1998). Praticamente, é impossível imaginar como seria o nosso dia a dia sem esse importante elemento da natureza.

Além de dar suporte à vida, a água pode ser utilizada para: transporte de pessoas e mercadorias, recreação e paisagismo, produção e processamento de alimentos, processos industriais diversos, geração de energia, meio de transporte e assimilação de efluentes, sendo este, talvez encarado como uma das aplicações menos nobres que se poderia dar a este recurso tão essencial.

A interação entre atividades industriais e o meio ambiente tem sido tema amplamente discutido sendo de maior relevância política e social na atualidade, o que ao mesmo tempo faz esse assunto ser tema deste estudo.

É importante lembrar que por toda a história do homem, sempre houve uma procura violenta de água, inclusive travaram-se guerras para controlá-la. Há relatos diversos descrevendo que homens mataram uns aos outros pela posse de um lamacento oásis do deserto. Povoados, cidades e impérios surgiram onde havia água em abundância. Alguns foram abandonados quando suas reservas se esgotaram. A história também revela que os homens fizeram ídolos que representavam a água, e os adoraram como deuses. Oravam a eles, com grandes rituais e sacrifícios, quando a água se tornava escassa, e davam-lhes o crédito quando encontravam água.

Atualmente analistas, de política internacional, ouvidos pelo jornal francês *Le Monde Diplomatique*, prevêm que a próxima grande guerra mundial será travada por conta de disputas pelo líquido.

Por tudo isso, podemos com firmeza declarar:

Água: O ouro do Século XXI.

E essa afirmação é válida, principalmente, quando se analisa os números. Muito embora o nosso Planeta tenha três quartos de sua superfície coberta pela água, deve-se levar em consideração que apenas uma pequena parcela, referente à água doce, pode ser utilizada para o desenvolvimento da maior parte das atividades humanas, sem a necessidade de se fazer grandes investimentos para a adequação das suas características tanto físicas como químicas e/ou biológicas, aos padrões de qualidade exigidos para cada tipo de aplicação.

A figura 8 apresenta a distribuição das reservas de água em nosso Planeta

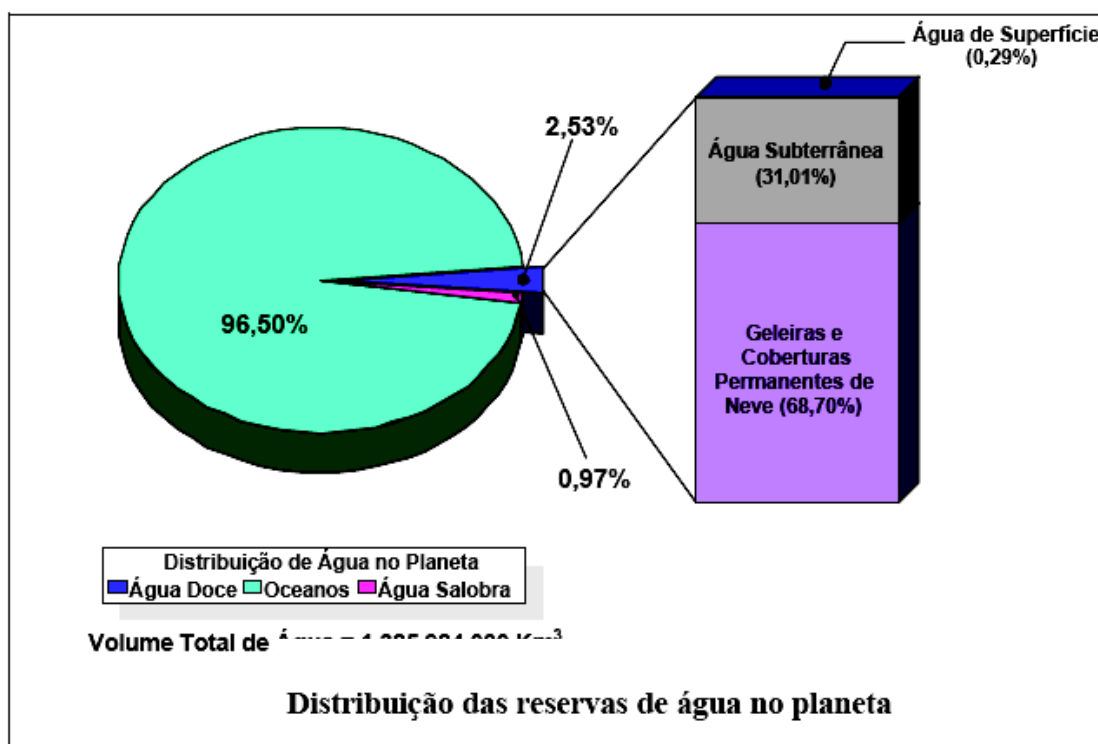


Figura 8: Distribuição das reservas de água do planeta

Fonte: MAYS, 1996.

O volume total de água no planeta é constante e as reservas somam aproximadamente 1.386 milhões de km^3 . O volume de água doce representa cerca de 35 milhões de km^3 , ou 2,53% da quantidade total de água no planeta. Deste volume total, os rios representam 0,00009%, os lagos 0,009% e a água contida na atmosfera 0,0009%.

(Fonte: Plano Nacional de Recursos Hídricos – Secretaria de Recursos Hídricos do Ministério do Meio Ambiente - 2006)

Se considerarmos a projeção do aumento da população mundial para um valor próximo de 8,3 bilhões de pessoas até o ano 2025 e mantivermos os atuais padrões de consumo de água, conforme apresentado no levantamento efetuado pelo Banco Mundial, a demanda total de água doce será próxima de 614,2 km³/ano para abastecimento doméstico e 3.884,4 km³/ano para usos diversos, resultando em um consumo total de 4.498,6 Km³/ano.

Com isso, temos três grandes problemas envolvendo a água, a serem equacionados:

- *Distribuição*
- *Crescimento Demográfico*
- *Qualidade degradada*

2.2.2 – DISTRIBUIÇÃO

Dados do Fundo das Nações Unidas para a Infância (UNICEF) e da Organização Mundial da Saúde (OMS) revelam que a falta aguda de água já atinge 1,2 bilhões de pessoas em todo o mundo, ou seja, quatro em cada dez seres humanos já são obrigados a racionar o líquido.

Neste sentido, GLEICK (1993), afirma que: *“Uma das mais importantes características do ciclo global de água doce (...) é sua desigual distribuição espacial e temporal. Apesar da água ser abundante na média global, nós freqüentemente não a obtemos quando e onde queremos, ou na forma que ela é desejada.”*

A distribuição de água no planeta não é uniforme, o que produz alterações continentais, regionais e locais no uso dos recursos hídricos, com profundas implicações econômicas.

O consumo diário de água é muito variável ao redor do globo. Além da disponibilidade do local, o consumo médio de água está fortemente relacionado com dois fatores relevantes: o nível de desenvolvimento do país e com o nível de renda das pessoas.

Assim estima-se que em 2025 haverá um aumento de 50% no consumo de água nos países em desenvolvimento e de 18% nos países desenvolvidos.

Isso pode ser percebido nas duas situações abaixo descritas:

Mary, que vive nos Estados Unidos, começa o dia com um banho de chuveiro, escova os dentes com a torneira aberta, dá descarga no vaso sanitário e lava as mãos. Mesmo antes do café da manhã ela talvez já tenha usado água suficiente para encher uma banheira mediana. No fim do dia, Mary, como muitos outros que vivem nos Estados Unidos, consumiu uns 350 litros de água, que daria para encher duas vezes e meia uma banheira. A distância que a separa de água limpa e farta é a torneira mais próxima. Sempre tem água disponível; para ela, isso é corriqueiro.

Para Mutonga, que vive na África Ocidental, a história é outra. Ela levanta-se bem antes do amanhecer, veste-se, equilibra uma lata grande na cabeça e anda uns 8 quilômetros até o rio mais próximo. Ali ela se banha, enche a lata de água e volta para casa. Essa rotina diária leva umas quatro horas. Na hora seguinte, ela filtra a água para remover parasitas e divide-a em três recipientes — um para beber, outro para uso geral e ainda outro para seu banho, à noite. A roupa tem de ser lavada no rio.

Estas duas situações servem para ilustrar que, embora exista água doce no mundo, sua distribuição é desigual, e sua disponibilidade está relacionada com os dois fatores mencionados.

Com relação à distribuição desigual o Programa Hidrológico Internacional da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO) relata que a Ásia tem 36% da água que enche os lagos e rios do mundo, mas esse continente abriga 60% da população mundial. Em contraste, na América do Sul encontra-se 26% do total de água doce disponível no planeta e apenas 6% da população mundial, e se considerarmos só o rio Amazonas contém 15% das águas fluviais do mundo, mas apenas 0,4% da população mundial vivem suficientemente perto para utilizá-las.

Podemos dizer que o Brasil é um país privilegiado em termos de disponibilidade hídrica global, quando comparado ao globo terrestre, pois, detém 13,7% de toda água doce superficial do mundo, mas, mesmo assim, também apresenta problemas quanto a sua distribuição interna:

Como demonstrado na tabela 12 mais de 73 % da água doce disponível no país encontra-se na bacia Amazônica, que é habitada por menos de 5% da população. Apenas 27 % dos recursos hídricos brasileiros estão disponíveis para as demais regiões, onde residem 95% da população do país (LIMA, 1999), conforme pode ser observado na Tabela 12:

TABELA 12: INFORMAÇÕES BÁSICAS SOBRE AS BACIAS HIDROGRÁFICAS BRASILEIRAS:

Quadro demonstrativo – Informações básicas sobre as bacias hidrográficas brasileiras										
Nº	Bacia Hidrográfica	Área		População		Densidade	Vazão	Disponibilidade	HÍDRICA**	Disponibilidade
		10 ³ KM ²	%	Hab.	%	Hab./Km ²	M ³ /S	Km ³ /Ano	%	M ³ /hab.ano
1	Amazônica	3.900	45,8	6.687.893	4,3	1,7	133.380	4206	73,2	628.940
2	Tocantins	757	8,9	3.503.365	2,2	4,6	11.800	372	6,5	106.220
3	Atlântico N/NE	1.029	12,1	31.253.068	19,9	30,4	9.050	285	5,0	9.130
4	São Francisco	634	7,4	11.734.966	7,5	18,5	2.850	90	1,6	7.660
5	Atlântico Leste	545	6,4	35.880.413	22,8	65,8	4.350	137	2,4	3.820
6A	Paraguai**	368	4,3	1.820.569	1,2	4,9	1.290	41	0,7	22.340
6B	Paraná	877	10,3	49.924.540	31,8	56,9	11.000	347	6,0	6.950
7	Uruguai**	178	2,1	3.837.972	2,4	21,6	4.150	131	2,3	34.100
8	Atlântico Sudeste	224	2,6	12.427.377	7,9	55,5	4.300	136	2,4	10.910
Brasil		8.512.100		157.070.163	100	18,5	182.170	5.745	100	36.580

Fonte: SIH/Aneel 1999 * ibge, 1996. ** Produção hídrica brasileira

Outra situação a ser levada em conta é o *desperdício*, que é ocasionado pela ilusão de abundância de água no Brasil. Este fato reflete também a péssima gestão desse recurso e o problema de distribuição dos recursos hídricos, ressalta BELLO (2000).

Estima-se que o desperdício no Brasil chegue a 45% do volume de água tratada ofertada à população, o que corresponde a 4,68 bilhões de metros cúbicos de água produzidos (ANA, 2005).

Freqüentemente a água tratada para consumo se perde na distribuição, dependendo das condições de conservação das redes de abastecimento. Além dessas perdas de água no caminho entre as estações de tratamento e o consumidor, o desperdício também

é grande nas nossas residências, envolvendo situações que acabam consumindo muita água como, por exemplo, o tempo necessário para tomarmos banho, a própria forma como tomamos banho, a utilização excessiva de descargas no vaso sanitário, a lavagem da louça com água corrente, no uso da mangueira como vassoura na limpeza de calçadas, na lavagem de carros, etc.

Lembrando que se não houver uma acentuada diminuição dos grandes desperdícios no uso da água – doméstico, industrial e agrícola – e uma substancial redução dos níveis de degradação da sua qualidade – pelo lançamento de esgotos domésticos e efluentes industriais não-tratados nos rios – o Brasil corre o risco de ser penalizado por suas práticas desleais de mercado prejudicando o cidadão que mora nas cidades ou no meio rural (REBOUÇAS, 2001).

Com isso percebe-se que a distribuição aliada ao desperdício é, apenas, o primeiro dos grandes problemas que envolvem a água.

Um segundo problema que agrava a distribuição desigual de água é *o crescimento demográfico*, a ser discutido a seguir:

2.2.3 – CRESCIMENTO DEMOGRÁFICO

Observa-se que a quantidade de chuvas no mundo inteiro permanece um tanto estável, entretanto, por problemas principalmente de poluição, os mananciais, que ficaram estáveis por séculos, hoje estão diminuindo de volume em todos os continentes, enquanto a população aumenta.

Enquanto que o crescimento demográfico torna-se explosivo e, com isso, o consumo de água dobrou, pelo menos, duas vezes no século XX, alguns estimam que ele possa dobrar novamente nos próximos 20 anos. Esta explosão demográfica, por consequência acaba exercendo uma grande influencia no aumento do consumo de água, não apenas para satisfazer as nossas necessidades vitais, mas também para atender a demanda da produção de alimentos e produtos industrializados (BIO, 1998).

Naturalmente, uma população cada vez maior exige não só mais água potável, mas também mais alimentos. Produzir alimentos, por sua vez, exige muita água, cerca de

70% do consumo da água do planeta é utilizado na agricultura. E a agricultura precisa competir com as demandas de água da indústria e de particulares. Com a expansão das cidades e das áreas industriais, a agricultura muitas vezes sai perdendo.

Segundo SANIN (1997), os maiores setores consumidores de água doce disponível são a agricultura e a indústria, sendo o abastecimento urbano responsável apenas pelo terceiro lugar, conforme podemos ver na Figura 9, abaixo:

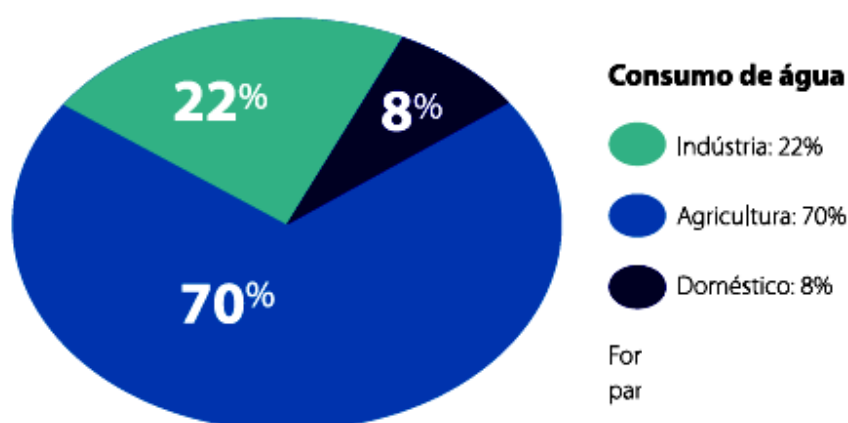


Figura 9: Setores consumidores de água

Fonte: Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (FAO)

Para TOLEDO (2004), até 2025 as indústrias serão responsáveis por 24% do consumo mundial de água.

Por outro lado, o relatório da Rede WWF (World Wide Fund For Nature) aborda o tema do "uso virtual" de água, cada vez mais freqüente, e que se relaciona com o consumo principalmente na agricultura. Este tema foi introduzido pelo relatório de 29 agências da ONU para o Fórum Mundial da Água de 2002 e, a partir de então tem freqüentado vários debates e discussões.

O relatório da Rede WWF demonstrou que para produzir uma batata são necessários 25 litros de água; para um ovo, 135 litros; para um hambúrguer de 150 gramas, 2.400 litros; para o couro de um par de sapatos, 8 mil litros; para o algodão de uma

camiseta, 4.100 litros, 75 litros para um copo de cerveja, 200 litros para uma taça de vinho, 140 litros para uma xícara de café, 40 litros para uma fatia de pão de 30 gramas (90 litros, caso seja acompanhada por uma fatia de queijo).

Estes dados permitem dois raciocínios lógicos:

Primeiro: a de que o consumo de água por pessoa é muitíssimo maior do que se imagina. Admitindo-se que produzir um quilo de carne bovina pode exigir 15 mil litros de água, uma pessoa que coma apenas 200 gramas dessa carne por dia estará consumindo, só aí, 3 mil litros por dia. Se a eles se adicionarem os cereais, os vários usos domésticos, a água necessária em tudo (combustíveis, materiais, etc.), não será exagero dizer que o consumo total do cidadão médio estará acima de 4 mil litros por dia.

Na segunda conclusão, aprofunda-se o raciocínio e passamos a analisar outra questão implícita, ou seja, a exportação “virtual” de água que países, como o Brasil tem feito, embutida principalmente nos cereais e carnes que exporta. Água que os países industrializados importadores desses produtos preferem economizar em seus territórios, mas que não é nada valorizada aqui, cabendo salientar que esta água, a “virtual”, não tem preço específico (NOVAES, 2006).

Sabendo que 70% dos lençóis de águas do mundo estão no Brasil, deveríamos, portanto, estar em grande vantagem em relação ao mundo, porém, este potencial de recurso hídrico, além de não ser aproveitado devidamente, está também ameaçado pela contaminação do solo e este é o terceiro problema envolvendo a água. Além de a disponibilidade variar no tempo e no espaço e o crescimento demográfico exigir uma demanda maior, a água, durante a sua utilização, acaba tendo a sua *qualidade degradada*.

2.2.4 – DEGRADAÇÃO

A humanidade despeja todos os anos 30 bilhões de toneladas de lixo e quem mais sofre as consequências com a poluição são os recursos hídricos, ocorrendo a contaminação pelos mais diversos tipos de substâncias desenvolvidas e utilizadas pelo homem, como: pesticidas, metais pesados, óleos, sedimentos, substâncias radioativas. Tal contaminação contribui para a redução na disponibilidade da água, e acredita-se que 12 mil km³ de água

disponível esteja poluída, ou seja, sem condições para uso. Esse valor é maior do que a totalidade de água existente nas dez bacias hidrográficas do mundo (TOLEDO, 2004).

Atualmente, os problemas mais sérios de poluição referem-se aos efluentes industriais, em torno de 2 bilhões de toneladas de lixo/dia são despejados em rios, lagos e riachos. Muitos rios e riachos são poluídos do começo ao fim.

Nos países em desenvolvimento, os esgotos poluem praticamente todos os grandes rios. Uma pesquisa envolvendo 200 dos maiores rios da Rússia revelou que 8 em cada 10 deles apresentavam níveis excessivamente altos de agentes bacterianos e viróticos. No Brasil a situação não é diferente, qualquer morador de São Paulo é capaz de constatar que o principal rio que corta a cidade, o rio Tietê, e seus afluentes estão completamente poluídos.

Essa não é uma constatação somente dos países em desenvolvimento, muitos rios e lençóis freáticos de países altamente desenvolvidos estão em situações críticas, pois, embora não sejam inundados por esgotos, são envenenados por substâncias tóxicas, incluindo os agrotóxicos. Praticamente no mundo todo, países costeiros lançam esgoto em águas rasas do litoral, poluindo seriamente as praias.

Por muito tempo, o homem preocupou-se somente com o problema da poluição das águas, relacionado à presença de organismos causadores de doenças, contudo, com o aumento das atividades industriais, os efluentes passaram a apresentar uma composição muito mais complexa, com os mais variados tipos de substâncias, das quais, muitas, são extremamente tóxicas. As indústrias despejam de 300 a 500 milhões de toneladas de metais pesados e outros dejetos nas águas.

Isso tudo traz efeitos adversos sobre todos os seres vivos, além de efeitos diretos e indiretos sobre o meio ambiente, colocando em risco a nossa própria existência no Planeta (HESPANHOL, 1999) e (MEYBECK, CHAPMAN & HELMER, 1990).

Hoje, mais de 2,2 milhões de pessoas morrem vítimas de doenças relacionadas com a ingestão de água contaminada e da falta de saneamento e 50% da população dos países em desenvolvimento está exposta a fontes de águas impróprias para o consumo humano.

Devido aos problemas que começaram a surgir em função da contaminação das águas, pelos mais variados tipos de substâncias criadas e utilizadas pelo Homem, a partir do

final da década de 60, nos Estados Unidos, e meados da década de 70, no Brasil, começaram a ser editadas normas referentes ao controle da poluição das águas (CETESB, 1992-a), (KINDSCHY, KRAFT & CARPENTER, 1997), sendo que estas normas vêm se tornando cada vez mais rígidas e restritivas, principalmente no que diz respeito ao controle de efluentes industriais, visando à proteção da saúde e bem estar do ser humano e do meio ambiente.

Temos já a necessidade, quer social, quer por obrigação governamental de controlar a qualidade de efluentes. Devido à necessidade e exigência por processos ambientais responsáveis torna-se imperativo o uso coerente de recursos naturais.

Os segmentos industriais e comerciais necessitam adequar-se cada vez mais ao consenso global no que diz respeito às condições ambientais, a fim de estarem prontos para as oportunidades que são criadas com a implantação de novas tecnologias, novos conceitos e de novos valores para seus produtos.

Analisada toda a complexidade dos problemas envolvendo os recursos hídricos, ou seja, a questão da distribuição, do crescimento demográfico e da degradação, pode se entender porque a gestão da água passou a ser parte primária e integrante das preocupações da indústria.

E extremamente cabível é a reflexão feita por BERNARDIS (2002), quando faz o seguinte questionamento: *“Se a própria natureza faz da água um recurso renovável, quando esta é reciclada através de sistemas naturais por diversas vezes, por que o homem, que se beneficia deste recurso, não pode se dedicar ao seu melhor aproveitamento seja através da economia, limpeza ou do reuso planejado?”*.

2.2.5 – GESTÃO

Água, como um recurso estratégico tem sido considerada uma grande questão do século XXI, sob diversos aspectos. Assim evitar desperdício, reusar e racionalizar a utilização desse líquido é mais que uma questão política ou ambiental: *é econômica*.

A complexidade dos processos industriais, o aumento do número de indústrias, o aumento da demanda de água para abastecimento público e a maior conscientização da

população com relação às questões ambientais, além do desenvolvimento e aplicação de normas cada vez mais restritivas, são os principais argumentos para justificar esta afirmação.

O foco da maior parte das pesquisas, atenção pública e ações governamentais relacionadas às atividades de prevenção da poluição recaem sobre as indústrias, pois, elas exercem uma grande pressão sobre os recursos hídricos, tanto com relação à captação de água, quanto pela contaminação destes recursos pelos mais variados tipos de substâncias, além de todos os problemas de degradação da qualidade ambiental (PHIPPS, 1995).

Para que esta pressão sobre os recursos hídricos seja minimizada, são necessárias que sejam adotadas estratégias que visem minimizar os impactos negativos, associados à captação de água e geração e lançamento de efluentes industriais para os corpos d'água.

Segundo GARRIDO (2003), a cobrança pelo uso dos recursos hídricos é um dos instrumentos de política para o setor, previsto na legislação federal e nas leis estaduais, e isso tem contribuído para tomadas de decisão positiva sobre o consumo, ou seja, o uso racional da água. Nos últimos anos a SABESP em São Paulo vem estabelecendo tarifas crescentes com o consumo, com objetivo de desestimular o consumo potável.

Na Tabela 13 abaixo vemos o valor cobrado pela SABESP para consumo residencial e industrial, segundo o comunicado de agosto de 2009.

TABELA 13: TARIFAS RESIDENCIAL E INDUSTRIAL DA SABESP

RESIDENCIAL NORMAL		
m ³ /mês	Tarifa de água (R\$)	Tarifa de esgoto (R\$)
0-10 m ³	13,64/mês	13,64/mês
11-20 m ³	2,13/ m ³	2,13/ m ³
21-50 m ³	5,32/ m ³	5,32/ m ³
Acima de 50 m ³	5,86/ m ³	5,86/ m ³
INDUSTRIAL		
m ³ /mês	Tarifa de água (R\$)	Tarifa de esgoto (R\$)
0-10 m ³	27,37/mês	27,37/mês
11-20 m ³	5,32/ m ³	5,32/ m ³
21-50 m ³	10,21/ m ³	10,21/ m ³
Acima de 50 m ³	10,63/ m ³	10,63/ m ³

Fonte: site da SABESP

Mais recentemente, foram tomadas algumas medidas em nível governamental a respeito dos recursos hídricos entre elas está a Política Nacional dos Recursos Hídricos, instituída através da lei Nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Em 2000, foi publicada a Lei nº 9.084, que criou a Agência Nacional de Água – ANA, entidade federal responsável pela implementação desta política e desde então, muito foi feito em gestão de águas no Brasil.

Para DUTRA e ANTUNES, a promulgação desta lei constitui um marco para o setor de recursos hídricos no Brasil. Além de instituir a Política Nacional dos Recursos Hídricos, foi criado o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e, a partir de seus fundamentos, diretrizes e instrumentos, a gestão de recursos hídricos vem avançando de forma bastante rápida em todo país.

2.2.6 – NA INDÚSTRIA

A atual filosofia utilizada nas indústrias considera sistemas independentes para o gerenciamento de água para *consumo industrial* e para o gerenciamento dos *efluentes* a serem tratados e lançados para o meio ambiente.

Consumo industrial: Neste caso, a estratégia adotada consiste na utilização de sistemas de tratamento compostos por unidades, nas quais são desenvolvidos processos físicos e químicos, visando adequar as características da água às necessidades de processo.

Efluentes: o procedimento adotado consiste na coleta de todas as correntes geradas nos diversos processos industriais e encaminhamento das mesmas, por meio de tubulação, a um determinado local da indústria, denominado de sistema ou estação de tratamento de efluentes (ETE), no qual são utilizadas técnicas de tratamento que visam adequar as características desses efluentes aos padrões de lançamento estabelecidos em normas.

O atendimento às diretrizes de maximização do uso dos recursos hídricos e minimização dos impactos ambientais negativos, relativos à geração e ao lançamento de efluentes, exige o desenvolvimento de estratégias que possam conduzir a um melhor gerenciamento de águas e efluentes nas indústrias.

Nestas estratégias, deve-se considerar a água para consumo industrial e os efluentes em um sistema único, o qual deverá ter interface direta com os processos industriais. Deve-se buscar alternativas que visem evitar que a poluição seja gerada, eliminando-se a necessidade de adoção de métodos para o seu controle, bem como um *Modelo para o Gerenciamento de Águas e Efluentes para a Indústria*.

A busca por um modelo mais eficiente para solucionar os problemas relacionados à degradação do meio ambiente, principalmente em função do desenvolvimento das atividades industriais, deu origem ao conceito de prevenção da poluição, que é definido da seguinte forma (DUNCAN, 1994):

"Qualquer prática que reduz a quantidade ou impacto ambiental e na saúde, de qualquer poluente antes da sua reciclagem, tratamento ou disposição final, incluindo modificação de equipamentos ou tecnologias, reformulação ou reconfiguração de

produtos, substituição de matérias-primas, melhoria organizacional, treinamento e/ou controle de inventário."

Neste caso, a Prevenção da Poluição pode ser vista como uma forma economicamente vantajosa e estrategicamente sensata para as empresas protegerem o meio ambiente, protegendo a si mesmas de possíveis responsabilidades, infrações legais e despesas desnecessárias ou não previstas.

Analisaremos, a seguir, quatro benefícios potenciais relacionados à implantação dos programas de prevenção da poluição

a) Redução da responsabilidade legal

Evitar a geração de poluentes sólidos, líquidos ou gasosos, os quais poderiam afetar, de forma negativa, o meio ambiente e a saúde dos seres humanos, é uma das maneiras mais eficientes e sensatas para uma empresa se proteger contra possíveis responsabilidades legais, já que, não existindo o poluente, não existe a possibilidade de ocorrência de qualquer dano ambiental, ou problema de poluição.

Com o desenvolvimento de uma legislação cada vez mais restritiva e punitiva, caso específico da Lei de Crimes Ambientais, a adoção de estratégias de prevenção da poluição passa a figurar entre as opções mais racionais disponíveis para a indústria. No novo paradigma da globalização, porém, a disponibilidade de água doce torna-se cada vez mais um negócio e fator econômico competitivo do mercado.

b) Melhorar a segurança dos trabalhadores

A prevenção da poluição também pode ser um importante componente dos esforços para a melhoria da saúde e segurança dos trabalhadores, já que a substituição de substâncias tóxicas por compostos químicos menos prejudiciais, a redução na emissão fugitiva de solventes orgânicos dos processos produtivos e a minimização da geração de resíduos e efluentes a serem manipulados e dispostos, irão reduzir o risco de exposição dos

trabalhadores a materiais tóxicos, o que, por sua vez, resulta em uma melhor condição de saúde ocupacional.

c) Melhoria da imagem corporativa

A adoção de programas de prevenção da poluição, também, pode ser considerada uma excelente ferramenta de relações públicas, pois uma empresa que demonstra um comprometimento para reduzir os impactos negativos sobre o meio ambiente, devido as suas atividades, poderá desenvolver um relacionamento mais amigável com a comunidade local e com os seus consumidores.

Este aspecto é importante, pois os consumidores e a comunidade em geral estão a cada dia que passa, se conscientizando dos problemas ambientais associados aos produtos que consomem, dando às empresas a oportunidade de utilizar o seu desempenho ambiental e a sua preocupação com o meio ambiente em que vivem e com sua saúde melhorando também a sua participação no mercado, e capitalizando, em marketing, essa imagem, além de se estabelecer como um membro respeitável na comunidade.

d) Redução dos custos

O potencial para a redução de custos e economia de dinheiro é, talvez, um dos benefícios mais atrativos de qualquer programa de prevenção da poluição para as indústrias. A redução na fonte, reciclagem no processo e melhoria na eficiência da utilização de energia e outros insumos, podem reduzir as quantidades necessárias ao desenvolvimento dos processos industriais, o que por sua vez irá resultar na redução das despesas da indústria.

Com a substituição de compostos químicos tóxicos por substâncias menos perigosas, pode-se reduzir significativamente os custos relacionados à obtenção e manipulação destas substâncias e, conseqüentemente, reduzir os gastos com os sistemas de controle da poluição, gerados por essas substâncias. A redução da quantidade de resíduos

perigosos, também reduz custos, principalmente associados à manipulação, transporte e disposição final destes resíduos.

Além do exposto acima, as atividades de prevenção da poluição também podem reduzir os custos associados com a obtenção de licenças de implantação e operação das indústrias. Esses benefícios se aplicam a qualquer tipo de indústria, agora será analisado o que tem sido feito na indústria têxtil de mais moderno nesta área.

2.2.7 – NO PROCESSO TÊXTIL

A água é uma das principais matérias primas no acabamento têxtil. Além de ser usada para a obtenção de aquecimento ou resfriamento, nos processos de beneficiamento, tem a função de meio de transporte dos produtos químicos utilizados, ou seja, ela é utilizada necessariamente em todas as fases do processo: lavagem, purga, tingimento e amaciamento. Ela serve também para a retirada do excesso dos produtos considerados indesejáveis ao substrato têxtil, e isso pode causar, além de contaminações, impacto no corpo receptor oriundo de sua carga poluente (KUNZ, 1999).

Devido às variações em seus processos e produtos utilizados, às vazões e toxicidade elevadas, ao volume e a composição variável dos efluentes gerados, MORAN *et al.* (1997) e TALARPOSHTI *et al.* (2001) afirmam que as indústrias têxteis possuem uma das mais altas cargas poluidoras em seu efluente, e VANDEVIVERE *et al.* (1998) concluiu que a indústria têxtil é considerada a mais poluidora dentre todos os setores.

As questões ambientais relacionadas à indústria têxtil são numerosas. Nos últimos tempos devido ao aumento da conscientização e rigidez das leis ambientais, afinal, a fácil percepção visual da presença de corantes nos cursos d'água, mesmo em pequenas concentrações atrai a atenção do público e das entidades ligadas à proteção ambiental.

Os principais problemas estão associados ao elevado volume de resíduos líquidos e sólidos e à sua alta carga de orgânicos.

Após coleta e análise de amostras dos efluentes têxteis em laboratório verifica-se que possuem valores elevados para níveis de coloração, demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), sólidos suspensos (SS) e baixos valores

de concentração de oxigênio dissolvido (OD), ou seja, resultados que comprovam claramente quão inadequada a água se torna após tais processos.

O problema ambiental agrava-se à medida que esses efluentes são descartados em corpos hídricos da Região, responsável pelo abastecimento de água dos municípios. Além de acarretar problemas de qualidade de água para o abastecimento, elevando-se assim muitíssimo o custo da empresa de saneamento responsável pelo tratamento e abastecimento d'água.

Devido a tais impactos negativos, as leis ambientais, cada vez, ficam mais rígidas. A antiga Resolução CONAMA N°20/86 e a sua sucessora do dia 17/03/2005 a Resolução N° 357/05, como não fixavam limites de cor para o lançamento de efluentes, durante muitos anos se subestimou o impacto ambiental causado pelo lançamento de efluentes têxteis com níveis de cor elevados, muitas vezes considerando-se a cor como sendo apenas um aspecto meramente de natureza visual e estética.

Entretanto, se for feita uma análise mais criteriosa da referida Resolução notar-se-á que ela estipula um índice de coloração para os corpos de água. De acordo com o tipo de água (doce, salgada ou salobra), a Resolução determina que a cor verdadeira do corpo hídrico deve estar desde virtualmente ausente até um valor de 75 mg Pt/L (valor utilizado como padrão de cor). Portanto, não é permitido alterar a coloração do corpo receptor, suas características, seu enquadramento e, principalmente, a sua qualidade.

A permanência da cor nestes efluentes representa um alto potencial de impacto ambiental, não apenas em função da toxicidade associada, mas também em relação à interferência em processos fotossintéticos (PERALTA-ZAMORA *et al.*, 2002).

Apenas por essa ótica, já seria relevante o monitoramento da cor. Contudo, esse parâmetro, quando alterado num corpo receptor pelo lançamento de efluentes, provoca uma degradação ambiental considerável. Em função de tantas polêmicas levantadas, os Órgãos Ambientais vêm se preocupando em atuar junto às indústrias têxteis, no sentido de que sejam devidamente instalados sistemas de tratamento para remoção de cor dos efluentes, a fim, de minimizar os graves problemas ambientais já causados.

Dependendo do porte das empresas (geralmente as grandes), e de seu nível de conscientização ambiental, observa-se a implantação de sistemas de tratamento utilizando a via biológica, físico-química e muitas vezes a conjugação dos dois processos, utilizando a

depuração físico-química para a retirada de cor e a depuração biológica para redução de DBO e DQO.

É importante ressaltar que os processos de tratamentos de efluentes convencionais são incapazes de remover os corantes de maneira total e ambientalmente correta.

Segundo TEIXEIRA (2009) as depuradoras físico-químicas geram alguns problemas, por não cumprirem com os regulamentos de vertidos, já que a redução de DBO e DQO é inferior a 75%. Outro problema é que elas também geram uma grande quantidade de lodo, que necessita de descarte em aterro sanitário. Tudo isso precisa ser apontado na planilha de custo da empresa, e o resultado é que o tratamento do efluente se torna mais caro ainda. Além disso, o custo médio de depuração físico-química costuma ser o dobro da depuração biológica, porém, conforme SHEN *et al.* (2002) observaram, estas últimas oferecem melhor rendimento na redução do DBO e DQO, mas, por outro lado, não conseguem eliminar a cor, visto que os corantes não são biodegradáveis e a sua baixa afinidade física por sorbentes comuns fazem com que os efluentes gerados na estação de tratamento, sejam fortemente coloridos e responsáveis por 20% de toda cor introduzida no meio ambiente.

Apesar de estar enquadradas e subservientes à legislação em vigor, ainda se convive com outros inconvenientes, relacionados à liberação de corantes não fixados, hidrolisados e não degradados nos processos convencionais de tratamento. Com isso, observa-se que alguns indicadores de poluição não são minimizados, como é o caso da cor.

Tratamentos físico-químicos convencionais de efluentes da indústria têxtil consistem de pré-tratamento, coagulação/floculação, sedimentação e manipulação do lodo. Em adição ao tratamento de coagulação química, métodos de tratamentos secundários e terciários tais como filtros biológicos, lodos ativados, e outros têm sido utilizados. (MURUGANANTHAN *et al.*, 2004).

Sendo que o tratamento preliminar objetiva apenas a remoção dos sólidos grosseiros, enquanto o tratamento primário visa à remoção de sólidos sedimentáveis e parte da matéria orgânica. Em ambos predominam os mecanismos físicos de remoção de poluentes. Já no tratamento secundário, no qual predominam mecanismos biológicos, o objetivo é principalmente a remoção de matérias orgânica e eventualmente nutrientes (nitrogênio e fósforo), porém, estes tratamentos não conseguem remover a cor do efluente.

Os métodos empregados para a remoção de DQO (Demanda Química de Oxigênio), da maioria dos efluentes estão bem estabelecidos. No entanto, no que se referem aos tratamentos utilizados para a remoção da cor no efluente tratado tem se mostrado complexas e de difíceis implementações, pode-se afirmar de modo sumário que isto ocorre devido à origem sintética e principalmente pela estrutura aromática complexa presente nos corantes (SPERLING, 1996). Assim muitas empresas tem utilizado tratamentos chamados *terciários* que são relativamente caros.

Na Tabela 14 abaixo, pode se ver alguns dados relativos a esses tratamentos terciários.

TABELA 14: TRATAMENTOS TERCIÁRIOS PARA ELIMINAÇÃO DE COR

Método	Eliminação de Cor	Capacidade (V)	Velocidade	Custo	Outras características
Carvão Ativo	Muito boa	Pequena	Lenta	Alto	Problemas de limpeza e manutenção
Membrana	Boa	Grande	Rápida	Alto	Subprodutos redução de DQO
Ozonização	Boa	Grande	Média	Alto	Redução de lodo
Coagulação/ Floculação	Boa	Grande	Média/ Rápida	Médio	Nitrificação e redução de DQO
Novas Tecnologias		Grande	Rápida	Médio/ Alto	Afinidade boa aos corantes reativos, aplicável aos corantes ácidos

Fonte: GUTIÉRREZ (2007)

Na prática o que se observa é que alguns processos adotados por empresas para remoção da cor são eficientes do ponto de vista técnico, entretanto, economicamente inviáveis, para a realidade do setor têxtil no Brasil. Com isso, as indústrias tem buscado alternativas que minimizem tais custos para o tratamento d'água.

Com isso, o desenvolvimento de novas tecnologias adequadas para o tratamento de efluentes tem sido objetivo de grande interesse industrial e acadêmico, pois, permitem a racionalização do uso da água e a redução da carga poluidora (SANTOS *et al.*, 1998). Cada vez mais, tem-se buscado novas alternativas para a remoção da cor dos efluentes, uma vez que as convencionais se mostram ineficientes. (AL-DEGS *et al.*, 2000).

As principais técnicas para o descoloramento das águas no rejeito envolvem principalmente processos de adsorção, precipitação, degradação química, fotoquímica e biodegradação (HITZ, 1978). A seguir, são mostrados os resultados obtidos em alguns estudos recentes que foram realizados com estas diferentes técnicas:

- No estudo de HITZ (1978), as técnicas de adsorção têm se baseado na remoção do corante através da passagem da amostra em carvão ativo, sílica gel, bauxita, resinas de troca-iônica, entre outros. Em geral, oferecem um método lento, não econômico, porém efetivo, principalmente para volumes de pequena escala. HITZ (1978) também propôs uma técnica que permite o tratamento de grandes volumes, de modo rápido e satisfatório. O uso de membranas especiais (nanofiltração e osmose reversa) propiciando uma boa remoção da cor. Em ambas as técnicas, a metodologia consiste na separação efetiva de moléculas de corantes com dimensão suficientemente grande para serem separadas do efluente, porém, o resultado não foi satisfatório, pois o custo é alto e a limpeza das membranas é problemática (HITZ, 1978).
- De acordo com GUGLIELMETTI (1980), o método de degradação baseado em reações fotoquímicas tem se mostrado relevante como etapa primária na degradação de alguns corantes, uma vez que os corantes sintéticos apresentam a princípio alta estabilidade quando submetidos à luz visível ou ultravioleta. Para que esta técnica funcionasse, BROWN (1983) demonstrou que seria necessária a combinação de reação de degradação seguida de métodos de adsorção. Assim, esta técnica torna-se mais complexa e eleva-se o seu custo.

- Foram pesquisados, também, técnicas de tratamento utilizando-se degradação química baseadas principalmente na reação oxidativa pelo cloro ou ozônio. Observou-se que as técnicas de destruição utilizando ozônio se mostram mais efetivas do que aquelas realizadas com cloro, pois estas são insatisfatórias para alguns tipos de corantes (corantes dispersos e diretos), além de produzirem íons inorgânicos. Este método é baseado na remoção da cor do efluente através da clivagem das moléculas do corante em processo catalítico ou radiação ultravioleta. Tais técnicas podem ser usadas em grandes volumes de efluentes, sendo razoavelmente rápidas, porém apresentam como grande desvantagem seu alto custo (GOULD, 1987).
- COOPER (1993) usou a técnica de coagulação/floculação usando polieletrólitos e/ou floculantes inorgânicos (sais de ferro e alumínio) apresentando certo grau de sucesso como tratamento terciário para remoção da cor do efluente têxtil. Entretanto, como o método efetivamente remove a coloração de rejeitos tratados logo na fonte de saída, a máquina de tingimento, e antes da descarga nos reservatórios a níveis de padrão permitidos, o resultado, porém, torna-se muito variável e incerto, pois, depende do tipo de corante a ser removido, composição, concentração e fluxo de produção do rejeito. Entretanto, para se obter uma alta eficiência desta técnica, normalmente utiliza-se um excesso de polieletrólito ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, amônia, etc.) que por sua vez irá acrescentar um resíduo potencial no efluente, o que significa que o efluente ainda não está pronto, do ponto de vista ambiental, para ser lançado no meio ambiente.
- Segundo CORREIA (1995), os produtos poluentes dos processos têxteis surgem tanto das impurezas da matéria prima processada quanto da grande variedade de reagentes químicos usados no processo de beneficiamento. Ele coloca que a composição química das correntes de efluente têxtil está sujeita a constantes mudanças em sua composição devido à diversidade dos processos têxteis e a grande gama de produtos químicos empregados. Para CORREIA (1995), antes de se aplicar tecnologias de diminuição de poluição, é necessário identificar os tipos de águas vindas dos diversos processos empregados pela indústria. Em sua conclusão, CORREIA (1995) diz que devido os efluentes têxteis terem um alto volume e uma composição química muito variada que podem incluir desde corantes não

biodegradáveis a substâncias tóxicas, é difícil determinar qual seria o tratamento ideal para ser aplicado

- BOWEN *et al.* (1998), apresentaram uma base teórica na determinação de membranas de nanofiltração para fluxos aquosos contendo corantes e sal. Analisaram que os melhores métodos atualmente disponíveis estão baseados no uso da equação de Nernst-Plank, caracterizando a membrana em termos dos raios de poros efetivos (rp), onde se relaciona a densidade de custo efetivo e a relação de densidade de membrana efetiva para a porosidade de membrana, e ainda segundo BOWEN *et al.* (1998), quando as gamas de tais parâmetros para membranas de nanofiltração comercialmente disponíveis forem conhecidas, será possível usar o método numérico e escolher melhor a membrana para cada processo particularmente.
- TAKATSUJI *et al.* (1999), estudaram a remoção do sal e ácidos orgânicos por eletrodialise, precipitação e adsorção, e o resultado obtido foi a diminuição da capacidade de saturação com o aumento da concentração do sal, mas a constante de equilíbrio permaneceu inalterada. Combinando a eletrodialise e adsorção, o sal e os ácidos orgânicos poderiam ser removidos enquanto que os aminoácidos eram repelidos. Considerou-se que a solução filtrada era satisfatória para seu reuso.
- LEÃO *et al.* (1999), avaliando o uso de tratamento convencional para remoção de cor em efluentes de indústrias têxteis de médio porte, observou uma expressiva eficiência de remoção (+ 95%) com o uso do tratamento físico-químico, coagulação/floculação, através do uso de sulfato de alumínio, atingindo um nível adequado que não comprometeu a qualidade do corpo receptor. Hoje, esta tem sido a técnica utilizada pelas indústrias de pequeno e médio porte para o tratamento de efluentes.
- Os efluentes têxteis contêm uma gama extensiva de combinações não-polar e polar, mas as polares são predominantes. Eles incluem substâncias que são usadas como insumos e produtos auxiliares em processos têxteis que são removidos dos tecidos pelas águas de lavagem. Estes poluentes orgânicos polares em efluentes têxteis podem dar origem a problemas devido ao fato que eles são não biodegradáveis e a eliminação deles é incompleta, e, além disso, alguns contaminantes têm um efeito tóxico às bactérias aplicadas no processo de tratamento biológico dos efluentes

têxteis (CASTILLO e BARCELÓ, 2000). Porém, muitas substâncias polares, iônicas, pesadas e termicamente instáveis não podem ser analisadas através de técnicas de cromatografia gasosa. O trabalho destes autores está baseado na extração da fase sólida (SPE) combinada com a fração tóxica, seguindo através de espectrometria de cromatografia de massa líquida (LC-MS). Eles utilizaram magna de *Daphnia* como o organismo designado para identificar as combinações tóxicas nas diferentes frações. CASTILLO & BARCELÓ (2001) concluíram que há a necessidade de combinar análise química baseada em extração fracionada dos extratos seguida por cromatografia líquida ou gasosa com avaliação de toxicidade com uma bactéria de teste seguro.

- KOYUNCU (2002) estudou a remoção de corante e sal por nanofiltração, os efeitos de concentração e a velocidade de fluxo, de forma a reciclar os corantes e o sal filtrado observando que em concentrações de sal fixas o fluxo diminuiu com o aumento da concentração dos corantes e a remoção da cor diminuiu com o aumento da concentração de sal.
- Em seu trabalho, FREITAS (2002) caracterizou os efluentes das etapas de preparação e tingimento, visando aumentar a eficiência no uso de insumos, água e energia, através da minimização ou reciclagem de efluentes gerados no processo produtivo da Indústria têxtil. Os parâmetros determinantes foram: cor; turbidez, temperatura, pH, alcalinidade parcial e total, condutividade, ferro, sólidos totais dissolvidos, suspensos totais e fixos, e matéria orgânica determinada pela demanda química de oxigênio. FREITAS (2002) estabeleceu uma estratégia para o reuso de efluentes oriundos do processamento de malhas dos lotes de cores brancas, preta, de intensidade clara, média e escura. No caso dos efluentes que não permitiram reutilização direta foi proposto algumas alternativas de pré-tratamento para viabilizar o seu reuso. Em sua conclusão, FREITAS (2002) coloca que os efluentes gerados nas diversas fases no processo têxtil estudado apresentam teores de contaminantes distintos, e variáveis, característicos a cada tipo de preparação e tingimento, dificultando o seu reuso direto. FREITAS (2002) a princípio propõem o reaproveitamento dos efluentes baseando-se na individualização das correntes de efluentes de cada fase, de todas as etapas do processo. Neste estudo FREITAS (2002) verificou que a recuperação de energia pode ser possível na maioria dos

casos; quanto ao reuso dos efluentes de forma direta, existem algumas restrições e, de forma indireta, o reuso dependerá de tratamentos prévios, utilizando-se processos adsorptivos e de separação por membranas, que em muitos casos são de difícil viabilidade econômica. Através dos resultados obtidos, FREITAS (2002) concluiu que há a possibilidade de reuso de forma direta da aproximadamente 37,17% e indireta de 61,05%, para os efluentes selecionados nas tonalidades de cores estudadas em seu trabalho.

- PEARCE *et al.* (2003), investigaram a remoção da cor de águas correntes dos efluentes têxteis utilizando bactérias, demonstrando o grande potencial deste tipo de tratamento na remoção de corantes Azo, presentes no efluente têxtil. Eles relatam que, para baixas condições anaeróbicas, neste sistema, podem alcançar remoção total da cor com curto tempo de exposição.
- CARNEIRO *et al.* (2004), avaliaram a remoção de cor e a degradação do corante reativo por meio de um eletrodo macro-filme de TiO_2 , após 20 minutos. Utilizando fotoeletrocatalise com um potencial de 1,0 V em baixa concentração de tintura e o resultado foi a remoção da cor de 100%. Observou-se, ainda, que os melhores meios para remoção do NaCl do banho foram em pH >10 e o Na_2SO_4 em pH 6.
- FORGACS *et al.* (2004) apresentam em seu trabalho os vários métodos de remoção dos corantes sintéticos de efluentes têxteis. Segundo eles, os corantes sintéticos apresentam uma diversidade estrutural considerável. Por este motivo, os tratamentos de efluentes tradicionais provaram ser notadamente ineficazes na remoção dos corantes sintéticos dos efluentes líquidos, devido à estabilidade química destes poluentes. No mesmo estudo ainda foram observadas algumas tendências, como o papel decisivo da aplicação da microbiologia nas tecnologias futuras, técnicas estas que utilizam decomposição de microbiologia e substâncias químicas ou tratamentos físicos para aumentar a eficácia da decomposição microbiológica, além dos microorganismos geneticamente criados, que podem realizar degradação de corantes sintéticos que persistem sob condições normais. No habitat natural, comunidades de microbial/macrobial levam a cabo a biodegradação.
- TEIXEIRA (2009) teve como objetivo o tratamento do efluente têxtil com processo fotoquímico de $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$, analisando a remoção da cor com a variação do pH, e

depois reaproveitando a água para reciclagem no processo, analisando o projeto à luz das leis ambientais.

Estas são as sínteses de alguns dos trabalhos publicados nos últimos anos sobre a remoção de cor no tratamento de efluentes, e isso torna-se cada vez mais necessário, visto que a cor no efluente têxtil representa um sério problema ambiental e tecnológico.

Para CORREIA (1995), antes de se aplicar tecnologias de diminuição de poluição, é necessário identificar os tipos de águas vindas dos diversos processos empregados pela indústria, por isso faremos a caracterização dos efluentes têxteis.

2.2.8 – CARACTERIZAÇÃO DOS EFLUENTES TÊXTEIS

Apesar de o Brasil ser um dos importantes produtores mundial de artigos têxteis, a cadeia têxtil não é homogênea em suas tecnologias, temos desde plantas altamente automatizadas até outras totalmente artesanais. Sendo que, há algo que as une de modo incontornável, todas elas se caracterizam como grandes consumidoras de água, corantes, e produtos químicos auxiliares, gerando um grande volume de efluentes líquidos contendo quantidades variadas de contaminantes dentre os quais se destacam os corantes (CAMMAROTA & COELHO, 2001),

Os efluentes da indústria têxtil são caracterizados pela alta carga de matéria orgânica, que diretamente está relacionada à demanda biológica de oxigênio (DBO), como amido, dextrinas, gomas, graxas, pectinas, alcoóis, ácido acético, corantes, sabões, detergentes e matéria inorgânica, como hidróxido de sódio, carbonato, sulfato e cloreto.

Os principais problemas referentes a esse tipo de efluente são: elevado pH, coloração, presença de sal, sulfetos, cromo, elevado teor de sólidos em suspensão, dureza das águas de lavagem, elevada salinidade e elevada DQO e DBO.

Cada etapa de produção é responsável por parte dos problemas citados que variam muito de indústria para indústria, em função de modificações no processo industrial e/ou medidas internas para minimização da carga poluidora. A tabela 15 abaixo caracteriza os consumos e os tipos de resíduos líquidos provenientes da indústria têxtil.

TABELA 15: CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE TÊXTIL:

	Setores da Indústria					
Parâmetros	Unid	Fios Acrílicos e Nylon	Fios Acrílicos, Nylon e Algodão	Malhas 100% algodão e com baixo % sintético	Tecido plano 100% Algodão	Tecido plano viscose e acetato
pH		3-5	8-11	9-11	8-11	8-10
DBO	mg/L	100-200	400-600	400-600	800-1500	100-300
DQO	mg/L	500-800	800-1200	800-1200	800-1200	300-600
Dureza Total	CaCO ₃	40-100	40-50	40-60	50-100	30-70
Óleos/graxas	mg/L	15-70	20-120	20-70	10-80	40-150
Sólidos Suspensos	mg/L	40-100	100-200	200-300	200-300	100-200
Sólidos Sedimentáveis	mg/L	1-10	1-10	0,1-5	0,1-5	0,1-2
Sólidos Totais	mg/L	2000-3000	2000-3000	2500-4000	2000-3000	3000-4500
Cor mg	pt/CO	200-300	300-400	500-700	200-400	500-7000
Condutividade	μS/cm	1200-1600	1500-2500	1500-3000	1500-4000	1500-4000

Fonte: HART (1994)

Através desta tabela observa-se que os despejos de indústrias têxteis são tóxicos à vida aquática, pois, diminuem o conteúdo de oxigênio dissolvido e modificam as propriedades e características físicas dos cursos d'água (BITENCOURT, 2002).

Abaixo, as Tabela 16 a 18, alistem algumas normas técnicas de regularização do Artigo 18 do decreto 8468 de 08/09/1976, com os principais parâmetros analisados.

TABELA 16: NORMAS TÉCNICAS

PARÂMETROS	LIMITES MÁXIMOS
pH	5,0 a 9,0
Temperatura	< 40 °C
DBO	5 dias a 20 °C mg/L
IO	< 5 mg/l
Turbidez	< 40 UNT
TOC	< 100 mg/l

Fonte: PEREIRA (2007)

TABELA 17: CARACTERÍSTICAS DO EFLUENTE TÊXTIL

Gênero	Têxtil
Tipo	Algodão
Unidade de produção (t)	1
Consumo específico de água (m ³ /unid)	120-750
Carga específica de DBO (Kg/unid)	150
Concentração de DBO (mg/L)	200-1500
Carga específica de SS (Kg/unid)	70
Carga específica de SDT (Kg/unid)	200

Fonte: CETESB (1992)

Segundo TEIXEIRA (2009) os agentes de engomagem, tensoativos, auxiliares de tingimento e ácidos orgânicos perfazem cerca de 90% sobre o DQO total, conforme expõem a tabela 18 abaixo:

TABELA 18: CONTRIBUIÇÃO DOS AUXILIARES TÊXTEIS NO DQO DO EFLUENTE

Grupo de produtos auxiliares	% sobre DQO total
Agente de engomagem	57
Molhantes de Detergente	18
Auxiliares de Tingimento	7
Ácidos orgânicos	7
Preparação da fiação	5
Redutores	3
Corantes e branqueadores ópticos	1
Outros	2

Fonte: CPRH, (2006)

CORREIA (1994) em seu trabalho caracterizou o efluente por processo de tingimento isso inclui os processos de desengomagem, purga, alvejamento, mercerização, tingimento e acabamento. Ele coloca que a composição química das correntes de efluente têxtil está sujeita a constantes mudanças em sua composição devido à diversidade dos processos têxteis e a grande gama de produtos químicos empregados.

Abaixo temos os dados obtidos de cada etapa do processo de beneficiamento

TABELA 19: CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE EM CADA ETAPA DO TINGIMENTO

FIBRA	PROCESSO	pH	DBO (mg/L)	S.T.	Uso de água (L/Kg)
Algodão	Desengomagem	-	1700 – 5200	16000 – 32000	3 – 9
	Purga	10 – 13	50 – 2900	7600 – 17400	26 -43
	Alvejamento	8,5 – 9,6	90 – 1700	2300 – 14400	3 -124
	Mercerização	5,5 = 9,5	45 – 65	600 – 1900	232 – 308
	Tingimento	5 – 10	11 – 1800	500 - 14100	8 – 300

FONTE CORREIA (1994)

Os efluentes gerados destes processos possuem em sua composição a heterogeneidade do processamento têxtil e normalmente apresenta as seguintes características (BITTENCOURT, 2002):

- Cor intensa, devido à grande quantidade de corantes não fixados;
- Altas temperaturas, devido ao emprego destas em algumas etapas do processamento; Vale destacar que as cores fortes e as altas temperaturas são as características visuais e sensoriais facilmente identificadas e notórias.
- Concentração de matéria orgânica equivalente a de esgoto doméstico
- Grande quantidade de DQO refratária devido a corantes de alta massa molecular;
- Altas concentrações de AOX (Organohalogenados Adsorvíveis), sulfitos e metais pesados encontrados nos alvejantes e halógenos, enxofre ou metal pesado que se encontram presentes muitas vezes nos corantes.

Entre os produtos que conferem elevada carga de poluentes têxteis aos efluentes, destacam-se: ácidos, óleos, sais, proteínas, substâncias gordurosas, surfactantes, produtos

auxiliares no tingimento e os corantes. Além desses produtos, a temperatura elevada e pH dos banhos também conferem alto potencial poluidor aos efluentes da indústria têxtil (SILVA, 2003).

Com esta breve análise de um efluente industrial têxtil, conclui-se que a maior parte da carga contaminante é constituída por impurezas inerentes à matéria prima. Neste contexto, os produtos utilizados para facilitar os processos de fiação e tecelagem, auxiliares e corantes eliminados durante as diferentes etapas de acabamento e sucessivas lavagens são os principais responsáveis pelas características de impactos ambientais presentes no efluente.

Outras variáveis ainda a serem observadas são as variações diárias e horárias, FREITAS (2002), em suas conclusões, coloca que os efluentes gerados nas diversas fases no processo têxtil estudado apresentam teores de contaminantes distintos, e variáveis, característicos a cada tipo de preparação e tingimento. Nas conclusões de CORREIA (1994) ele observa que devido a esses mesmos fatores é difícil determinar qual seria o tratamento ideal para ser aplicado, porém é claramente possível se aplicar técnicas de tratamento em água de efluentes individualmente nos processos geradores de efluentes líquidos.

TOXICIDADE EM EFLUENTES TÊXTEIS.

A toxicidade de maneira global pode ser definida como um atributo próprio ao agente químico que, em determinadas concentrações, produz efeitos danosos a um organismo quando a ele exposto por um tempo. (BALAN, 2002).

As características tóxicas presentes nos efluentes industriais têxteis devem-se ao uso de corantes baseados em metais pesados, enxofre e grupamentos azóicos, além de evidentemente, de outros compostos, como os fenóis, solventes aromáticos, metileno, cloretos, entre outros.

No entanto, as fontes de toxicidade aquática dos efluentes têxteis podem ser difíceis de serem identificadas devido à falta de informações referentes à exata composição ou da toxicidade de muitos corantes e auxiliares químicos conhecidos como contribuintes

para a toxicidade aquática dos efluentes têxteis. Dentre alguns agentes pode-se citar: Sais, tensoativos, metais, substâncias orgânicas tóxicas, biocidas e ânions tóxicos (ABRAÃO E SILVA, 2002).

Apesar dos corantes não apresentarem toxicidade aguda elevada, a associação desses compostos aos agentes redutores e fixadores, durante o processo de tingimento, faz com que o efluente bruto apresente toxicidade significativa frente aos organismos testes.

Os testes para a verificação e mensuração da toxicidade presente em efluentes industriais, são em sua maior parte desenvolvidos através da comparação e análise do comportamento de determinados organismos vivos (animais e vegetais) quando expostos por um período a uma amostra de efluente tratado ou bruto e comparado posteriormente com um padrão negativo ideal (PINHEIRO *et al.*, 2004).

O controle da toxicidade dos efluentes líquidos deve ser exercido de forma a evitar a toxicidade crônica nos organismos aquáticos (BALAN, 1999). Para determinar a toxicidade de um efluente é necessário coletar amostra(s) representativa(s) dos processos industriais e submetê-las aos testes de toxicidade a nível agudo e/ou crônico.

Normalmente o primeiro teste a ser aplicado é com *Daphnia similis*, com duração de 48 horas, para avaliar a toxicidade aguda, por tratar-se de um teste rápido e sendo a espécie estritamente sensível a poluição. Os resultados dos testes de toxicidade aguda são expressos em *CE50* e/ou *CL50* – Concentração Efetiva ou Letal Média, isto é, a concentração do efluente que causa efeito agudo, por exemplo, imobilidade ou letalidade a 50% dos organismos testes, num determinado período de exposição.

METAIS PESADOS NO EFLUENTE TÊXTIL.

A presença de metais pesados em efluentes têxteis é motivada pelas moléculas estruturais de corante e pelos produtos auxiliares utilizados no processo de tingimento ou acabamento.

Neste contexto, deve-se também ponderar que as matérias-primas como fibras, fios e tecidos, muitas vezes podem conter resíduos de metais.

No caso dos corantes, existe uma classificação à parte, que é a de corantes metalizados e não metalizados.

A tabela 20 abaixo apresenta a relação de alguns metais pesados com a fonte de contaminação no processo fabril.

TABELA 20: METAIS PESADOS NO EFLUENTE TÊXTIL E SUAS FONTES DE CONTAMINAÇÃO

Fontes de Contaminação	Metais
Fibras e água industrial	Arsênio
Impureza nos sais	Cádmio
Corantes	Cromo, Cobalto e Níquel
Corante, água industrial e fibras	Cobre
Corante e tubulação	Chumbo
Produtos do acabamento final	Estanho
Corante e impurezas químicas	Mercúrio
Fibras	Titânio
Corante, impurezas químicas, água industrial e tubulação	Zinco

Fonte CPRH (2006)

No processo biológico de tratamento de efluentes os metais pesados podem inibir a ação dos microorganismos e interferir diretamente no desempenho do processo. Outro cuidado especial deve ser dado quando uma indústria têxtil descarrega seus resíduos aquosos na rede pública de esgotos. Sendo necessária uma avaliação dos resíduos, especificamente, quanto ao conteúdo de corantes no efluente, que podem afetar a rede e a planta pública de tratamento de esgoto. Os efeitos danosos podem aparecer no tratamento

de esgotos aeróbicos, pois, certos tipos de corantes podem afetar, em princípio, os microorganismos, impedindo-os de biodegradar os componentes normais existentes (BALAN, 1999).

Feito a caracterização do efluente, a próxima etapa que faz-se necessário conhecer é a eletroflotação que vai ser percorrida a seguir.

2.3 – ELETROFLOTAÇÃO

Muitos dos processos utilizados em estações de tratamento de efluentes envolvem a adição de agentes coagulantes e floculantes, como, por exemplo, polieletrólitos e eletrólitos como polímeros, sais de ferro e de alumínio.

Tratamentos com polímeros podem causar impactos devido à toxicidade de algumas das espécies químicas usadas, podendo, mesmo em baixas concentrações, romper o equilíbrio do meio ambiente em relação à biota do corpo receptor.

Os coagulantes à base de sulfatos elevam a concentração desse íon no efluente final, podendo alterar a qualidade da água do corpo receptor. Excesso de sulfato no leito dos rios poderá precipitar o cálcio presente no sedimento e na água ou participar de processos de oxirredução na geração de sulfetos em condições anaeróbias (CRESPILHO & REZENDE, 2004).

Vários são os nomes associados ao processo eletrolítico. A eletrofloculação é também chamada de eletrocoagulação e eletroflotação (CRESPILHO & REZENDE, 2004).

Especificamente a eletroflotação trata-se de um processo eletroquímico baseado na geração de bolhas de gás (geralmente, O_2 ou H_2), via eletrólise das moléculas de água, independente do material utilizado, estas bolhas são responsáveis pelo transporte das partículas coaguladas até a superfície e, com isto, substituem os aditivos floculantes, eliminando todos os resíduos poluidores do processo. Há a formação de uma camada de espuma, cuja espessura aumenta com o decorrer do tratamento, que é chamada de sobrenadante, ou seja, a eletrofloculação é a combinação dos processos de eletrocoagulação e eletroflotação. (RUBACH; SAUR, 1997).

A tecnologia de tratamento físico-químico pelo processo eletrolítico é uma alternativa promissora para o atendimento à legislação ambiental. Esta alternativa possibilita ampliar a capacidade de tratamento dos sistemas físico-químicos tradicionais, pois utiliza os mesmos fundamentos básicos de coagulação-floculação e adicionalmente disponibiliza elementos que potencializam o método pela geração de oxigênio e hidrogênio nas reações de eletrólise, formando um fluxo ascendente de micro-bolhas que interagem com todo efluente presente no interior do reator eletrolítico, sendo este, submetido

intensamente às reações de oxidação e redução, facilitando a floculação e a flotação da carga poluidora existente, aumentando a eficiência do processo de tratamento (SILVA, 2002).

A técnica eletroquímica utilizada para o tratamento de efluentes consiste na eletrólise do efluente. Durante a eletrólise ocorre a transferência de elétrons entre o poluente e o eletrodo. Através desta transferência ocorrem reações do tipo redox que transformam ou destroem os compostos poluentes mineralizando-os ou tornando-os mais biodegradáveis. A eletrólise pode ser conduzida para promover reações catódicas, no caso de remoção de metais, ou para promover reações anódicas, favorecendo então oxidação de compostos orgânicos.

A técnica de eletroflotação tem despertado bastante interesse, devido à sua simplicidade de operação e aplicação em diversos tipos de efluentes e água potável dentre as quais: descontaminação de águas subterrâneas (POON, 1997), tratamento de efluentes de indústria de processamento de coco (CRESPILO *et al.*, 2004), petroquímica HOSNY (1996) e (SANTOS *et al.*, 2006), indústria de óleo (MOSTEFA & TIR, 2004; SANTOS *et al.*, 2006), lavanderias (GE *et al.*, 2004) e remoção de íon fluoreto (SHEN *et al.* 2003), indústria de alimentos e remoção de polifenóis (CRESPILO & REZENDE, 2004); tratamentos de efluentes de curtumes (MURUGANANTHAN *et al.*, 2004 a), tratamento de efluentes na indústria de papel (FERREIRA, 2006) e tratamento de efluente na indústria têxtil (PEREIRA, 2007), estes três últimos serviram de base para este trabalho atual.

Alguns resultados obtidos foram os seguintes:

CRESPILO *et al.* (2004), estudaram a aplicabilidade da eletroflotação para o tratamento de efluentes para indústria de processamento de coco, avaliando a redução nos valores de turbidez, cor, sólidos totais, Carbono Orgânico Total (COT), metais, óleos e graxas, fixando as variáveis: temperatura do efluente bruto, diferença de potencial aplicada, tempo de tratamento, vazão de entrada, volume de efluente tratado e tempo de retenção hidráulica. As reduções nos valores de cor foram superiores a 98% para experimentos realizados a valores de pH do efluente de 5,94 e 7,36 em vários comprimentos de onda. Os valores de turbidez foram reduzidos acima de 93%, óleos e graxas acima de 96% e sólidos totais acima de 60% para todos os valores de pH estudados.

A quantidade de sólidos totais ficou em torno de 3000 mg L^{-1} para todos os tipos de efluente tratados. Esses resultados devem-se, em grande parte, à presença de sais dissolvidos que dificilmente são removidos. Esse fato pode ser confirmado pela determinação da condutividade elétrica dos efluentes tratados, que em todos os casos ficou em torno de $4,3 \text{ mS cm}^{-1}$, o mesmo valor obtido para o Efluente Bruto.

No caso do parâmetro COT as remoções foram maiores quando foi utilizada inversão de polaridade entre os eletrodos a cada 2 minutos, alcançando reduções acima de 68%.

HOSNY (1996), também estudou amostras de emulsão óleo (derivado de petróleo) e água, verificando que o consumo de energia elétrica diminuiu significativamente pela adição de NaCl, devido ao aumento da condutividade do efluente durante o processo de eletroflotação. Os testes foram realizados utilizando eletrodos de aço inoxidável, para processo contínuo, e em batelada, com e sem auxiliar de floculação.

Estudos realizados por SANTOS *et al.* (2006), em amostras obtidas em uma caixa de separação de óleo de uma planta de tratamento da Petrobrás, mostraram o efeito da densidade de corrente e da temperatura em relação ao tempo de eletrólise para redução nas concentrações da DQO, utilizando eletrodos de Titânio revestidos com óxidos de Titânio e Rutênio.

GE *et al.* (2004), estudaram efluentes de lavanderia através de um processo bipolar de eletrocoagulação/eletroflotação; foram utilizadas três placas de alumínio (cátodo) localizadas entre duas placas de titânio (ânodo). Na avaliação da eficiência do processo para redução nas concentrações em função do pH inicial do efluente para os parâmetros: DQO, MBAS (Methylene Blue Active Substances), p-fosfato e turbidez. Os resultados estão representados na Figura 10, a seguir:

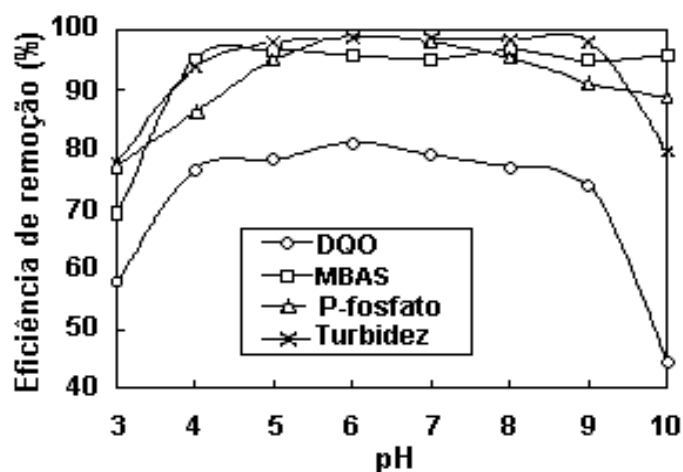


Figura 10 – Eficiência de remoção de DQO, MBAS, p-fosfato e turbidez, em função do pH.
Fonte: GE *et al*, (2004).

SHEN *et al.* (2003) avaliaram a redução nas concentrações de fluoretos em efluente industrial utilizando um processo combinado de eletrocoagulação/eletroflotação, reduzindo as concentrações de 15 mg L^{-1} para valores menores que 2 mg L^{-1} , utilizando eletrodos de alumínio.

Nesse estudo foi avaliado o efeito da variação de pH inicial nas concentrações finais dos íons fluoreto e no pH final na unidade de coagulação.

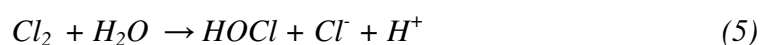
MURUGANANTHAN *et al.* (2004 a), realizaram estudos tratando efluentes de curtume por eletroflotação em condições de pH alcalino, utilizando eletrodos de ferro, alumínio, grafite e titânio revestido com óxidos de Ir/Ta/Ru. A técnica da eletroflotação mostrou ser mais efetiva comparada à remoção de poluentes por coagulação convencional. Sólidos suspensos, cromo e sulfetos apresentaram remoção em suas concentrações acima de 95% usando eletrodos solúveis. Este processo mostrou uma eficiência 20% maior para remoção de sólidos suspensos, DQO e DBO em comparação com os processos convencionais de coagulação e sedimentação.

Comparativamente os resultados obtidos para eletrodos de ferro e alumínio apresentaram remoções superiores aos eletrodos insolúveis de Titânio e grafite.

MURUGANANTHAN *et al.* (2004), em outro estudo verificaram a remoção das várias espécies de enxofre: sulfatos, sulfetos e sulfitos de efluente de curtume e também de

amostras sintéticas utilizando eletrodos de ferro, alumínio e titânio. Os eletrodos de alumínio e ferro foram mais efetivos para remoção de espécies de enxofre que os eletrodos de titânio.

CHEN (2004) no seu trabalho conseguiu reduzir as bactérias patogênicas a números próximos de 100%. A remoção de bactérias através da eletroflotação ocorre por meio de uma reação secundária no cátodo, devido à presença de íons cloreto, com a formação do gás cloro. As principais reações a seguir:



FERREIRA (2006) fez um cálculo de custo para a operação, calculou também a velocidade de ascensão das bolhas na eletroflotação, e mostrou que seria necessário um estudo mais apurado sobre a geração de gases, pois em escala industrial, isto pode representar um risco substancial.

PEREIRA (2007) em seu trabalho mostrou uma grande redução dos principais parâmetros como turbidez, DQO, DBO e Sólidos Totais do efluente têxtil, mostrando que esse processo, com uma investigação cabal, pode ser viável numa tinturaria.

Este trabalho tem como objetivo conhecer melhor o processo e avaliar outro parâmetro exigido nas normas da CETESB, que é a coloração do efluente.

2.3.1 – FUNDAMENTOS DO PROCESSO

Segundo FERREIRA (2006) a eletroflotação tecnicamente, é um sistema em que há a aplicação de uma diferença de potencial (d.d.p.) entre um conjunto de placas (eletrodos) dispostas paralelamente e intercaladas, em arranjo denominado de colméia, que se encontram completamente submersas no efluente a ser tratado. Com a aplicação da d.d.p., ocorre a oxidação dos eletrodos do anodo, havendo a liberação dos íons metálicos, que se hidrolisam e formam espécies intermediárias que variam conforme o pH da solução.

Por fim, há a formação do hidróxido de alumínio, no caso do eletrodo ser de alumínio ou hidróxido de ferro (II) ou (III) caso o eletrodo seja de ferro.

A seguir serão apresentados:

- Os principais tipos de reatores utilizados na eletroflotação,
- Os princípios da técnica da flotação
- As principais reações químicas
- Os fatores que influenciam o processo

2.3.1.1 – REATOR

Para se obter as melhores condições operacionais de um reator de bancada são necessários estudos, levantando as variáveis pertinentes ao funcionamento do reator, bem como da caracterização do efluente, sabendo que esta caracterização do efluente é um pré-requisito para um tratamento estratégico aceitável para efluentes industriais.

TIPOS DE REATORES

Dentre as várias geometrias possíveis para a configuração dos eletrodos, as mais utilizadas são: *monopolares e bipolares*.

ARRANJO MONOPOLAR:

Uma melhora no desempenho pode ser alcançada utilizando-se células de eletrocoagulação com eletrodos monopolares com conexões em série como em paralelo.

EM SÉRIE

O arranjo de eletrodos monopolares com células em série é eletricamente similar a uma célula única com muitos eletrodos e interconexões (MOLLAH *et al.*, 2004).

Na Figura 11 ao lado dos desenhos representativos dos arranjos dos eletrodos, seguem os respectivos diagramas elétricos.

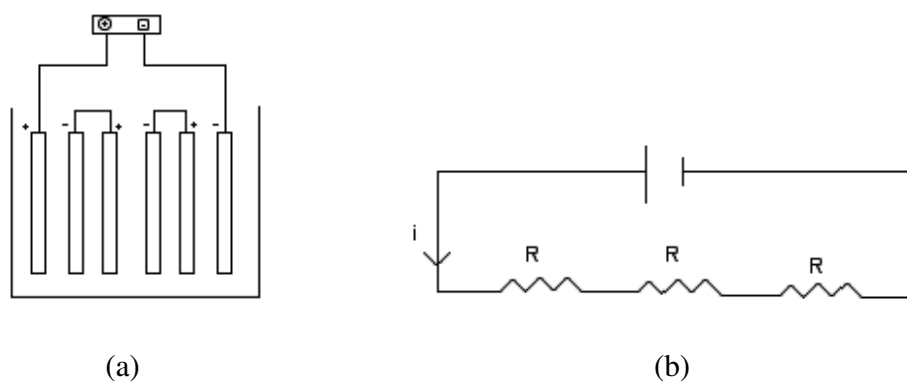


Figura 11: Desenhos ilustrativos dos arranjos dos eletrodos (a) Reator em batelada com eletrodos monopolares conectados em série. (b) Diagrama elétrico do arranjo monopolar em série. Fonte: HEMKEMEIER (2001) e MOLLAH *et al.* (2004).

Para esse tipo de reator é requerido o uso de eletrodos com grandes áreas superficiais. Segundo HEMKEMEIER (2001) e MOLLAH *et al.* (2004), no arranjo em série, existe uma resistência maior do que no arranjo em paralelo, por isso, é necessária uma maior diferença de potencial para uma mesma corrente fluir em todos os eletrodos.

EM PARALELO:

Este arranjo consiste essencialmente em pares de placas de metais condutores, localizados entre dois eletrodos paralelos e uma fonte de alimentação conforme pode-se observar na Figura 12. Em um arranjo monopolar cada par de “eletrodos de sacrifício” está internamente conectado um ao outro, e sem interconexão com os eletrodos externos.

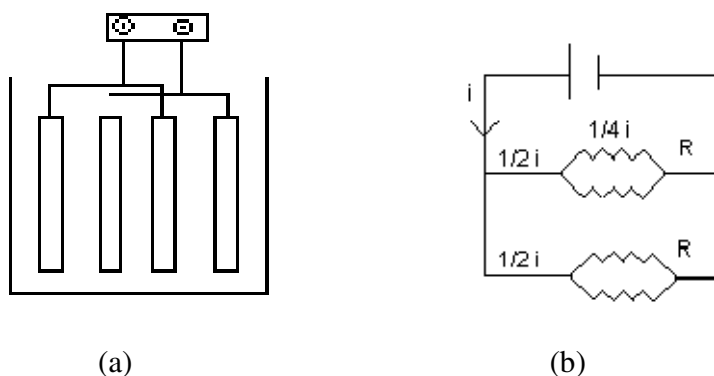


Figura 12: Desenhos ilustrativos dos arranjos dos eletrodos (a) Reator em batelada com eletrodos monopolares conectados em paralelo. (b) Diagrama elétrico do arranjo monopolar em paralelo. Fonte: HEMKEMEIER (2001) e MOLLAH *et al.* (2004).

No arranjo em paralelo, a corrente elétrica é dividida entre as placas, e o conjunto dos eletrodos de sacrifício se conecta internamente com cada um, sem que haja contato com eletrodos de fora. Conforme pode ser observado na Figura 13 abaixo:

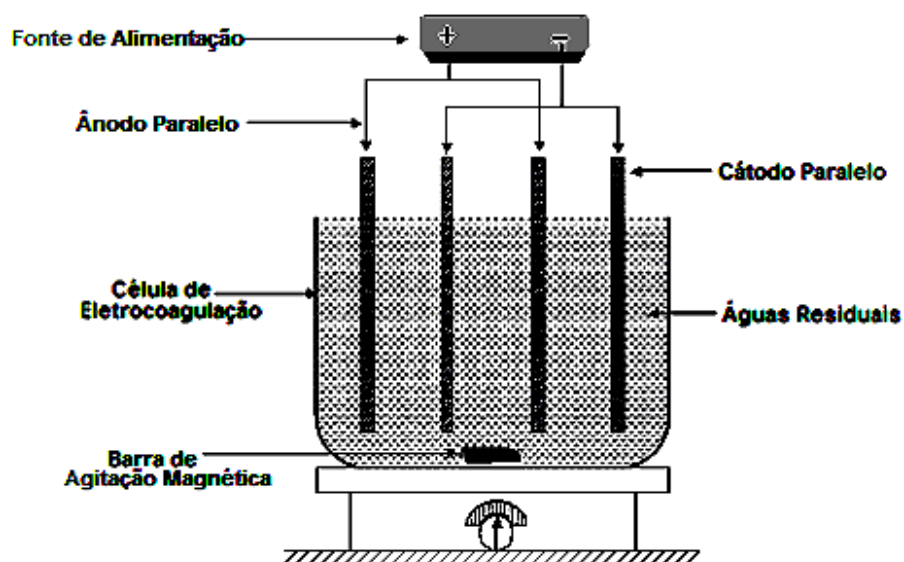


Figura 13 – Desenho esquemático de um reator de eletroflotação em escala de bancada com eletrodos monopolares conectados em paralelo. Fonte: (MOLLAH *et al.*, 2004).

ARRANJO BIPOLAR:

No reator bipolar, temos os eletrodos de sacrifício colocados entre os dois eletrodos em paralelo (chamados de placas condutoras), sendo que só os dois eletrodos monopolares são conectados à fonte de energia elétrica, sem interconexão elétrica entre os eletrodos de sacrifício. Quando a corrente elétrica atravessa os dois eletrodos, os lados neutros da placa adquirem carga oposta à do eletrodo monopolar (CRESPILHO & REZENDE, 2004).

Este arranjo possui a vantagem de ser mais fácil de construir e de fazer a manutenção, pois as conexões elétricas são feitas somente nos dois eletrodos de alimentação.

A eletroflotação pode também ser realizada em fluxo contínuo. A Figura 14 mostra um reator desse tipo utilizado para remoção de íons fluoreto de efluente industrial.

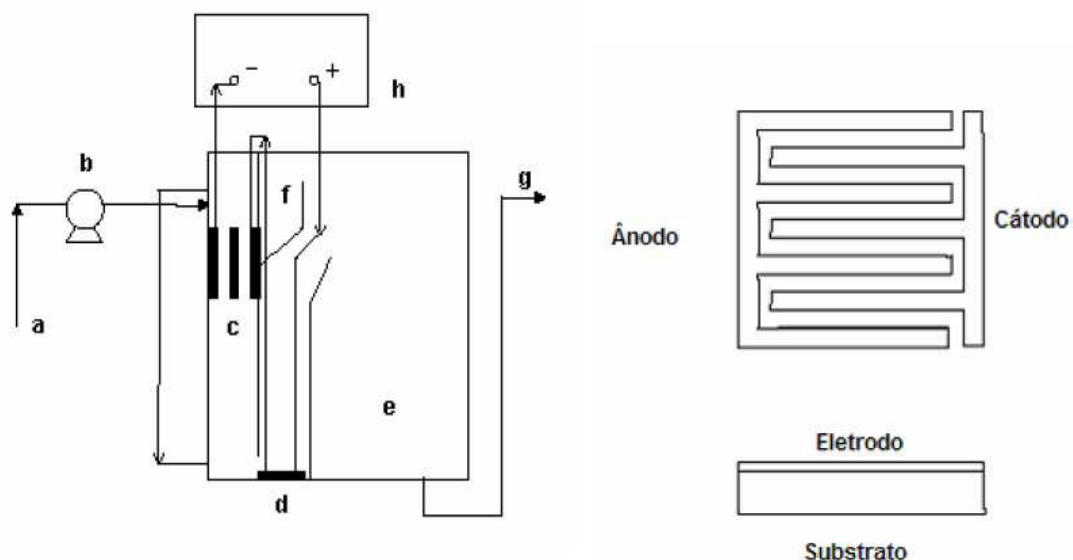


Figura 14 – Modelo esquemático de um reator eletroquímico de fluxo contínuo (a) afluente; (b) bomba; (c) célula de eletro-coagulação; (d) célula de eletro-flotação; (e) separador; (f) coletor de lodo; (g) efluente; (h) Fonte de alimentação. Fonte: SHEN *et al.* (2003).

2.3.1.2 – FLOTAÇÃO

A flotação depende muito das características superficiais/interfaciais do sistema partículas e bolhas. A flotação de partículas em suspensão é um fenômeno cinético composto por diversas etapas (ou micro-fenômenos) que estão ilustrados na Figura 15:

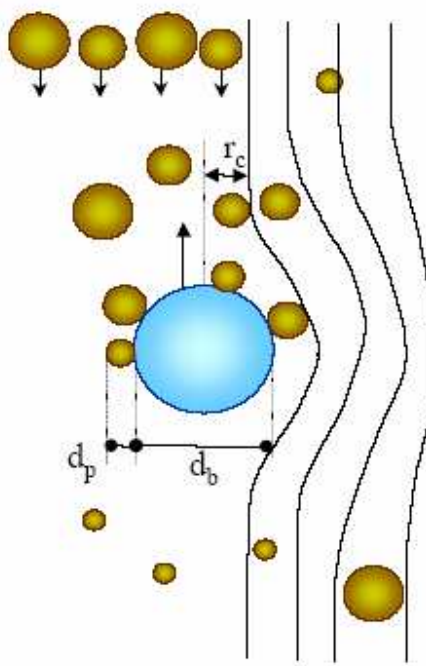


Figura 15: Fenômeno de “captura” (colisão + adesão) de partículas de diâmetro (d_p) por bolhas de diâmetro (d_b) dentro de um raio crítico (r_c).

Fonte: Torem, Maurício Leonardo – Flotação Aplicada a Remoção de Metais Pesados

Assim, associando-se probabilidades a cada uma dessas etapas, obtém-se um modelo probabilístico, microcinético desta tecnologia. Conforme exposto por RUBIO *et al.* (2002) a probabilidade de que a flotação ocorra é dada por:

$$Pf = Pc. Pa \quad (7)$$

Onde:

P_f = probabilidade de flotação,

P_c = probabilidade de colisão;

P_a = probabilidade de adesão,

Analisando cada uma delas:

PROBABILIDADE DE COLISÃO – PC

Não existe uma teoria quantitativa que inclua ao mesmo tempo a influência da concentração de sólidos, distribuição de tamanho de bolhas e partículas sob condições de regime laminar ou turbulento.

Basicamente controlado pela hidrodinâmica do sistema a probabilidade de colisão é, portanto, função do movimento relativo de partículas e bolhas, controlado pelos seguintes fatores:

- *Força de Cisalhamento (F_d)* obtida devido ao movimento relativo entre o líquido e as partículas;
- *Força de Atração Gravitacional (F_g)* com maior importância para partículas densas, de tamanho intermediário e partículas grossas;
- inércia e/ou momentum das partículas (partículas grossas);
- difusão ou movimento browniano (partículas ultrafinas).

PROBABILIDADE DE ADESÃO – PA

O processo de adesão envolve as seguintes etapas:

- **INDUÇÃO**: envolve o tempo que se leva após a colisão, onde é localizado o ponto que ocorre a adesão propriamente dita. O tempo de indução (t_i) é da ordem dos

milissegundos e depende do ângulo de contato θ , das forças interfaciais e da energia de colisão e inclui o adelgaçamento inicial do filme ou película líquida.

• **RUPTURA DO FILME OU PELÍCULA LÍQUIDA:** onde o tempo de ruptura (t_r), é da ordem de microssegundos e depende basicamente do ângulo de contato.

• **RESTAURAÇÃO DO EQUILÍBRIO** (Deslocamento do filme até o ponto de equilíbrio): O tempo de deslocamento (t_d), do filme é da ordem de milissegundos e depende do ângulo de contato θ , do tipo de tensoativos e da rugosidade (*roughness*) das partículas.

O fenômeno de captura é chamado de *coalescência*, onde ocorre o aumento do tamanho das bolhas por incorporação das menores, geralmente quando duas delas colidem e passam a formar uma única bolha.

Segundo PEREIRA (2007) a coalescência ocorre devido à presença de bolhas com diferentes diâmetros, quando as maiores incorporam nas menores pela maior velocidade de ascensão das primeiras; podem ocorrer também por agitação muito violenta, mas isto prejudica a flotação do efluente; e pela presença de grandes superfícies em contato com as fases líquido/gás, pois nelas depositam-se as micro-bolhas que coalescem facilmente.

Em decorrência do potencial aplicado formam-se micro bolhas de hidrogênio no cátodo. As partículas são carregadas pelas micro bolhas, e ao chegar à superfície do reator, a suspensão (*flotado*) pode ser removida por processos convencionais, tais como: raspagem, sucção, etc. (CRESPILHO & REZENDE, 2004).

Sabendo que a “captura” aumenta com a diminuição do tamanho de bolhas e com o aumento do tamanho de partículas, ela depende dos seguintes fatores:

- Fluxo da área superficial de bolhas disponível (*lifting power*);
- Parâmetros hidrodinâmicos:
 - Peso no campo gravitacional,
 - Pressão hidrostática

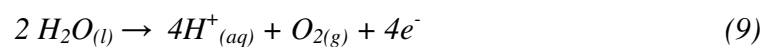
- Capilaridade,
- Tensão,
- Compressão e
- Forças de cisalhamento
- Fatores termodinâmicos associados à interação hidrofóbica entre bolhas e partículas
- Fatores cinéticos como a energia mínima de colisão para destruir a camada líquida de água que antecede a adesão.

2.3.1.3 – REAÇÕES QUÍMICAS

Quando uma d.d.p. é aplicada, por uma fonte externa, o material do ânodo é oxidado, da mesma forma o cátodo estará sujeito à redução ou deposição redutiva do elemento metálico.

As principais reações com o metal M estão resumidas a seguir (MOLLAH *et al.*, 2004):

No ânodo:



No cátodo:



A eletroflotação trata-se de um processo eletroquímico baseado na geração de bolhas de gás (geralmente, O₂ ou H₂), as quais substituem os aditivos flocculantes.

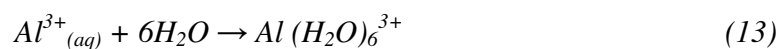
Como neste trabalho utilizou-se Alumínio e Ferro como material dos eletrodos, abaixo está apresentado as principais reações destes dois materiais

REAÇÕES DO ALUMÍNIO

Oxidação do Al sólido (reação anódica):



Solvatação do cátion (reação catódica):



Formação do agente coagulante:



Reações secundárias:



Através da reação secundaria (15) nota-se que vários complexos de alumínio podem ser formados, e sua presença confere uma característica gelatinosa ao meio. Esses complexos são responsáveis por formar coágulos maiores, os chamados flocos, fazem isso

por adsorverem-se às partículas e com isso conseguem remover os contaminantes. Porém, a estabilidade do hidróxido de alumínio depende do pH do meio. Conforme podemos observar na figura 16:

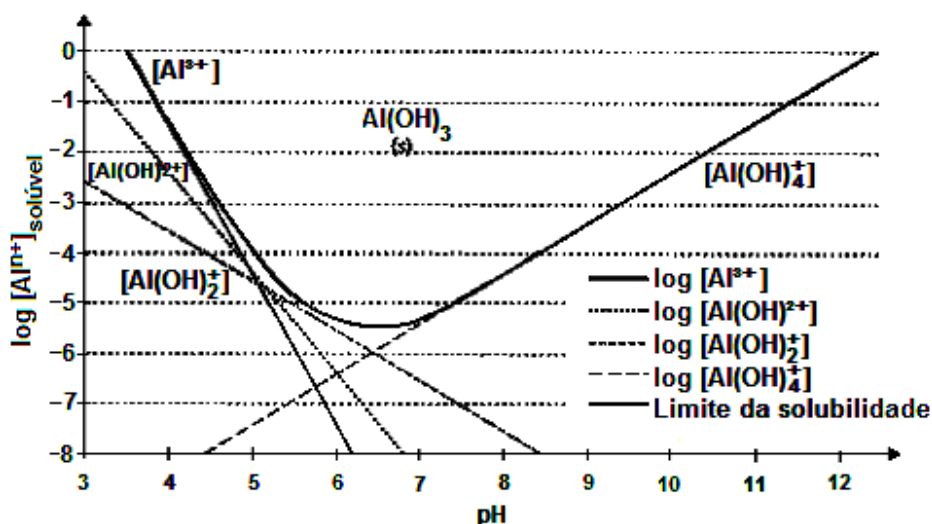


Figura 16: Diagrama de hidrólise do alumínio em função do pH (CRESPILO & REZENDE, 2004).

Conforme HOLT *et al.* (2002), o limite de solubilidade denota o equilíbrio termodinâmico que existe entre as espécies dominantes de alumínio em certo pH e o hidróxido de alumínio sólido.

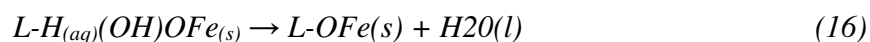
Observando o gráfico notamos que a solubilidade mínima ocorre no pH 6,3, ao passo que o pH da solução muda, tornando-se mais ácido ou mais básico a solubilidade aumenta. Entretanto, à medida que a concentração de alumínio aumenta, são formados alguns complexos polinucleares de alumínio e o $Al(OH)_3$ precipita.

REAÇÕES DO FERRO

Nos eletrodos de ferro, os íons férricos gerados pela oxidação eletroquímica podem formar íons monoméricos, $Fe(OH)_3$ e, complexos hidroxi-poliméricos, tais como: $Fe(H_2O)_6^{3+}$, $Fe(H_2O)_5(OH)^{2+}$, $Fe(H_2O)_4(OH)_2^{2+}$, $Fe(H_2O)_8(OH)_2^{4+}$ e $Fe(H_2O)_6(OH)_4^{4-}$.

dependendo do pH do meio aquoso. Esses compostos hidróxidos, poli-hidróxidos e poli-hidróxidos metálicos têm forte afinidade por partículas dispersas e também íons que causam coagulação. (MOLLAH *et al.* 2004)

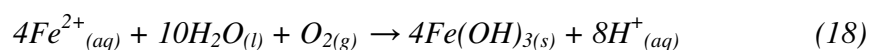
CRESPILHO & REZENDE (2004), mostra que os sólidos de $Fe(OH)_n$ formam uma suspensão gelatinosa que remove os poluentes do efluente por complexação ou atração eletrostática, seguida de coagulação. A forma mais estável de compostos férricos é o composto $R-FeO(OH)$, o qual pode formar complexos em que o poluente age como um ligante (L), de acordo com a equação:



Os principais mecanismos de reações para os eletrodos de ferro são apresentados por CRESPILHO & REZENDE (2004), e estão descritas a seguir:

Mecanismo 1

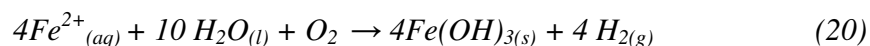
Ânodo:



Cátodo:

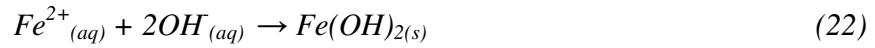


Reação Global:

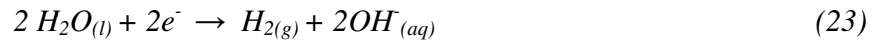


Mecanismo 2

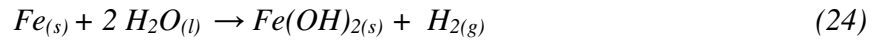
Ânodo:



Cátodo:



Reação Global:



Sob condições alcalinas, $Fe(OH)^{-}_6$ e $Fe(OH)^{-}_4$ podem estar presentes.

Os diagramas de solubilidade do Fe (II) e do Fe (III) constam na Figura 17:

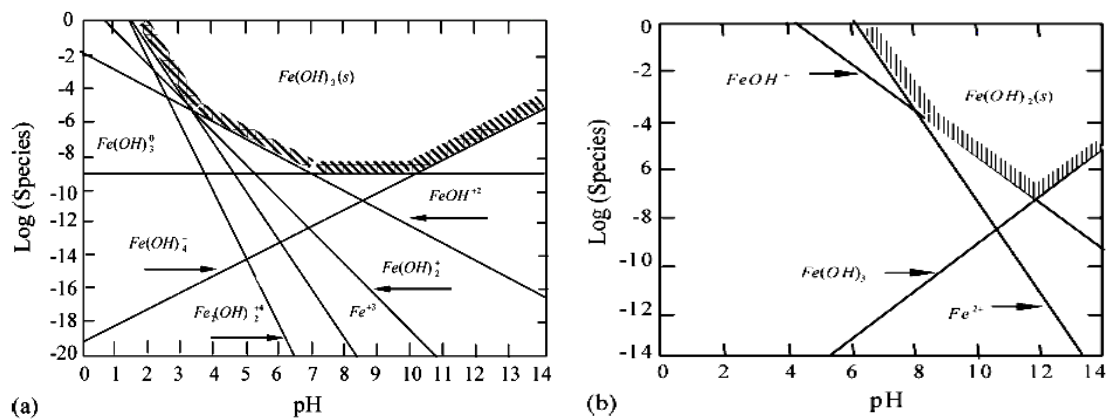


Figura 17: Diagrama de atividade do Fe(III) (a) e Fe(II) (b) de acordo com o pH (IRDEMEZ *et al.*, 2006).

2.3.1.4 – FATORES QUE INFLUENCIAM O PROCESSO

Visto as principais reações químicas envolvidas, tem-se quatro etapas principais na eletroflotação Segundo CRESPILO & REZENDE (2004), as quais são: *geração eletroquímica do agente coagulante, eletrocoagulação, eletrofloculação* e por fim, *flotação* das impurezas *ou eletroflotação*, que serão considerados a seguir:

GERAÇÃO ELETROQUÍMICA DO AGENTE COAGULANTE

Esta fase é determinante para que a coagulação ocorra de maneira controlada e eficiente. Nesta etapa CRESPILO & REZENDE (2004) afirmam que devem ser considerados vários fatores:

- A condutividade da solução,
- A resistividade do meio,
- O potencial aplicado entre os eletrodos e
- A corrente obtida.

Todos esses fatores estão relacionados entre si, com isso, uma vez controlados, a geração do agente coagulante passa a ser monitorada pela corrente obtida

ELETROCOAGULAÇÃO

Nesta etapa é de grande interesse que a hidrólise resulte em hidróxido, uma vez que esse composto será o maior responsável por remover as impurezas do efluente.

Nela ocorre a coagulação das partículas, ou seja, o metal carregado positivamente reage com partículas de cargas negativas. Esse fenômeno ocorre para baixas concentrações do metal. Entretanto, a reação pode ficar limitada pela hidrólise da espécie carregada, liberada em grande quantidade pelo eletrodo, que, por sua vez, é muito rápida. Assim, a adsorção e a neutralização podem ocorrer, porém seus efeitos são bem menos expressivos quando comparados com a ação dos hidróxidos formados a partir da oxidação do eletrodo metálico. (FORNARI, 2007).

ELETROFLOCULAÇÃO

Na terceira etapa, também denominada de floculação, ocorre a formação dos flocos. Os complexos formados na etapa de geração eletroquímica do agente coagulante adsorvem-se em partículas coloidais, originando partículas maiores, os flocos, que podem ser removidos por decantação, filtração ou flotação. (CRESPILO & REZENDE, 2004 e TOREM *et al.*, 2005).

Para CRESPILO & REZENDE (2004), a teoria desenvolvida por Derjaguin-Landau e Verwey-Overbeek (DLVO), é a mais aceita e utilizada para explicar a floculação.

Onde a aproximação entre os colóides presentes na solução é consequência do movimento browniano das partículas. Quando dois colóides se aproximam, ocorre interação entre as camadas difusas, o que leva à repulsão em razão da força eletrostática entre eles. Essa força de repulsão ocorre porque os colóides possuem cargas de mesmo sinal, entretanto, elas sofrem também ação das forças de Van der Waals do tipo dipolo permanente e dipolo induzido, que atuam nos átomos dos colóides, fazendo com que ocorra atração entre as partículas coloidais.

Assim, o sistema que está em estágio de floculação é regido pela interação entre as forças de repulsão de origem elétrica e de atração do tipo Van der Waals, e pode ocorrer duas situações:

- ***As forças de repulsão são maiores que as de atração:*** Neste caso, o sistema fica estável e não ocorre floculação. A energia potencial de repulsão é inversamente proporcional a distância entre as partículas.
- ***As forças de atração são maiores que as de repulsão:*** Então ocorre interação entre as partículas.

As duas situações dependem da concentração iônica, pois, quando a concentração iônica é baixa, a energia resultante é de repulsão, e atinge um valor máximo, conhecido como barreira de energia. Caso haja aumento da concentração iônica do meio, será possível ter a barreira de energia rompida e, então, o contato entre as partículas coloidais ocorrerá.

CRESPILO & REZENDE (2004) notaram que a barreira de energia origina-se na dupla camada elétrica, região em que ocorre a concentração e distribuição de cargas em uma partícula coloidal, porém, a configuração dessa camada envolve princípios que ainda

são estudados. Neste caso, o modelo proposto possui bases satisfatórias para entender os fenômenos que ocorrem na camada difusa da dupla camada elétrica, cujo modelo é apresentado na Figura 18:

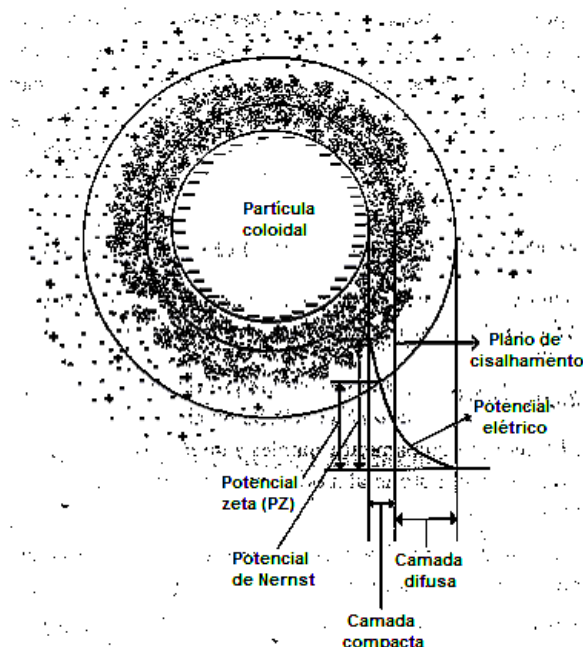


Figura 18 – Configuração esquemática da dupla camada elétrica (CRESPILHO & REZENDE, 2004).

A introdução de um novo eletrólito ao sistema coloidal provoca aumento de carga da camada difusa e diminui o tamanho da mesma. Assim, quando a concentração iônica é relativamente elevada, ocorre aumento na concentração de íons da camada difusa, a qual, para permanecer eletricamente neutra, tem seu volume reduzido de forma que as interações de Van der Waals sejam dominantes diante das forças eletrostáticas repulsivas, com isso ocorre a coagulação das espécies envolvidas

Para determinar a carga eletrostática da superfície das partículas coloidais utiliza-se o potencial zeta, ou potencial eletro-cinético, que é o potencial do plano de cisalhamento, localizado no início da camada difusa (CRESPILHO & REZENDE, 2004).

ELETROFLOTAÇÃO

A quarta etapa consiste da flotação das impurezas ou eletroflotação ocasionada pela geração de microbolhas de hidrogênio ou oxigênio no cátodo.

Segundo MOLLAH *et al.* (2004), a eficiência da flotação depende do tamanho das bolhas e também da mistura das mesmas com o efluente. Pequenas bolhas promovem maiores áreas superficiais de contato, resultando em melhor eficiência de separação no processo.

2.3.2 – PARÂMETROS ASSOCIADOS À ELETROFLOTAÇÃO

A eficiência de um sistema de eletroflotação é refletida na remoção de poluentes e potência elétrica e/ou consumo químico (CHEN, 2004).

A seleção apropriada dos materiais é muito importante, e os mais comuns são alumínio e ferro, pois são baratos, eficazes e prontamente disponíveis (CRESPILHO & REZENDE, 2004).

Há fatores que influenciam o tamanho das bolhas (gases hidrogênio e oxigênio) tais como densidade de corrente e curvatura da superfície do eletrodo, mas os maiores efeitos ocorrem pelo material do eletrodo e pH do meio (HOSNY, 1996), condutividade do meio, temperatura e disposição dos eletrodos (CHEN, 2004).

2.3.2.1 – pH

A medida de pH é uma das medidas mais importantes e é freqüentemente utilizada nos testes químicos da água. Praticamente em todas as fases de fornecimento de água e tratamento de águas residuárias dependem do pH da água, como por exemplo: neutralização, abrandamento precipitação, coagulação, desinfecção e controle de corrosão. (APHA, 2005).

CHEN (2004) observou que a potência consumida é mais alta a pH neutro, do que em condições ácidas ou alcalinas devido à variação da condutividade. Quando a condutividade é alta, o efeito do pH não é significativo

O efeito do pH da água ou efluente na eletrofloculação esta refletido pela eficiência da corrente, bem como a solubilidade de hidróxidos metálicos

Uma das maiores vantagens da Eletroflotação é sua capacidade de neutralizar o pH do efluente, caso esteja abaixo de 7. Para efluentes ácidos, a Eletroflotação tende a subir o valor da pH em decorrência da redução de hidrogênio no catodo, por isso, ela é conhecida como uma técnica neutralizadora de pH. (CHEN *et al*, 2000 e DANESHVAR *et al*, 2004)

Segundo FERREIRA (2006) o aumento do pH é atribuído à evolução do gás hidrogênio devido à liberação de íons OH⁻.

Conforme explicado por CHEN *et al.*(2000) e por DANESHVAR *et al.* (2004), Outras reações que participam desse equilíbrio são: hidrólise do alumínio, formação de oxigênio no anodo, liberação de CO₂ (pelo borbulhamento de hidrogênio no catodo) e formação de outros hidróxidos insolúveis.

2.3.2.2 – CONDUTIVIDADE

Condutividade é uma medida da habilidade duma solução aquosa em conduzir corrente elétrica, sendo de suma importância para uma boa otimização do processo. (APHA, 2005). A condutividade na eletroflotação é o termômetro de averiguação do tratamento, se a condutividade está baixa é sinal que o tratamento está comprometido.

Esta habilidade depende da presença de íons; de sua concentração total, mobilidade, valência e da temperatura de medição.

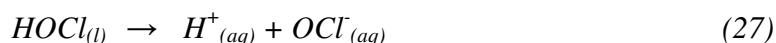
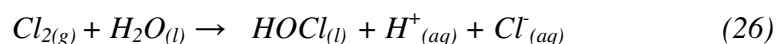
A condutividade é diretamente proporcional à quantidade de íons condutores presentes no líquido, quanto maior for a concentração de íons no efluente, maior será sua capacidade de condução de corrente elétrica, e com isso maior será a possibilidade de ocorrência de reações entre as substâncias presentes no efluente. Com isso quando a condutividade é alta são removidas grandes quantidades de contaminantes, com um custo

energético menor conforme indicado nos trabalhos de DANESHVAR *et al.* (2006) e CERQUEIRA (2006).

Porém, há um limite para isso, no estudo de GAO *et al.* (2005) foi observado que o consumo de energia não diminui significativamente quando a condutividade da solução for superior a 1,5 mS/cm.

No estudo de GOLDER *et al.* (2005) foi adicionado cloreto de sódio (NaCl) ou de potássio (KCl) para que houvesse um aumento do número de íons na solução, fazendo com que a condutividade ficasse mais alta e assim tornasse o tratamento mais eficaz, tratando o efluente em menos tempo.

As reações são segundo GE *et al.* 2004:



Porém, isso mostrou estar longe de ser o ideal para o tratamento, visto que este recurso conduz à oxidação dos íons cloreto em gás cloro e em íons OCl⁻, que são um forte oxidante capaz de oxidar moléculas orgânicas presentes no efluente.

2.3.2.3 – TEMPERATURA

De acordo com DANESHVAR *et al.* (2004), o aumento da temperatura da solução contribui para melhorar a eficiência de remoção, visto que com o aumento da temperatura temos um aumento da movimentação dos íons produzidos, o que facilita a colisão deles com o coagulante formado.

Alguns estudos para tratamento de água realizados na Rússia mostram que a eficiência de remoção para o eletrodo de alumínio aumenta inicialmente com a temperatura até 60°C. Acima desse valor, a eficiência diminui, embora, a condutividade aumente com o

aumento da temperatura, diminuindo o consumo de energia elétrica. Entretanto, o que poucos pesquisadores abordam é o aumento da temperatura da solução no período de aplicação da eletroflotação.

De acordo com LARUE *et al.*(2003), isto é ocasionado pelo efeito Joule, expresso por Q (kWh.m⁻³) e definido matematicamente como:

$$Q = C_p \cdot \Delta T \quad (28)$$

Onde

C_p = capacidade calorífica da solução, supõe-se que é igual à água 4,18 Jm⁻³ K⁻¹

ΔT = diferença entre as temperaturas final e inicial do efluente

2.3.2.4 – SOBRENADANTE

Durante o tratamento começa a surgir uma espuma chamada sobrenadante, essa espuma contém todos os contaminantes levados pelas bolhas para a superfície que formam os gases formados e flotados.

WIENDL, 1998 Percebeu que à medida que o tempo de tratamento avança, a espessura da camada de espuma aumenta e a flutuação dela é assegurada pela presença dos gases formados e flotados que estão situados logo abaixo da espuma e também devido à formação gasosa desta camada que apresenta grande porosidade e baixa densidade inicial.

Durante o tratamento observou-se que algumas partículas (geralmente metais pesados) não conseguem flotar com o auxílio das bolhas e decantam.

Progressivamente, a região externa da camada vai se adensando tanto pelo escape dos gases que se formaram inicialmente e transportaram as partículas como também pela ação do seu próprio peso. A espuma fica bastante rígida e consistente tendo uma estrutura formada pelas impurezas arrastadas pelos gases da eletrólise (WIENDL, 1998).

Assim, esta camada dificulta a liberação das novas quantidades de gases formados na eletrólise, e a mesma deve ser retirada.

2.3.2.5 – VELOCIDADE DE ASCENSÃO DAS BOLHAS

De acordo com WIENDL (1998), a teoria que define o movimento de ascensão das bolhas, desenvolvido com base na mesma Lei de Stokes para sedimentação de partículas sólidas em meio líquido (água), estabelece o seguinte valor para a velocidade de um determinado gás:

$$V_B = \frac{g \cdot (\rho_{Ag} - \rho_g)}{18 \cdot \mu_{Ag}} \cdot D^2 \quad (29)$$

Sendo:

V_B = velocidade de ascensão da bolha em m/s.

g = aceleração da gravidade, 9,80 m/s².

ρ_{Ag} = densidade da água (massa específica/g), kg.s²/m⁴.

ρ_g = densidade do gás (massa específica/g), kg.s²/m⁴.

D = diâmetro da bolha (esférica) em m.

μ_{Ag} = coeficiente de viscosidade (dinâmica) da água, kg.s/m².

Nas aplicações práticas, as seguintes hipóteses devem ser consideradas:

- Bolhas esféricas
- Líquido em repouso absoluto
- Água pura (meio líquido)
- Ascensão das bolhas em movimento retilíneo vertical

Segundo FERREIRA (2006) Deve-se ressaltar que, em condições idênticas de temperatura e pressão, as velocidades de ascensão das bolhas de diferentes gases com o mesmo diâmetro, são praticamente iguais entre si.

Matematicamente, isto pode ser comprovado fazendo-se a relação, por exemplo, entre os gases hidrogênio ($r= 0,0092 \text{ kg.s}^2/\text{m}^4$) e oxigênio ($r= 0,1457 \text{ kg.s}^2/\text{m}^4$) à $T = 0^\circ\text{C}$.

$$\frac{V_{H_2}}{V_{O_2}} = \frac{g \cdot (\rho_{Ag} - \rho_{H_2})}{18 \cdot \mu_{Ag}} \cdot D^2 \cdot \frac{18 \cdot \mu_{Ag}}{g \cdot (\rho_{Ag} - \rho_{O_2})} \cdot \frac{1}{D^2}$$

De onde tira-se o seguinte resultado:

$$\frac{V_{H_2}}{V_{O_2}} = \frac{(\rho_{Ag} - \rho_{H_2})}{(\rho_{Ag} - \rho_{O_2})} = \frac{(101,9594 - 0,0092)}{(101,9594 - 0,1457)} = 1,0013$$

Ou seja, a diferença de velocidade entre os gases hidrogênio e oxigênio, ou outros gases, sob as mesmas condições e com os mesmos diâmetros é de apenas 0,13 %, que representa um valor praticamente imperceptível.

Já a diferença de temperatura entre a condição real do experimento e a da CNTP deve ser considerada como um fator relevante no momento de se calcular a velocidade de ascensão das bolhas. Isto pode ser verificado calculando-se as velocidades de ascensão das bolhas de hidrogênio a 0°C e a 30°C , para em seguida, fazer a relação entre estes valores:

$$V_{H_2} = \frac{g \cdot (\rho_{Ag} - \rho_{H_2})}{18 \cdot \mu_{Ag}} \cdot D^2$$

Para Temperatura $T = 0^\circ\text{C}$

$$V_{H_2} = \frac{9,80 \cdot (101,9594 - 0,0092)}{18 \cdot 181 \cdot 10^{-6}} \cdot D^2 = 0,3067 \cdot 10^6 \cdot D^2$$

Para Temperatura $T = 30^\circ\text{C}$

$$V_{H_2} = \frac{9,80 \cdot (101,9594 - 0,06355)}{18 \cdot 84 \cdot 10^{-6}} \cdot D^2 = 0,6577 \cdot 10^6 \cdot D^2$$

Fazendo a relação:

$$\frac{V_{H_2}(30^{\circ}\text{C})}{V_{H_2}(0^{\circ}\text{C})} = \frac{0,6577 \cdot 10^6 \cdot D^2}{0,3067 \cdot 10^6 \cdot D^2} = 2,14$$

Ou seja, a velocidade de ascensão da bolha de hidrogênio a 30° C é cerca de 2 vezes maior que a 0°C.

Utilizando os mesmos cálculos para o oxigênio, obtêm-se:

$$V_{O_2} = \frac{g \cdot (\rho_{Ag} - \rho_{O_2})}{18 \cdot \mu_{Ag}} \cdot D^2$$

Para Temperatura T = 0 °C

$$V_{O_2} = \frac{9,80 \cdot (101,9594 - 0,1457)}{18.181 \cdot 10^{-6}} \cdot D^2 = 0,3063 \cdot 10^6 \cdot D^2$$

Para Temperatura T = 30 °C

$$V_{H_2} = \frac{9,80 \cdot (101,9594 - 0,1310)}{18.84 \cdot 10^{-6}} \cdot D^2 = 0,6572 \cdot 10^6 \cdot D^2$$

Fazendo a relação:

$$\frac{V_{O_2}(30^{\circ}\text{C})}{V_{O_2}(0^{\circ}\text{C})} = \frac{0,6572 \cdot 10^6 \cdot D^2}{0,3063 \cdot 10^6 \cdot D^2} = 2,15$$

Neste caso, a velocidade de ascensão do gás oxigênio gerado também é cerca de 2 vezes superior na temperatura de 30° C.

A Tabela 21 demonstra a velocidade teórica de ascensão das bolhas segundo a equação de Stokes, em cm/s.

TABELA 21: RELAÇÃO ENTRE VELOCIDADE TEÓRICA DE ASCENSÃO DAS BOLHAS COM DIFERENTES DIÂMETROS E SUAS TEMPERATURAS:

D (μM)	T= 0°C V (cm/s)	T= 30°C V (cm/s)
5	0,0008	0,0017
10	0,0031	0,0066
20	0,0122	0,0263
40	0,0490	0,1050
60	0,1100	0,2370
80	0,1950	0,4210
100	0,3060	0,6580
120	0,4400	0,9580
140	0,6000	1,2900
160	0,7830	1,6900
180	0,9910	2,1300
200	1,2200	2,6300
300	2,7500	5,9200
400	4,9000	10,5300

Fonte: WIENDL, 1998

A seguir temos a Figura 19 que mostra um gráfico cartesiano bilogarítmico dos dados da Tabela 19.

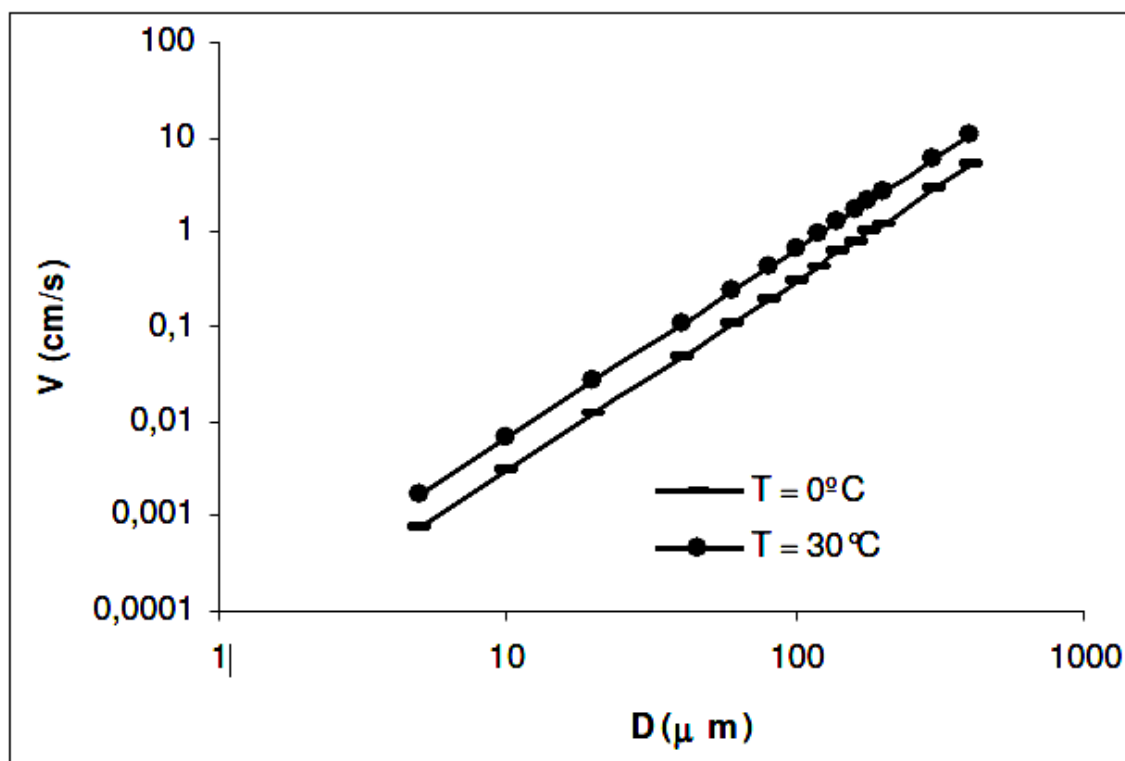


Figura 19: Gráfico cartesiano bilogarítmico da temperatura com o diâmetro das bolhas de gás.(WIENDL,1998)

De acordo com WIENDL (1998), na eletrólise, o diâmetro das bolhas situa-se entre 40 e 200 micrômetros e sabe-se que para valores superiores a 150 micrômetros, as velocidades reais são maiores que as teóricas.

O tempo de subida da bolha poderá ser calculado relacionando, no gráfico acima, o diâmetro da bolha e a temperatura.

Ainda de acordo com WIENDL (1998), na CNTF o número de bolhas por cm^3 da eletrólise é de 1×10^6 .

2.3.2.6 – PRODUÇÃO DE GASES

De acordo com WIENDL (1998), a quantificação dos gases que se formariam junto aos eletrodos, em condições ideais e se, antes, não ocorrerem reações com outros elementos e compostos existentes na solução, pode ser feita pela equação 30.

$$M_{Gás} = \alpha_{gás} i_t \cdot t \quad (30)$$

Sendo:

$\alpha_{gás}$ = equivalente eletroquímico.

i_t = corrente total nos eletrodos, que pode ser calculada da seguinte forma:

$$i_t = \delta \cdot A_{\text{eletrodos}} \cdot n,$$

onde:

δ é a densidade corrente,

A_{eletrodo} é a área do eletrodo e

n é o número de eletrodos

t = tempo de eletrólise, em segundos.

2.3.2.7 – TURBIDEZ:

A avaliação da claridade da água é muito importante tanto na produção de produtos destinados ao consumo humano como em muitas operações de manufaturamentos (APHA, 2005).

A turbidez na água é causada pela presença de sólidos suspensos e matéria coloidal tais como: plâncton, organismos microscópicos, matéria orgânica e inorgânica finalmente dividida.

Segundo PEREIRA (2007) A turbidez é originada pela presença de materiais insolúveis no meio aquoso, sendo assim, classificada de acordo com o seu tamanho.

As partículas que contribuem para a turbidez são aquelas cujos diâmetros variam de $10^{-3}\mu\text{m}$ a $10^{-1}\mu\text{m}$ (colóides) e de $10^{-1}\mu\text{m}$ a $10^3\mu\text{m}$ (sólidos suspensos). Grande parte dos microorganismos patogênicos desenvolvem-se na presença dessas partículas e por isso, a eliminação dessas partículas torna-se necessária.

2.3.2.8 – CONCENTRAÇÃO DE ÓLEOS E GRAXAS

Com a interação das moléculas de óleos e graxas com o hidróxido de alumínio, formam-se colóides cuja densidade é bem menor que a da água, e este se deslocam naturalmente para a superfície da câmara de separação. No entanto, com o auxílio das microbolhas geradas no processo, a flotação das partículas coloidais é mais rápida e mais eficiente.

Segundo PEREIRA (2007) essa é uma das maiores vantagens da Eletroflotação: A remoção de óleos e graxas.

2.3.2.9 – SÓLIDOS TOTAIS

A determinação da concentração de sólidos totais envolve todos os compostos particulados e dissolvidos, todas as substâncias orgânicas e inorgânicas contidas num líquido sob formas moleculares, ionizadas ou micro-granulares, como metais, sais inorgânicos, óleos e graxas e matéria orgânica presente no efluente. (APHA, 2005).

Este é um dos parâmetros que determina a qualidade da água, com uma metodologia simples, fornecendo boas informações sobre a quantidade de resíduos presentes nos efluentes, avaliando o peso total dos constituintes minerais presentes na água por unidade de volume

É possível fazer o acompanhamento do tratamento biológico de uma água residuárias em suas várias etapas e eficiência através do controle dos teores de Sólidos Totais Fixos (STF) e Sólidos Totais Voláteis (STV).

Devido à boa correspondência entre matéria orgânica e sólidos totais voláteis de um despejo a eficiência na remoção daquela pode ser “estimada” pela remoção dos sólidos voláteis (BRAILE & CAVALCANTI, 1993).

2.3.2.10 – CARBONO ORGÂNICO TOTAL (COT)

O **carbono total** é a quantidade de gás carbônico produzido quando uma amostra é oxidada por completo, ele inclui a matéria orgânica dissolvida e o carbono inorgânico, de uma maneira geral é dado por:

$$CT = COT \text{ (Carbono Orgânico Total)} + CI \text{ (Carbono Inorgânico)}. \quad (31)$$

O COT é aplicado como indicador da qualidade da água e permite determinar o cumprimento das leis de descarga mediante as ações humanas que venham a causar danos ao meio ambiente.

A matéria orgânica presente no efluente pode ser coagulada e flotada facilmente em razão de sua grande afinidade pelo $Al(OH)_3$ gerado.

A maior parte das substâncias orgânicas contém grupos carboxílicos e aminas cujas cargas superficiais dependem do pH do efluente. Assim, vários tipos de reações químicas ocorrem entre a superfície dos colóides formados pelo hidróxido de alumínio e as substâncias orgânicas, formando colóides maiores. Os grupamentos alifáticos presentes nas moléculas orgânicas não interagem com as moléculas de água, e os colóides podem ser removidos facilmente por flotação. (PEREIRA, 2007)

2.3.2.11 – DBO – DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGÊNIO

Demanda Bioquímica de Oxigênio é o parâmetro mais utilizado para a medida do consumo de oxigênio na água. É a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria biologicamente. (APHA, 2005).

Este é um dos parâmetros mais importantes na medição da poluição orgânica e na quantidade de material orgânico para efeito de dimensionamento de reatores biológicos.

Como a oxidação completa da matéria orgânica demora de 21 a 28 dias, padronizou-se o teste da DBO em 5 dias a 20°C (DBO padrão). Neste trabalho, quando se refere a DBO, entende-se como DBO padrão.

2.3.2.12 – DQO – DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO

A Demanda Química de Oxigênio É definida como a quantidade específica de oxidante que reage com a amostra sob condições controladas, expressa em termos de seu oxigênio equivalente. Os componentes orgânicos e inorgânicos da amostra são sujeitos à oxidação, mas na maioria dos casos a matéria orgânica predomina e é a de maior interesse (APHA, 2005; HAMMER, 1979).

Demanda Química de Oxigênio (DQO) é um parâmetro que mede a quantidade de matéria orgânica suscetível de ser oxidada por meios químicos que existam em uma amostra líquida. Ela é freqüentemente utilizada na detecção de poluição em águas naturais e residuárias e se expressa em mg O₂/L. A sua medição permite avaliar parâmetros de quantificação de matéria orgânica na água.

No teste de DQO, além da matéria orgânica biodegradável, também é oxidada a matéria orgânica não biodegradável e outros componentes inorgânicos (sulfetos, sulfitos, iodetos, etc.), o que pode causar alguma interferência no resultado final. Uma das grandes vantagens em relação à DBO é o tempo de realização da análise de 2 a 3 horas.

O valor obtido é sempre superior à demanda biológica de oxigênio, já que se oxidam por este método também as substâncias não biodegradáveis, muito comum nas águas industriais. A relação entre os dois parâmetros é indicativo da qualidade da água.

2.3.2.13 – MATERIAL DOS ELETRODOS

Segundo FERREIRA (2006) Em qualquer processo eletroquímico, o material do eletrodo tem efeito significativo no tratamento do efluente, Para o tratamento da água potável, ele deve ser atóxico para a saúde humana.

Ferro e alumínio são os mais utilizados por apresentarem baixo custo e estarem facilmente disponíveis (KUMAR *et al.*, 2004), porém, geralmente o eletrodo de ferro apresenta a desvantagem do efluente, durante e após o tratamento, ficar com uma cor residual verde ou amarela bastante forte. Esta coloração é proveniente dos íons Fe^{2+} (cor verde) e Fe^{3+} (cor amarela) gerados no tratamento eletrolítico. Já com o eletrodo de alumínio, o efluente final fica claro e estável, não apresentando coloração residual.

No trabalho apresentado por KOBAYASHI *et al.* (2006), quando testados sob as mesmas condições, os resultados para DQO, turbidez e sólidos suspensos foram melhores para eletrodos de alumínio do que para os de ferro. Esta preferência também foi verificada pelos autores CHEN *et al.* (2000). Entretanto, ao comparar a remoção do arsênio com eletrodos de ferro e alumínio, KUMAR *et al.* (2004) verificaram que o eletrodo de ferro era melhor, pois este apresentava 99% de remoção contra 37% para o alumínio. Esta diferença foi atribuída à capacidade de adsorção do $\text{Al}(\text{OH})_3$ para o $\text{As}(\text{III})$ ser muito menor que a do $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

2.3.2.14 – DISTÂNCIA ENTRE ELETRODOS

De acordo com FERREIRA (2006) esse é um importante fator a ser levado em consideração quando se deseja otimizar os custos de operação

Segundo CRESPILO & REZENDE (2004), quanto maior a distância entre os eletrodos, maior deverá ser a diferença de potencial (d.d.p.) aplicada, pois a solução possui resistividade à passagem de corrente elétrica. Assim, de acordo com as características do efluente, a distância entre os eletrodos pode variar para melhorar a eficiência do processo. Por exemplo, distâncias maiores poderão ser impostas quando a condutividade do efluente for relativamente elevada; caso contrário, a distância deverá ser a menor possível para que não ocorra aumento exagerado do potencial, pois isto reduzirá o consumo de energia sem alterar o grau de separação, pois neste caso, a corrente não seria alterada.

De acordo com DEN; HUANG (2005), ao testar um sistema de tratamento sob a mesma corrente elétrica, não houve diferença de eficiência de remoção para diferentes

espaçamentos entre os eletrodos, por isso, a distância entre eles é considerada apenas como um fator de otimização de custos.

Já os autores MODIRSHAHLA *et al.* (2007) afirmam no trabalho que, com o aumento da distância entre os eletrodos, menos interações dos íons da solução com o coagulante formado irão ocorrer.

Esta diferença de conclusão entre os dois autores citados pode ser atribuída a uma possível divergência no valor da condutividade de cada efluente

2.3.2.15 – CONSUMO DOS ELETRODOS

Ao aplicar d.d.p. entre dois eletrodos imersos em uma solução eletrolítica, reações eletroquímicas de oxidação no ânodo e redução no cátodo começam a ocorrer. Tais reações podem ser governadas por fenômenos associados à eletrólise, que, por sua vez, dependem da d.d.p. aplicada. Por meio das leis estabelecidas por Faraday, o consumo de elétrons é associado à quantidade total de substâncias reagentes.

Tal fato, na eletrocoagulação, está diretamente relacionado ao desgaste do eletrodo (corrosão) no processo de geração do agente coagulante. Isso significa que a geração de alumínio e ou ferro em solução está intimamente relacionada à carga, que, por sua vez, pode ser controlada pela corrente obtida. Assim, a corrente medida por um multímetro em um processo de eletro-coagulação é, a princípio, proporcional a quantidade de alumínio e/ou ferro carregado gerado em solução. É possível quantificar a massa do eletrodo (M_{el}) consumida durante a eletrólise, pela equação 32:

$$M_{el} = \frac{i \cdot t \cdot M}{F \cdot n} \quad (32)$$

Onde:

i é a corrente (A);

t é o tempo de aplicação da corrente (s);

M é a massa molar do elemento predominante do eletrodo (g/mol);

n é o número de elétrons envolvidos na reação de oxidação do elemento do ânodo;

F é a constante de Faraday ($9,65 \times 10^4$ C/ mol).

A corrente utilizada na eletroflotação vai determinar a quantidade de metal que será oxidada no ânodo. A massa equivalente obtida via eletroquímica para o alumínio é de $335,6 \text{ mg A}^{-1}\text{h}^{-1}$ e para o ferro, $1041 \text{ mg A}^{-1}\text{h}^{-1}$ (CRESPILHO & REZENDE, 2004).

Cabe citar uma observação feita por MOLLAH *et al.*, 2004 que embora esta quantidade seja um valor teórico, geralmente há boa concordância com o valor determinado experimentalmente, entretanto podem ser detectados erros se a geometria do conjunto de eletrodos não for adequadamente determinada e se o reator não estiver operando próximo da sua condição ótima.

2.3.2.16 – TEMPO DE DESGASTE DO ELETRODO

De acordo com WIENDL (1998), ele pode ser calculado pela equação:

$$t = \frac{M_o}{\alpha \cdot i} \quad \text{ou} \quad t = \frac{\rho \cdot V}{\alpha \cdot i} \quad (33)$$

Sendo:

t = Tempo de desgaste do eletrodo em horas,

M_o = Massa inicial da colméia em g,

ρ = Densidade do material do eletrodo em g/L,

V = perda de volume do eletrodo desgastado em L,

α = Equivalente eletroquímico do material do eletrodo em g/A.h,

i = Corrente aplicada em A

A relação entre os tempos de desgaste dos eletrodos de diferentes materiais, Al e Fe, com as mesmas condições elétricas e dimensões, que foram as condições utilizadas neste trabalho, traz os seguintes resultados:

$$i_{Al} = i_{Fe} \quad (34)$$

$$V_{Al} = V_{Fe} \quad (35)$$

$$\frac{t_{Al}}{t_{Fe}} = \frac{\rho_{Al} \cdot V_{Al} \cdot \alpha_{Fe} \cdot i_{Fe}}{\rho_{Fe} \cdot V_{Fe} \cdot \alpha_{Al} \cdot i_{Al}} \quad (36)$$

De 34, 35 e 36 temos:

$$\frac{t_{Al}}{t_{Fe}} = \frac{\rho_{Al} \cdot \alpha_{Fe}}{\rho_{Fe} \cdot \alpha_{Al}}$$

Sabendo que $\rho_{Al} = 2,7 \text{ g/mL}$, $\alpha_{Al} = 0,335 \text{ g/A.h}$ e $\rho_{Fe} = 7,8 \text{ g/mL}$, $\alpha_{Fe} = 1,040 \text{ g/A.h}$ obtemos o seguinte resultado:

$$\frac{t_{Al}}{t_{Fe}} = \frac{2,7 \times 1,040}{7,8 \times 0,335} = 1,07$$

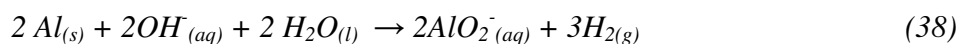
Com esse resultado percebe-se que os tempos de desgaste de eletrodos de alumínio e de ferro com as mesmas condições e dimensões, como foi feito, são praticamente iguais.

2.3.2.17 – PASSIVAÇÃO DOS ELETRODOS

Quando a superfície do eletrodo metálico está em contato com o ar, ocorre sobre sua superfície a formação de um filme muito fino de óxido que faz com que o eletrodo não sofra corrosão facilmente. Essa camada de óxido pode ser chamada de filme passivo. Durante a eletrólise, na região próxima ao cátodo há excesso de OH^- , fazendo com que a superfície seja atacada por esses ânions e promovendo a formação de um filme passivo. Uma vez formado o filme passivo, o processo de eletroflotação pode estar comprometido

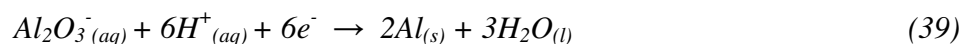
pela perda de eficiência em decorrência do aumento da resistividade do eletrodo (CRESPILHO & REZENDE, 2004).

As seguintes equações regem este processo:



Para retardar este efeito, faz-se a inversão periódica da polaridade. Segundo MOLLAH *et al.* (2001), a vida útil de um eletrodo pode ser aumentada em até duas vezes e a resistividade diminuída pela inversão de polaridade. Com a inversão de polaridade, o eletrodo que se comportava como um cátodo passa a se comportar como um ânodo.

A reação passa a ser:



Porém, este fato ainda não é unânime entre os pesquisadores. De acordo com HU *et al.* (2003), uma medida direta da composição deste filme passivo é bastante difícil pois esta camada é tão fina que qualquer medida química ou eletroquímica poderia alterar suas estrutura e propriedades.

2.3.2.18 – DENSIDADE DE CORRENTE

Enquanto alguns pesquisadores relatam que a densidade de corrente pode influenciar a eficiência do tratamento, outros relatam que não há nenhum efeito sobre a remoção dos poluentes. (KUMAR *et al.*, 2004)

A corrente elétrica na Eletroflotação vai determinar a quantidade de metal que será oxidada no anodo. Alguns cuidados devem ser tomados ao escolher o valor da corrente elétrica a ser aplicada. Elevada corrente pode significar perda de potência, pois parte dela se

dissipará como energia térmica para a solução, o uso de densidades mais elevadas requer manutenção dos eletrodos. A densidade de corrente controla a taxa de produção do agente coagulante, das bolhas geradas e o tamanho delas. A seguir está apresentada a Equação 40 da densidade de corrente.

$$\delta = \frac{i}{A_{\text{anodo}}} \quad (40)$$

Sendo:

δ = densidade de corrente em A/m².

i = corrente elétrica em A.

A_{anodo} = área total dos anodos em m².

O aumento da densidade de corrente promove uma maior oxidação dos eletrodos formando assim uma maior quantidade de agentes coagulantes e aumentando simultaneamente a geração de gases hidrogênio e oxigênio na superfície dos eletrodos o que acarreta uma maior agregação dos contaminantes nas bolhas, fazendo assim o transporte do material coagulado, também, há um aumento mais acentuado do valor de pH.

Outro item que é afetado pela densidade de corrente é o diâmetro das bolhas, que aumenta a medida que a corrente aumenta no sistema.

Entretanto, valores muito altos (acima de um valor ótimo) não são produtivos para o sistema, pois, além de produzir um desgaste mais rápido do eletrodo e um maior consumo de energia, o que traz um maior custo para a operação, o excesso na quantidade de bolhas geradas na célula eletrolítica, conduz à coalescência entre elas reduzindo assim a eficiência de remoção (MANSOUR; CHALBI, 2006).

A figura 20 exemplifica este fenômeno devido ao efeito da coalescência das bolhas.

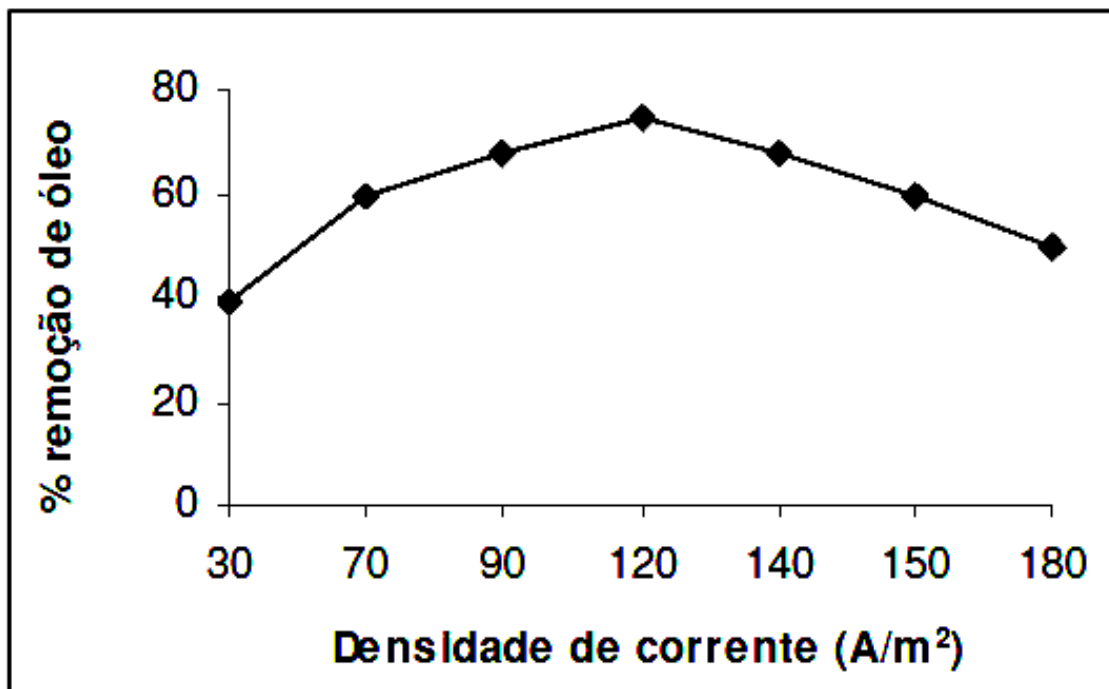


Figura 20: Exemplo do comportamento da densidade de corrente com a eficiência de remoção do óleo.

Fonte: MANSOUR; CHALBI *et al.*; 2006

O fenômeno da coalescência, que é o aumento do tamanho das bolhas por incorporação das menores, geralmente quando duas delas colidem formando uma única é favorecido por:

- Presença de bolhas com diferentes diâmetros, quando as maiores incorporam as menores pela maior velocidade de ascensão das primeiras.
- Agitação muito violenta, pois isto prejudica a flotação do efluente.
- Presença de grandes superfícies em contato com as fases líquido/gás, pois nelas se depositam as microbolhas que coalescem mais facilmente.

Nos trabalhos apresentados por CHEN *et al.* (2000) e por KUMAR *et al.* (2004), a variação da densidade de corrente não influenciou na remoção da DQO, de óleos e graxas e nem na remoção do arsênio, embora eles afirmem que ela tenha sido mais rápida para um maior valor de densidade de corrente.

Isto foi atribuído ao fato de que não é ela, mas sim a densidade de carga que afeta a eficiência do tratamento, o que foi comprovado quando a variou e verificou-se uma modificação na remoção dos parâmetros citados.

2.3.2.19 – EFICIÊNCIA DA CORRENTE

De acordo com DANESHVAR *et al.* (2006) e CHEN *et al.* (2000), este parâmetro se baseia na comparação da perda da massa experimental sofrida pelo eletrodo durante o tratamento, com o valor calculado teoricamente pela equação abaixo:

$$\varphi = \frac{\Delta M_{exp}}{\Delta M_{teor}} \cdot 100 \quad (41)$$

Onde:

$$\Delta M_{teor} = \frac{i \cdot t \cdot M}{F \cdot n} \quad (42)$$

Sendo as variáveis:

φ = eficiência da corrente, em %.

i = corrente em A.

t = tempo de aplicação da corrente em s.

M = massa molar do elemento predominante do eletrodo, g/mol.

F = constante de Faraday, $9,65 \times 10^4$ C/mol.

n = número de elétrons envolvidos na reação de oxidação do elemento do anodo.

Para o alumínio, $n = 3$ e para o ferro, $n = 2$.

ΔM_{teor} = Massa da colméia teoricamente consumida durante a EF em g

2.3.2.20 – DENSIDADE DE CARGA

Segundo KUMAR *et al.* (2004) a densidade de carga é um parâmetro apropriado para se comparar diferentes resultados experimentais, podendo ser utilizado como parâmetro de projeto na eletrofloculação e pode ser determinada pela seguinte equação:

$$Cf = \frac{i \cdot t}{F \cdot V} \quad (43)$$

Sendo:

Cf = densidade de carga em F/m^3 .

i = corrente aplicada em A.

t = tempo de aplicação da corrente em s.

F = constante de Faraday, $9,65 \times 10^4$ C/mol.

V = volume de efluente tratado, m^3 .

TENSÃO ELÉTRICA

É um fator que influencia fortemente o desempenho da eletrofloculação, pois existe uma condição mínima de energia, encontrada geralmente de maneira empírica, para que as partículas em suspensão se desestabilizem completamente.

CASQUEIRA *et al.* (2006), observaram que valores de tensão superiores a 10 V promoviam um aglomerado denso e homogêneo de bolhas, sugerindo que sob estas condições haveria uma quantidade suficiente de gases disponíveis para o arraste eficiente dos contaminantes, fato que não se verificou com o valor de 5V, pois neste ponto, a eficiência de remoção do zinco foi de apenas 30%. Com essas aplicações CASQUEIRA *et al.* (2006) demonstrou que tensões abaixo de 10V comprometiam a eficiência de remoção do zinco.

CHEN *et al.*, 2000 verificaram que a tensão é dependente da densidade de corrente, da condutividade do efluente, do espaçamento entre os eletrodos e do estado da superfície deles e uma forma de calcular seu valor necessário para que uma determinada corrente elétrica passe pela solução pode ser feita pela equação 44. (PRETORIUS *et al.*, 1991, citado por HEMKEMEIER (2001); LARUE *et al.*, 2003).

$$U = \frac{\delta \cdot d}{k} \quad (44)$$

Onde:

U = tensão aplicada em V

δ = densidade de corrente, A/m²

d = distância entre os eletrodos, m

k = condutividade do eletrólito, S/m.

MANSOUR e CHALBI (2006) relataram que a condutividade da solução afeta a tensão da célula e que experimentos feitos em efluentes contendo até 3,5 % em massa de NaCl, ou seja, com um maior valor de condutividade, mostraram uma diminuição no valor da tensão elétrica da célula e conseqüentemente no consumo de energia.

2.3.2.21 – CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

Um dos mais importantes parâmetros que afetam a aplicação de qualquer método de tratamento de efluente é o custo. Além do alumínio e ferro consumido em uma célula de eletrofloculação o maior custo operacional é o consumo de energia (GAO *et al.*, 2005).

O consumo de energia elétrica (P) de um reator durante a eletrólise é quantificado através da aplicação da Lei de Ohm, onde: Tensão aplicada (V) multiplicada pela corrente (i) é igual à potência consumida (P) no reator (Equação 45).

$$P = V.i \quad (45)$$

Este dado de potência (P) é necessário para se estabelecer o dimensionamento do equipamento necessário para suprir energia ao reator (CRESPILO & REZENDE, 2004).

De acordo com KOBAYASHI *et al.* (2006), o consumo de energia em um reator com processo de eletroflotação em batelada é expresso como a equação 46.

$$C_{energia} = \frac{P.t}{V} \quad (46)$$

Sendo:

C_{energia} = consumo de energia, em W.h/m³

P = Potencia consumida em W

t = Tempo de aplicação da corrente em h

V = Volume do efluente tratado em m³

Segundo PEREIRA (2007) o consumo de energia e do eletrodo aumenta com o acréscimo da densidade de corrente.

2.3.2.22 – CUSTO DE OPERAÇÃO

Segundo KOBAYASHI *et al.* (2006), este item inclui material, em especial do eletrodo, custo da energia elétrica, da manutenção, da desidratação do lodo, além dos custos fixos.

Entretanto, conforme DONINI *et al.* (1994) citado por KOBAYASHI *et al.* (2006), os custos de energia e do material do eletrodo representam cerca de 80% dos custos de operação, portanto pode-se considerar apenas estes dois fatores, como mostra a equação 47.

$$C_{operação} = a. C_{energia} + b. C_{eletrodo} \quad (47)$$

Sendo:

$C_{\text{operação}}$ = Custo de operação em R\$/m³ de efluente.

a = custo de energia, R\$/kWh.

c_{energia} = consumo de energia, kW.h/m³ de efluente.

b = custo mássico da placa, R\$/kg de eletrodo.

c_{eletrodo} = consumo do eletrodo, kg/m³ efluente.

2.3.2.23 –EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO

A eficiência de tratamento é mensurada através da eficiência de remoção, comparando os valores finais e iniciais do parâmetro analisado, utilizando a seguinte fórmula:

$$\eta = 100. \frac{Ci - Cf}{Ci} \quad (48)$$

Sendo:

η = Eficiência de remoção em %,

Ci = Concentração inicial em mg/L

Cf = Concentração final em mg/L.

2.3.3 – VANTAGENS E DESVANTAGENS DA ELETROFLOTAÇÃO

As principais vantagens e desvantagens da tecnologia de eletro-floculação são discutidas abaixo:

2.3.3.1 –VANTAGENS DA ELETROFLOTAÇÃO

Segundo MOLLAH *et al.* (2004), as principais vantagens do uso de técnicas eletrolíticas são:

- Versatilidade;
- Eficiência energética;
- Segurança;
- Seletividade;
- Reações rápidas e sistemas de menor tamanho.

Ao invés de usar produtos químicos ou microorganismos o sistema emprega somente elétrons para o tratamento da água, assim torna-se uma técnica bastante limpa.

CRESPILHO & REZENDE (2004), apresentam ainda outras vantagens da utilização dessa técnica:

A eletrofloculação requer equipamentos simples e de fácil operação e manutenção, em que a corrente e o potencial aplicado, podem ser medidos e controlados de maneira automatizada;

Há controle maior na liberação do agente coagulante, em comparação com os processos físico-químicos convencionais;

Os flocos formados são mais estáveis, podendo ser melhores removidos por filtração;

Remove as partículas coloidais menores, pois o campo elétrico aplicado promove mais rapidamente o contato entre elas, facilitando a coagulação;

Limita o uso de substâncias químicas, minimizando, conseqüentemente, 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 da solução, onde pode ser concentrado e removido mais facilmente;

A célula eletrolítica é eletricamente controlada, não necessitando de dispositivos adicionais, o que requer menos manutenção;

E ainda:

Segundo FERREIRA (2006) o efluente não apresenta cor, nem odor ofensivo e contém menos sólidos totais dissolvidos quando comparados com tratamentos químicos, e como faz simultaneamente a coagulação e a flotação, gera menos lodo produzido, comparado com os processos convencionais.

Necessita de uma pequena área de instalação e operação, e tem um baixo custo de instalação da unidade piloto;

Segundo FIGUEIREDO *et al.*, 1993 existe a perspectiva de reutilização de alguns compostos recuperados das águas residuárias.

Existe um controle do fluxo de bolhas, pois, variando a densidade de corrente possibilita-se variar a concentração do gás no meio, aumentando assim a colisão das bolhas.

A seleção apropriada do material do eletrodo e das condições da solução permite obter ótimos resultados para processos específicos de separação. (HOSNY, 1996; MOLLAH, *et al.*, 2004).

Para eliminação das concentrações residuais de cromo o método eletrolítico apresenta uma grande vantagem:

O cromo hexavalente não é precipitado por hidróxido de ferro ou alumínio. Para que ocorra precipitação do cromo é necessário transformar o cromo hexavalente na forma trivalente. No processo convencional essa transformação é realizada pela acidificação do meio a baixos valores de pH, enquanto que no processo eletrolítico o cromo hexavalente é convertido à cromo trivalente em qualquer valor de pH (DROSTE, 1997; MURUGANANTHAN *et al.*, 2004 a).

2.3.3.2 – COMPARAÇÃO ENTRE ELETROFLOTAÇÃO E TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO CONVENCIONAL

MOSTEFA & TIR (2004) avaliaram a eficiência de remoção de óleo por eletroflotação, utilizando eletrodos de aço inox, em uma emulsão de óleo de corte contendo 80% de óleo mineral, 10% de surfactantes e 6% de co-surfactantes e 4% de outros aditivos. Os resultados foram comparados àqueles obtidos pela adição de sulfato de ferro hidratado, sulfato de alumínio hidratado e poliacrilamida como agentes floculantes.

Os resultados mostraram que o tratamento por eletroflotação é mais efetivo para este tipo de amostra para menores concentrações de óleo, sendo que a adição de agentes floculantes é recomendada para amostras com concentrações de óleo mais elevadas, podendo ser utilizada como etapa de pré-tratamento (Figura 21).

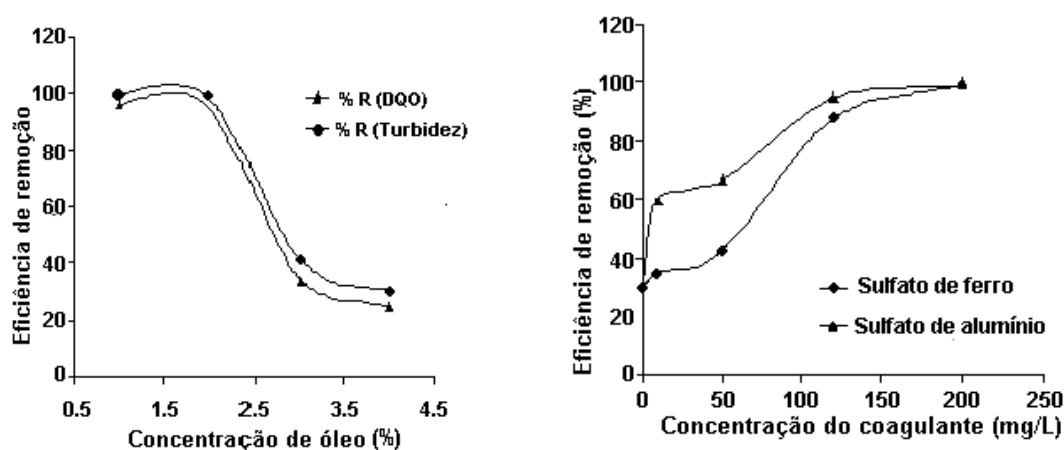


Figura 21 – (a) Efeito da concentração de óleo na emulsão na eficiência de remoção pelo tratamento por eletroflotação. (b) Efeito do agente coagulante na eficiência de redução dos valores de turbidez (MOSTEFA & TIR, 2004).

Em outro estudo foi utilizado o efluente de uma indústria de alimentos contendo óleo, comparando-se a eficiência da eletroflotação e da sedimentação por dosagem química de sulfato de alumínio comercial e polímero aniônico. A Figura 22 apresenta os resultados para a sedimentação e a Eletroflotação, tendo em vista a eficiência de redução (k (%)) para os parâmetros turbidez, DBO, óleos e graxas e carbono orgânico total (COT), zinco, manganês, cobre e ferro.

Para esse tipo de efluente a eletroflotação mostrou-se uma técnica mais eficiente, comparada ao tratamento convencional por sedimentação, com adição de auxiliares de coagulação (CRESPILHO & REZENDE, 2004).

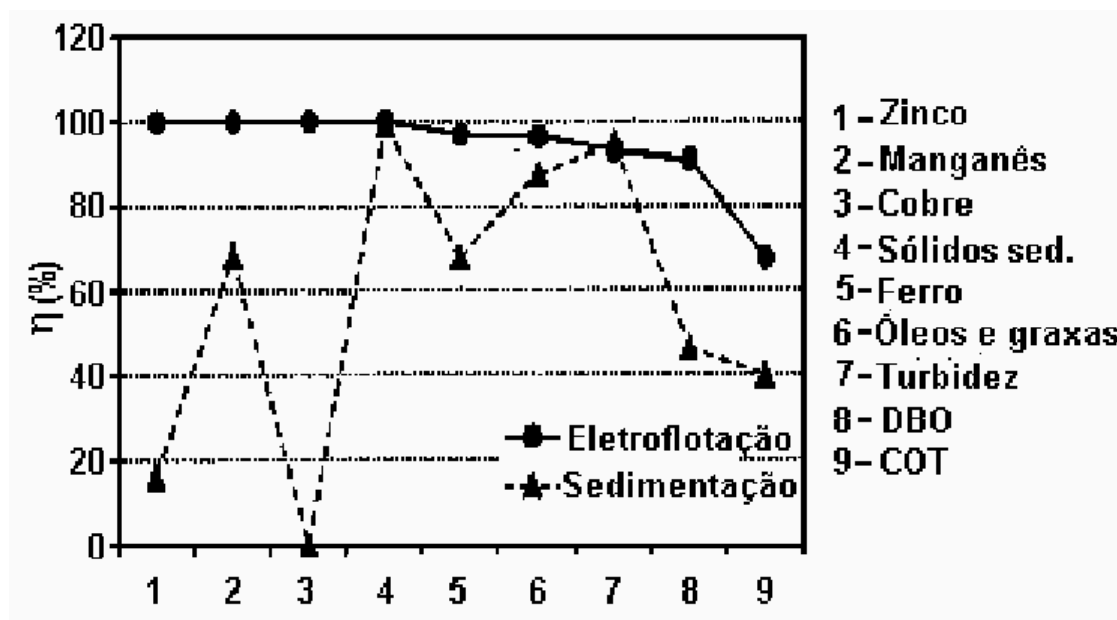


Figura 22 – Eficiência da remoção dos contaminantes para a Eletroflotação e sedimentação (CRESPILHO & REZENDE, 2004).

2.3.3.3 – COMPARAÇÃO ENTRE ELETROFLOTAÇÃO E TRATAMENTO POR LODOS ATIVADOS

CERQUEIRA (2006) apresentou resultados comparativos de custo e benefício entre processos de tratamento eletrolítico e de lodos ativados.

A Tabela 22 mostra uma síntese das informações relevantes sobre os dois processos utilizados em tratamento de esgotos sanitários.

Em termos de consumo de energia e do tempo de retenção hidráulica do processo eletrolítico, o investimento mostra-se significativamente menor que a média associada ao processo de lodos ativados e suas variantes.

Toxicidade provocada por metais pesados e outras substâncias no processo de lodos ativados pode tornar o processo inoperante. No processo eletrolítico, pode ser considerado irrelevante, já que a base de funcionamento do processo é de caráter eletroquímico.

O pH ótimo de operação dos processos de lodos ativados situa-se em torno da neutralidade, podendo variar, entretanto, de 5 a 9, sendo que as variações bruscas podem causar danos ao lodo e, conseqüentemente, ao processo. No processo eletrolítico, o pH pode variar entre 4 e 10, alterando apenas o consumo de energia, ajustando-se facilmente a mudanças bruscas.

Em função de seu pequeno tempo de retenção hidráulica, o processo eletrolítico demanda o uso de áreas menores e reatores compactos, inclusive com características de mobilidade para atendimento a diversas áreas se a planta geradora dos despejos funcionarem por batelada, o que lhe confere grande flexibilidade.

TABELA 22 - COMPARAÇÃO ENTRE O PROCESSO ELETROLÍTICO E LODOS ATIVADOS NO TRATAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS.

Fatores	Eletrolítico	Lodos Ativados (média)
Investimento (%)	70	100
Consumo de Energia (kWh m ³)	0,15	0,4
Tempo de retenção no reator (h)	0,5	7,5
Toxidez (sensibilidade)	Pouco sensível	Muito sensível
Sensibilidade a mudanças de pH	Baixa	Alta
Flexibilidade (localização/tipo de efluente)	Alta	Baixa
Salinidade elevada	Melhora a eficiência	Muito sensível
Temperatura	Suporta flutuação	Faixa estreita
Volume de lodo úmido (comparativo)	33	100
Remoção de nitrogênio total (%)	65	40
Remoção de fosfatos (%)	99,7	45
Remoção de DBO (%)	80	90
Remoção de DQO (%)	80	90

Fonte: Tabela montada a partir de dados de VON SPERLING (1996), RAMALHO (1991), WIENDL (1985) e LEITÃO & PIRES, (1991) – Citados por CERQUEIRA (2006).

Com relação à salinidade, os processos de lodos ativados, baseados na degradação feita por microrganismos, podem ser afetados por correntes de efluente de alta salinidade, enquanto que no processo eletrolítico a salinidade elevada aumenta a condutividade do efluente, melhorando a eficiência do processo;

Quanto à geração de lodo úmido, constata-se que o tratamento eletrolítico gera 33% do lodo gerado do processo de lodos ativados; A remoção de nitrogênio total e de fosfatos no processo de lodos ativados é significativamente inferior à do processo eletrolítico;

Com relação à remoção de DBO e DQO, o processo de lodos ativados, em geral, tem maior eficiência de remoção (CERQUEIRA, 2006).

2.3.3.4 – DESVANTAGENS DA ELETROFLOTAÇÃO

- Os eletrodos precisam ser substituídos regularmente, caso sofram passivação;
- O uso de eletricidade pode ser caro em alguns lugares;
- Um filme de óxido impermeável pode ser formado no cátodo, conduzindo à perda de eficiência da unidade;
- É requerida alta condutividade do efluente (CRESPILHO & REZENDE, 2004).

3. – MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados no desenvolvimento deste trabalho incluem os principais reagentes e equipamentos. A metodologia empregada para a elaboração dos ensaios executados é descrita detalhadamente neste item.

3.1 – COLETA E PRESERVAÇÃO DAS AMOSTRAS

3.1.1 – COLETA DOS EFLUENTES

O efluente industrial foi gentilmente cedido pela empresa *CS Comércio e Beneficiamentos Têxteis Ltda.*, localizada na cidade de Guarulhos em São Paulo, as amostragens para caracterização dos efluentes foram coletadas diretamente na entrada do sistema de tratamento.

Chamamos de efluente bruto aquele que é proveniente do processo industrial, coletado no tanque de equalização, antes do tratamento físico-químico.

Na Figura 23 pode-se observar o ponto de coleta do efluente bruto que será tratado neste trabalho.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 23: (a) Ponto de coleta do efluente; (b) tanque receptor do efluente, (c) e (d) tanque de correção de pH.

As amostras utilizadas para caracterização dos efluentes e realização dos experimentos de eletrofloculação foram coletados em bombonas de polietileno com capacidade de 50 litros em 4 amostragens, em dias diferentes.

O efluente bruto foi utilizado para os testes iniciais (planejamento estatístico) utilizando eletrodos de aço inox, ferro e alumínio.

3.1.2 – PRESERVAÇÃO DAS AMOSTRAS

O efluente tratado foi distribuído em recipientes de 600 ml e de 2 litros e armazenado em freezer (2°C), para que as características dos mesmos fossem preservadas o máximo possível, utilizando-se dos critérios apresentados na tabela 23.

Tabela 23 – Critérios de volume, preservação, acondicionamento e prazo de análise em amostras de efluente.

Parâmetro	Tipo de frasco	Volume Mínimo de Amostras (ml)	Preservação	Tempo máximo recomendado para o início da análise
pH	Polietileno	50	Não requer (análise imediata)	0,25 horas
Condutividade	Polietileno	500	Refrigeração 4 +/- 2 °C	48 horas
DQO	Polietileno	100	Adição de H ₂ SO ₄ até pH<2	7 dias
Sólidos Totais	Polietileno	200	Refrigeração 4 +/- 2 °C	7 dias
Turbidez	Polietileno	100	Refrigeração 4 +/- 2 °C	48 horas
Metais e outros elementos	Polietileno	100	Adição de HNO ₃ até pH<2	6 meses

Fonte: APHA, 2005.

3.1.3 – COLETA E PRESERVAÇÃO DAS AMOSTRAS TRATADAS.

A coleta das amostras foi realizada na altura média do reator eletrolítico em experimento, utilizando amostras do efluente clarificado, descartando-se o sobrenadante e o sedimento, para que houvesse uma maior homogeneidade dos resultados, de modo a não haver interferência nem da camada de espuma nem do sedimento que vai se formando.

Como os experimentos foram feitos em duas etapas, a primeira tratou o efluente bruto em seu pior estado, e a segunda tratou um efluente simulado.

No caso do efluente bruto o tratamento teve duração de 6 horas, sendo retirada amostra para análise a cada 60 minutos de tratamento, para testes de pH, condutividade, temperatura. Os Sólidos Totais, DQO e a DBO₅ e Turbidez foram medidos tanto no início como no final do tratamento.

No que diz respeito ao efluente simulado, obteve-se resultados muito positivos, sendo necessário apenas 1 hora de tratamento com retirada de amostra a cada 10 minutos, testando então o pH, a condutividade e a temperatura. No final do processo também foi feita a análise de DQO e DBO₅.

No processo de separação do efluente clarificado, uma pequena quantidade de sólidos do sobrenadante e do sedimento misturou-se às amostras. Para evitar a interferência desses sólidos na avaliação do processo, as amostras foram decantadas naturalmente por 12 horas em frascos de polietileno, com capacidade de 2 litros e 600 ml, tomando-se para análise as alíquotas clarificadas após a decantação.

As amostras separadas para realização das análises foram acondicionadas e preservadas de acordo com os critérios apresentados na Tabela 23.

3.2 – REATOR DE ELETROFLOTAÇÃO

Para realização dos experimentos de eletroflotação foi utilizado um reator em batelada, utilizando um reservatório de polietileno com altura de 33 cm, largura de 33 cm e comprimento de 52 cm, totalizando um volume tratado de 50 litros.

No fundo da cuba, adaptou-se uma torneira para a retirada do sedimento. Na parte superior foi adaptado um suporte para posicionar os eletrodos, para que os mesmos não ficassem muito próximos ao fundo do reservatório. Este mesmo suporte foi usado para adaptar uma mangueira de 15 cm para coleta de amostras, conforme pode ser observado na figura 24:

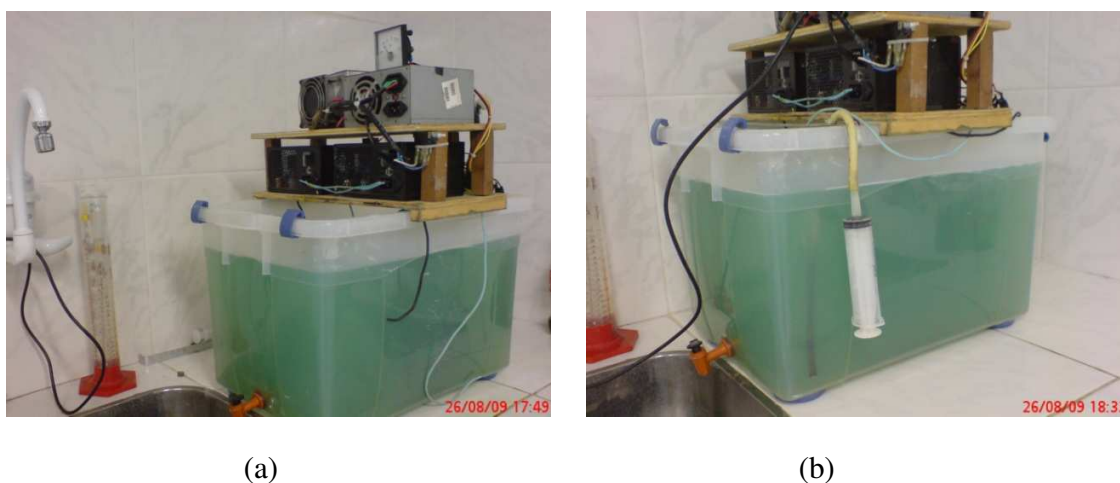


Figura 24: (a) reator eletrolítico; (b): detalhe da seringa para retirada de amostras

Utilizou-se uma fonte de alimentação com 3 fontes ligadas em série, podendo gerar um total de 15 V de tensão. Também foi utilizado um limitador de amperagem, para que o sistema tivesse carga máxima de 20 A. de corrente. Com isso, a potência máxima gerada foi de 300 Watts. Foram utilizados um amperímetro e um voltímetro, da marca Mimipa ET 3810, para acompanhar esse processo, conforme pode-se visualizar na Figura 25.



(a)



(b)

Figura 25: (a) sistema de fontes em série; (b) amperímetro

Foram empregados eletrodos de três materiais diferentes, aço inox, ferro e alumínio, sendo eles planos e paralelos com as seguintes medidas: altura de 18 cm, largura de 12 cm e espessura de 2,0 mm, obtendo assim uma área superficial das placas de $216,0 \text{ cm}^2$.

Cada colméia era composta por 4 ânodos e 4 cátodos, intercalados e espaçados em 2,5 cm, sendo a área efetiva de cada eletrodo de 180 cm^2 , proporcionando uma área total de tratamento de 1260 cm^2 .

Para sustentação e facilidade no contato elétrico, foram adaptadas nas extremidades da colméia duas placas de acrílico, com as seguintes dimensões: 13,0 x 25,0 x 0,3cm.

As placas foram justapostas em forma de colméia, conforme Figura 26 e o reator seguiu o modelo da Figura 27.

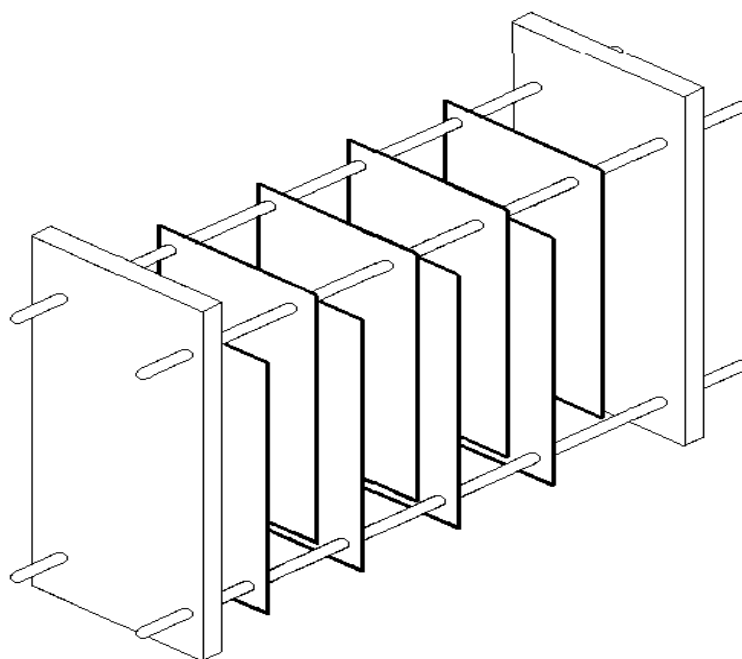


Figura 26: Esquema de montagem dos eletrodos em forma de colméia

Fonte: FERREIRA (2006)

Na Figura 27 observa-se um desenho esquemático do reator em escala de bancada.

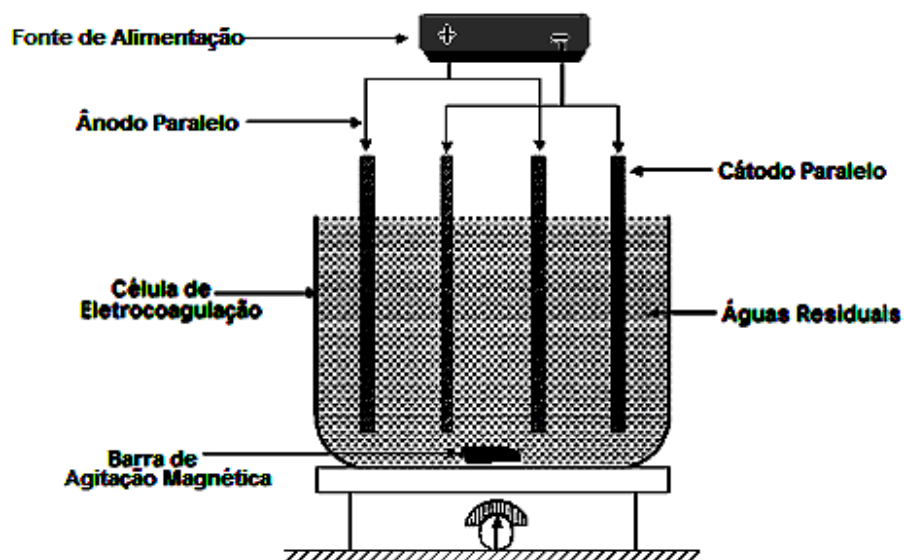


Figura 27: Desenho esquemático de um reator de eletroflotação em escala de bancada com eletrodos monoplares conectados em paralelo (MOLLAH *et al.*, 2004).

3.3 – PRINCÍPIOS DA OPERAÇÃO

Após alimentação da cuba do reator de 50L com o efluente a ser tratado, os eletrodos metálicos são polarizados por intermédio da fonte de energia e, de acordo com as condições impostas ao tratamento, ajusta-se a potência elétrica.

Após este ajuste, as amostras do efluente tratado são coletadas em intervalos de tempos. Na primeira fase, quando utilizamos o efluente em seu pior estado, o bruto, o tempo estipulado para a coleta foi de 60 min. E já na segunda fase, com o efluente simulado, o tempo para coleta de amostras é de 10 min.

Nestas amostras são medidos os seguintes parâmetros: temperatura, condutividade e pH. Amostras iniciais e finais dos tratamentos são também adequadamente acondicionadas para posterior análise como DBO, DQO Turbidez e Sólidos Sedimentáveis.

Os reagentes químicos e padrões utilizados para realização das análises e preservação das amostras apresentavam grau de pureza analítica.

3.4 – PARÂMETROS E METODOLOGIAS ANALÍTICAS

3.4.1 – PARÂMETROS FÍSICOS E QUÍMICOS

Nas determinações analíticas dos parâmetros físicos e químicos: pH, condutividade, Demanda Química de Oxigênio, Sólidos Totais (fixos e voláteis) e Turbidez, todas as metodologias utilizadas na realização destas análises foram baseadas nos procedimentos descritos no Standard Methods for Examination of Water & Wastewater (APHA, 2005).

- **pH**

As medidas de pH foram realizadas pelo método potenciométrico. Para calibração do aparelho e verificação das leituras obtidas foram utilizados padrões de 4, 7 unidades, dependendo da faixa de leitura requerida pelas amostras.

O pH foi medido através de equipamento pHmetro TEC – 3MP marca Tecnal. A Figura 28 mostra o modelo de aparelho pHmetro utilizado.



Figura 28: pHmetro.

PRINCÍPIO DO MÉTODO:

Uma membrana de fibra de vidro separa dois líquidos de diferentes concentrações de íons H^+ , desenvolve-se nos dois lados da membrana um potencial elétrico proporcional à diferença de pH entre os dois líquidos, o qual é medido em relação a um potencial de referência (eletrodo de Calomelano saturado ou eletrodo de prata/cloreto de prata). Os resultados são expressos em unidades de pH. (APHA, 2005).

- **CONDUTIVIDADE ELÉTRICA**

As medidas de condutividade foram realizadas utilizando o método da eletrometria, medida através de um condutivímetro TEC – 3MP marca Tecnal. A Figura 29 mostra o modelo de aparelho condutivímetro utilizado.

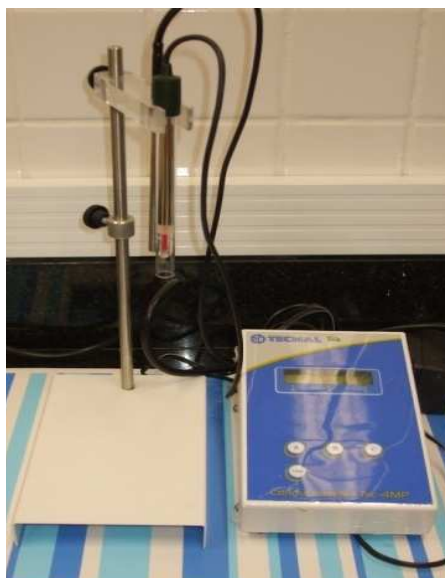


Figura 29: Condutivímetro.

Para calibração do aparelho foi utilizado padrão de cloreto de potássio na concentração 0,01 M, correspondente ao valor de $1,41 \text{ mS cm}^{-1}$. A verificação das leituras foi realizada com padrões de cloreto de potássio nas concentrações 0,1 M (equivalente a $12,9 \text{ mS cm}^{-1}$) e 0,2 M (equivalente a $25,8 \text{ mS cm}^{-1}$).

PRINCÍPIO DO MÉTODO:

Usualmente é realizada através de medida da resistência entre dois eletrodos de platina, inseridos em uma solução eletrolítica e ligados a uma fonte de eletricidade. A corrente que flui é determinada pela tensão e pela resistência oferecida por parte da solução que fica entre os dois eletrodos. Utiliza-se uma ponte de Wheatstone, na qual uma

resistência variável é ajustada de forma que seja igual à resistência da solução desconhecida entre os dois eletrodos de platina de uma célula padronizada.

É geralmente expressa em $\mu\text{S cm}^{-1}$ ou mS cm^{-1} .

- **DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO – DQO**

Para análise da Demanda Química de Oxigênio utilizou-se o método de refluxo aberto e titulometria.

Paralelamente às amostras foram analisadas amostras padrões de biftalato de potássio, equivalentes a concentrações de 1000, 5000 e 10000 $\text{mgO}_2 \text{ L}^{-1}$, respectivamente.

PRINCÍPIO DO MÉTODO:

As matérias orgânicas e inorgânicas são oxidadas por uma quantidade conhecida de um agente oxidante forte (dicromato de potássio), em meio de ácido sulfúrico a quente (150°C), em refluxo por duas horas, na presença de um catalisador de sulfato de prata e de sulfato de mercúrio, para eliminação de interferentes de cloretos. O excesso de dicromato de potássio é titulado com sulfato ferroso amoniacal, usando como indicador o ferroin. A quantidade de matéria oxidável é expressa como equivalente em oxigênio, proporcional a quantidade de dicromato consumido, expresso em $\text{mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ (APHA, 2005).

Em paralelo, é realizada uma prova em branco contendo água destilada e deionizada e submetida às mesmas condições das amostras.

Equação para cálculo da Demanda Química de Oxigênio:

$$DQO (\text{mgO}_2\text{L}^{-1}) = \frac{(A - B). M. 8000}{\text{Volume da amostra (ml)}} \quad (49)$$

Onde:

A = Volume em mL de sulfato ferroso amoniacal para titulação do branco.

B = Volume em mL de sulfato ferroso amoniacal para titulação da amostra.

M = Molaridade do sulfato ferroso amoniacal.

8000 = peso equivalente do oxigênio multiplicado por 1000 mL.L⁻¹

• DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGÊNIO – DQO

Para análise da Demanda Bioquímica de Oxigênio utilizam-se microorganismos do efluente, para verificar a degradação da matéria orgânica da amostra. Para tal, deve ser preparada uma solução contendo a amostra, o efluente e água de diluição (contendo cloreto de cálcio, sulfato de magnésio, cloreto férrico e tampão fosfato). A solução deve ser incubada a 20 °C e protegida da luz por cinco dias. Após isso, verifica-se o consumo de oxigênio na solução, utilizando-se um oxímetro.

PRINCÍPIO DO MÉTODO:

O método de DBO baseia-se no princípio de que a matéria orgânica, quando metabolizável tende a ser degradada pelos organismos aeróbios presentes, consumindo o oxigênio existente na água. Dessa forma, deverá haver sempre um limite de matéria orgânica a ser lançada no corpo receptor, para que o oxigênio dissolvido existente não seja todo consumido acarretando danos aos rios, lagos entre outros.

A DBO₅²⁰ determina qual a quantidade de oxigênio dissolvido, que uma água residuária poderia consumir em 5 dias, devido a sua degradação biológica. A fixação de tempo do teste em 5 dias deve-se ao fato de que a maior parte da matéria orgânica, devido a hidratos de carbono, já está degradada.

No teste, procura-se controlar todos os fatores (temperatura, pH, condições aeróbias e nutrientes) que possam retardar ou inibir a velocidade das reações de degradação da matéria orgânica que ocorreriam no curso da água.

Calculou-se em função da DQO da amostra, a concentração ideal para a incubação pelo seguinte método: % em concentração da amostra é igual a 1200 dividido pela DQO da amostra.

Esta concentração foi tomada como sendo a segunda diluição da amostra e mais 3 diluições foram utilizadas com concentrações próximas. O pH da amostra foi ajustado para próximo de 7, utilizando-se soluções de ácido sulfúrico 0,1 N ou hidróxido de sódio 0,1N.

Os volumes correspondentes as concentrações desejadas foram transferidos para provetas de 1000 mL, completando-se o volume com água de diluição com nutrientes e a mesma foi agitada para promover uma homogeneização adequada. Foram preparados dois frascos de DBO para cada proveta, transferindo a solução contida na proveta para cada frasco, enchendo-os até a boca e fechando-os sem deixar bolhas de ar. Os frascos com numeração foram incubados a $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ durante cinco dias.

Para determinação do oxigênio dissolvido dos frascos de número ímpar, adicionou-se 1 mL de solução de sulfato manganoso e 1 mL da solução iodeto de potássio/azida sódica, o frasco foi fechado e agitado por inversão sucessivas. Após a decantação do precipitado formado, adicionou-se 1 mL de ácido sulfúrico concentrado para dissolver o precipitado e agitou-se novamente por inversões sucessivas. Uma alíquota de 100 mL foi tomada em proveta e transferida para um erlenmeyer de 250 mL. Titulou-se com tiossulfato de sódio 0,025N até o aparecimento da cor amarelo palha. Foi adicionado 1 mL de indicador amido que tornou a solução azul e continuou-se a titulação até a viragem para incolor. O volume de tiossulfato de sódio gasto na titulação foi anotado em planilhas. Após 5 dias, foram determinados o oxigênio dissolvidos nos frascos incubados de número par, de acordo com o que foi realizado para os ímpares.

O valor da DBO é obtido pelo calculo utilizando a equação 50:

$$mg\ O_2/L\ de\ DBO = [(A - B) \times 100] / C \quad (50)$$

Onde:

A = volume de tiossulfato de sódio 0,025N gasto na titulação imediata, vezes dois, vezes o fator do tiossulfato de sódio;

B = volume de tiosulfato de sódio 0,025N gasto na titulação após 5 dias, vezes dois, vezes o fator do tiosulfato de sódio;

C = concentração em % da amostra.

O resultado escolhido é aquele, ou a média daqueles resultados, para os quais a quantidade de oxigênio, consumido durante a incubação, represente de 40 a 70% da quantidade inicial de oxigênio, seguindo a equação (51):

$$[(A - B) \times 100 / A] = \% 40 \text{ a } 70 \quad (51)$$

- **SÓLIDOS TOTAIS (ST), SÓLIDOS TOTAIS FIXOS (STF) E SÓLIDOS TOTAIS VOLÁTEIS (STV)**

A análise dos teores de sólidos foi realizada através do método gravimétrico e os resultados expressos em mg L^{-1} .

Padrões de cloreto de sódio (NaCl) em concentrações de 5000, 10000 e 15000 mg L^{-1} foram analisados em paralelo às amostras dos efluentes.

PRINCÍPIO DO MÉTODO:

SÓLIDOS TOTAIS (ST): Uma porção homogênea de amostra evaporada em um banho de vapor é seca em estufa a uma temperatura de $105 \pm 2^\circ\text{C}$. A diferença entre a massa final do recipiente após a evaporação e secagem da amostra (P2) e a massa do recipiente vazio (P1) representa os sólidos totais (Equação 52).

$$ST (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}) = \frac{(P_2 - P_1) \cdot 1000}{\text{Volume da amostra (ml)}} \quad (52)$$

Onde:

ST = Sólidos Totais

P₁ = massa do recipiente vazio em gramas

P₂ = massa do recipiente após a evaporação da amostra a 105 +/- 2 °C, em gramas.

SÓLIDOS TOTAIS FIXOS (STF): O sólido obtido na determinação do resíduo total é submetido à ignição a 550 +/- 20°C. A diferença entre a massa final do recipiente após a calcinação da amostra (P₃) e a massa do recipiente vazio (P₁) representa os sólidos totais fixos (Equação 53).

$$STF (mg.L^{-1}) = \frac{(P_3 - P_1).1000}{Volume da amostra (ml)} \quad (53)$$

Onde:

ST = Sólidos Totais

P₁ = massa do recipiente vazio em gramas

P₃ = massa do recipiente após a calcinação da amostra a 550 +/- 20 °C, em gramas.

SÓLIDOS TOTAIS VOLÁTEIS (STV): É obtido pela diferença entre sólidos totais e sólidos totais fixos, expressa pela Equação 52 (APHA, 2005; HAMMER, 1979).

$$STV (mg.L^{-1}) = ST (mg.L^{-1}) - STF (mg.L^{-1}) \quad (54)$$

- **TURBIDEZ**

Para as determinações de turbidez utilizou-se o aparelho turbidímetro, marca Tecnal modelo TB1000 e o método nefelométrico.

Os resultados foram expressos em NTU (Unidade Nefelométrica de Turbidez).

Padrões diluídos a partir de uma solução de formazina de 4000 NTU, equivalentes a 10, 50 100, 500 e 1000 NTU foram analisados paralelamente às amostras dos efluentes.

PRINCÍPIO DO MÉTODO:

A medida de turbidez representa a redução da transparência de uma amostra devido à presença de material em suspensão. Baseia-se na comparação da leitura da intensidade da luz dispersa pela amostra sob condições definidas e a intensidade da luz dispersa por uma solução padrão, sob as mesmas condições. Uma suspensão de polímero formazina é utilizada como padrão primário de referência (APHA,2005).

- **COR:**

Método colorimétrico, onde o instrumento usado na espectroscopia UV/VIS é chamado de **espectrofotômetro** e tendo como medidas a absorbância. As leituras de absorbâncias foram obtidas por um espectrofotômetro UV visível Beckman Du 640 (Figura 30).



Figura 30: Espectrofotômetro

PRINCÍPIO DO MÉTODO:

Método utilizado para determinar de um modo quantitativo a concentração de substâncias em solução que absorvem radiação, utiliza-se a Lei de *Beer-Lambert*:

$$A = -\log_{10}(I/I_0) = \epsilon \cdot c \cdot L \quad (55)$$

Onde:

A é a absorvância medida;

I_0 é a intensidade da luz incidente a um dado comprimento de onda;

I é a intensidade transmitida pela amostra;

L é o caminho óptico pela amostra (distância que a luz percorreu por ela),

ϵ é uma constante conhecida como absorbtividade molar (a qual varia de substância para substância)

c é a concentração da substância.

A absorvância e ϵ às vezes são definidos em termos do logaritmo natural em vez do logaritmo na base 10.

Para se obter informação sobre a absorção de uma amostra, ela é inserida no caminho óptico do aparelho. Então, luz UV e/ou visível em um certo comprimento de onda (ou uma faixa de comprimentos de ondas) é passada pela amostra.

O espectrofotômetro mede o quanto de luz foi absorvida pela amostra. A intensidade da luz antes de passar pela amostra é simbolizada por I_0 , e a intensidade da luz depois de passar pela amostra é simbolizada por I .

A transmitância da amostra é definida pela razão (I / I_0), a qual normalmente é expressa em porcentagem de transmitância (%T). A partir dessa informação, a absorvância da amostra é determinada para esse certo comprimento de onda ou como uma função de uma faixa de comprimentos de onda. Os espectrofotômetros mais sofisticados normalmente fazem isso automaticamente.

Apesar de as amostras poderem ser sólidas (ou mesmo gasosas), elas usualmente são líquidas. Uma cela transparente (ou seja, que não absorve radiação na faixa de comprimentos de onda usada), comumente chamada de *cuvete*, é enchida com a amostra líquida e inserida no espectrofotômetro. O caminho óptico L é a largura da cuvette. Espectrofotômetros mais sofisticados usam cuvetes retangulares, geralmente com uma largura de 1 cm. Para espectroscopia apenas no visível, simples cuvetes de vidro podem ser usadas, porém a espectroscopia no ultravioleta requer cuvetes especiais feitas de um material que (ao contrário do vidro) não absorva luz UV, como o quartzo.

4. – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 – OBJETIVOS

Neste trabalho destacam-se dois focos principais:

1º) A remoção da cor do efluente têxtil, já que este é um dos grandes problemas para a tinturaria, visto que, elas cada vez mais terão que se adequar as normas e leis de descarte, e este é também um grande problema para o meio ambiente de forma geral;

2º) Realizar testes comparativos de materiais para os eletrodos, para descobrir qual o mais eficaz e eficiente em relação ao método utilizado.

4.2 – PROBLEMAS E SOLUÇÕES

Nos primeiros ensaios, foram detectados problemas em relação à fonte, pois, a mesma entrava em curto-circuito, o que resultava na queima da mesma.

A princípio, foi testado um delimitador de corrente e concluiu-se que a amperagem do processo estava subindo demais, o que ocasionava o curto-circuito, porém, mesmo utilizando o delimitador problema persistiu.

A resposta estava na escala do projeto. Como foi feita uma batelada de 50 L de efluente, já não pode ser chamada de escala laboratorial. O que ocorreu foi que o material decantado, por ser num volume grande, atingia as placas dos eletrodos fazendo com que elas entrassem em curto-circuito e queimassem a fonte.

Para solucionar definitivamente tal inconveniente, elevou-se a colméia de eletrodos, girando-a em 90°. Assim, mantendo-se a mesma área, não haveria mais contato nem com o decantado nem com o sobrenadante.

Outro problema que foi verificado foi a passivação. Para retardar este efeito, fez-se a inversão periódica da polaridade. Segundo MOLLAH *et al.* (2001), a vida útil de um

eletrodo pode ser aumentada em até duas vezes e a resistividade diminuída pela inversão de polaridade. Com a inversão de polaridade, o eletrodo que se comporta como um cátodo, por certo tempo, passa a se comportar como um ânodo.

O teste foi feito sem trocar a polaridade para ver o resultado:

Abaixo na Figura 31 vemos o resultado da não inversão da polaridade feito na colméia de Alumínio.



(a)



(b)

Figura 31: Placas de alumínio corroídas pela eletrólise.

Pode-se observar que, os eletrodos, que serviram como ânodo, foram corroídas pelas reações de oxidação, por isso passou-se a utilizar a inversão de polaridade, que foi realizada, neste estudo, de hora em hora.

Também, nos primeiros ensaios em batelada realizados para este trabalho, com o objetivo de determinar quais os melhores materiais para os eletrodos, observou-se que os eletrodos de Aço Inox, dispostos em colméia, não tinham bom rendimento. Mesmo após 6 horas, submetidas ao reator, o resultado para remoção de cor foi indesejável ($\eta < 30\%$), o que permitiu descartar o uso deste material. Vale salientar que, o eletrodo de aço inox é inadequado para efluente têxtil, isso não quer dizer que não possa ser usado e com bom rendimento em outros tipos de efluentes. A partir desta constatação, nos demais ensaios, utilizou-se dos eletrodos de Ferro e Alumínio.

4.3 – RESULTADOS

Com o descarte do aço inox, testaram-se os outros dois materiais. Os primeiros testes foram feitos utilizando eletrodos de alumínio, depois foram feitos os mesmos testes com eletrodos de ferro. Na sequência, os testes foram feitos com os dois materiais utilizando dois reatores distintos, tratando o efluente bruto, primeiro com eletrodos de ferro, durante três horas, e no segundo reator utilizando eletrodos de alumínio durante três horas.

Verificada a eficiência do método foi feita a análise, inicialmente a cada hora, dos parâmetros de pH, condutividade, temperatura e cor. A DQO, DBO e Sólidos Sedimentáveis foram analisados antes de iniciar o tratamento e no final dele.

Para melhor compreensão dos ensaios realizados, foram divididos neste trabalho, os resultados obtidos com os diferentes materiais de eletrodos e suas combinações.

4.3.1 – ENSAIO COM ELETRODOS DE ALUMÍNIO

Os resultados obtidos, para os parâmetros de pH, condutividade e temperatura, no ensaio com eletrodos de alumínio, estão expressos na tabela 24:

TABELA 24: RESULTADOS DO ENSAIO COM ELETRODOS DE ALUMÍNIO

Ensaio Placa de Alumínio	pH	Condutividade ($\mu\text{S/cm}$)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
Amostra sem tratamento	10,03	3,251	27
Após 1 hora	10,07	3,170	28
Após 2 horas	10,12	3,080	31
Após 3 horas	10,17	3,189	32
Após 1 horas 2ª Cuba	10,52	3,101	34
Após 2 horas 2ª Cuba	10,75	3,236	33
Amostra Final após 3 horas 2ª Cuba	10,68	3,265	34

À seguir, as Figuras 32 a 34 referem-se à tabela 24, de onde foram extraídos os seguintes gráficos:

- pH x Tempo
- Condutividade x Tempo
- Temperatura x Tempo

- **COMPORTAMENTO DO pH EM FUNÇÃO DO TEMPO**

Na Figura 32, tem-se o comportamento do pH das amostras retiradas de hora em hora.

pH:

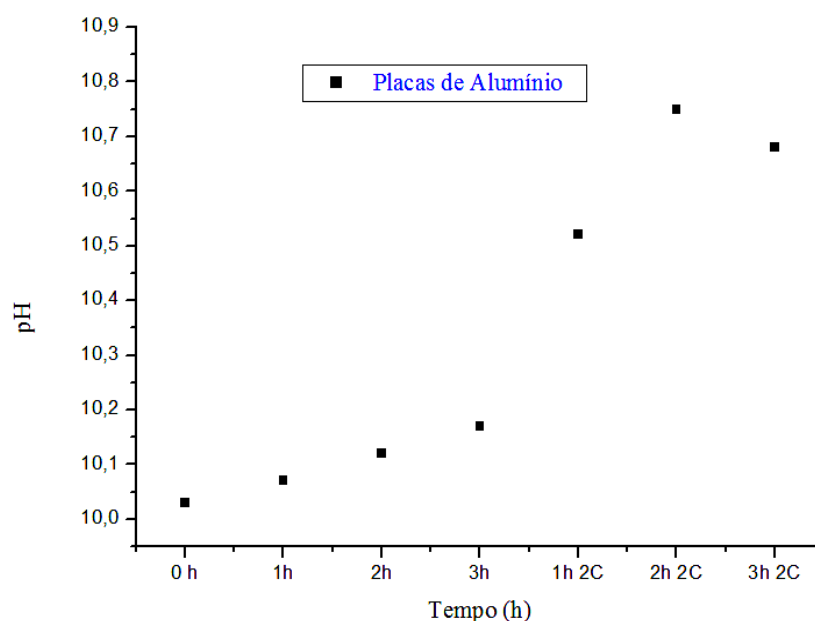


Figura 32: pH em função do tempo do efluente tratado com eletrodos de alumínio

Pelo gráfico, nota-se que o pH tende a aumentar, tornando o meio mais básico. No efluente bruto, registrou seu pH como sendo o ponto mínimo num valor de $\text{pH} = 10,03$, chegando até o valor máximo de $\text{pH} = 10,75$, o que revela uma tendência a um leve aumento do pH, e depois a se estabilizar.

- **COMPORTAMENTO DA CONDUTIVIDADE EM FUNÇÃO DO TEMPO**

Na Figura 33 tem-se o comportamento da condutividade das amostras retiradas de hora em hora

CONDUTIVIDADE:

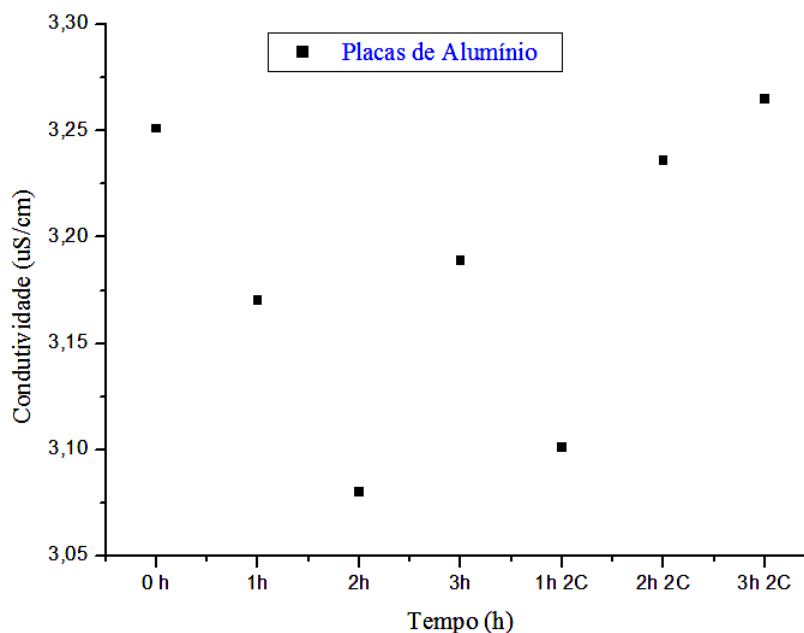


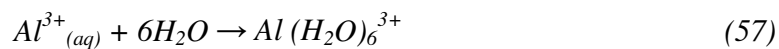
Figura 33: Condutividade em função do tempo do efluente tratado com eletrodos de alumínio

A condutividade é alta, isto ocorre porque, no efluente têxtil, um dos elementos do caudal é o sal (NaCl), que tem a função de fixador de cor no tecido, e nota-se que com o tratamento de eletroflotação, esta condutividade cai nas primeiras horas. Isto pode estar relacionado com a remoção dos sólidos decantados e do sobrenadante do efluente. O posterior aumento pode estar associado ao desprendimento de íons metálicos dos eletrodos de alumínio, conforme reações abaixo:

Oxidação do Al sólido (reação anódica):



Solvatação do cátion (reação catódica):



- **COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO TEMPO**

Na Figura 34 tem-se o comportamento da temperatura das amostras retiradas de hora em hora

TEMPERATURA:

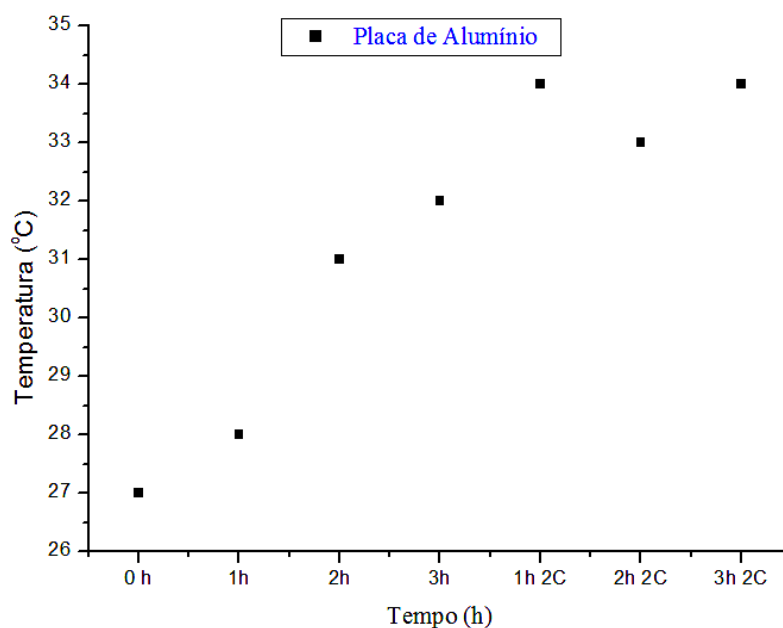


Figura 34: Temperatura em função do tempo do efluente tratado com eletrodos de alumínio

Nota-se que a temperatura do efluente aumentou 7 °C, o aumento da temperatura da solução contribui para melhorar a eficiência de remoção, pois provoca a movimentação dos íons produzidos, o que facilita a colisão deles com o coagulante formado.

Destes gráficos podemos tirar os seguintes resultados: no tratamento do efluente utilizando os eletrodos de alumínio tivemos um aumento de pH (6,5%), uma variação na condutividade mas com resultado final praticamente estável (0,4%) e um aumento na temperatura significativo (26%).

A seguir as Figuras 35 e 36 referem-se ao estudo espectrofotométrico deste efluente tratado com eletrodos de alumínio.

4.3.1.2 – ESTUDO ESPECTROFOTOMÉTRICO DO EFLUENTE TRATADO COM ELETRODOS DE ALUMÍNIO:

Na figura 35 tem-se o comportamento espectrofotométrico do efluente em seu estado bruto (sem tratamento).

EFLUENTE BRUTO (EB):

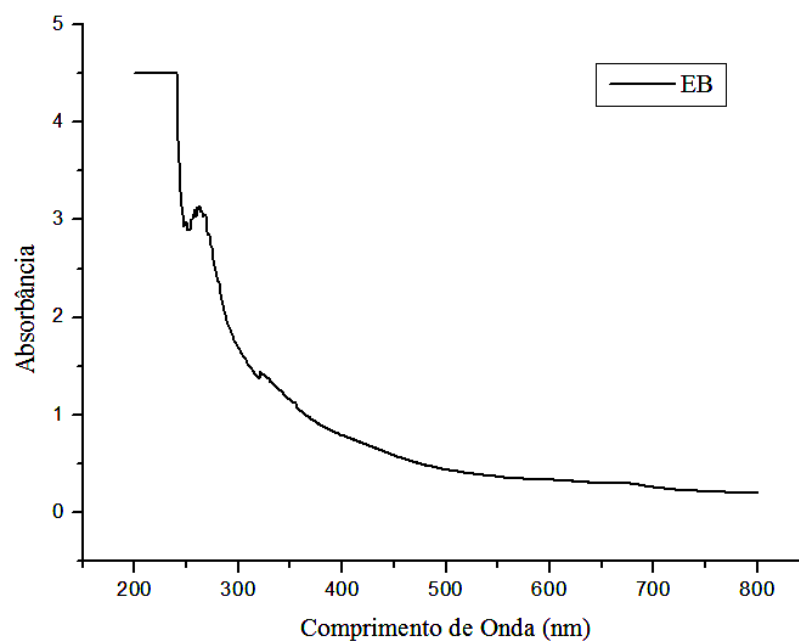


Figura 35: Absorbância em função do comprimento de onda do Efluente não tratado

Na figura 36 tem-se o comportamento espectrofotométrico do efluente após o tratamento de eletroflotação.

TRATAMENTO FINAL:

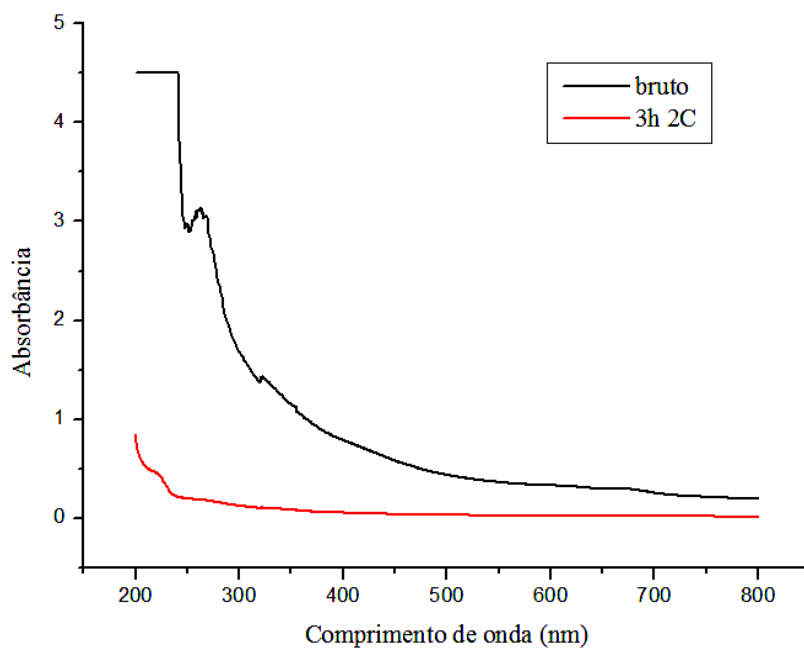


Figura 36: Absorbância em função do comprimento de onda do Efluente tratado

Pode-se observar uma queda significativa na cor do efluente, utilizando os picos encontrados no valor de $\lambda = 260$ nm onde temos uma Absorbância do efluente bruto de 3,1247 e no efluente tratado a Absorbância é de 0,1891, o que dá uma eficiência de remoção de cor de $\eta = 94\%$ e na espectro do visível no $\lambda = 630$ nm onde temos uma absorbância do efluente bruto de 0,3133 e do efluente tratado é de 0,0267, o que dá uma eficiência de remoção de cor de $\eta = 92\%$.

4.3.2 – ENSAIO COM ELETRODOS DE FERRO

Os resultados obtidos, para os parâmetros de pH, condutividade e temperatura, no ensaio com eletrodos de ferro, estão expressos na tabela 25:

TABELA 25: RESULTADOS DO ENSAIO COM ELETRODOS DE FERRO

Ensaio Placa de Ferro	pH	Condutividade ($\mu\text{S/cm}$)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
Amostra sem tratamento	6,41	9,011	28
Após 1 hora	7,80	7,621	30
Após 2 horas	10,90	8,062	33
Após 3 horas	11,05	8,126	32
Após 1 horas 2ª Cuba	8,54	3,744	36
Após 2 horas 2ª Cuba	8,25	3,612	37
Amostra Final após 3 horas 2ª Cuba	8,17	7,789	41

A seguir as Figuras 37 a 39 referem-se à tabela 25, de onde foram extraídos os seguintes gráficos:

- pH x Tempo
- Condutividade x Tempo
- Temperatura x Tempo

- **COMPORTAMENTO DO pH EM FUNÇÃO DO TEMPO**

Na Figura 37 tem-se o comportamento do pH das amostras retiradas de hora em hora

pH:

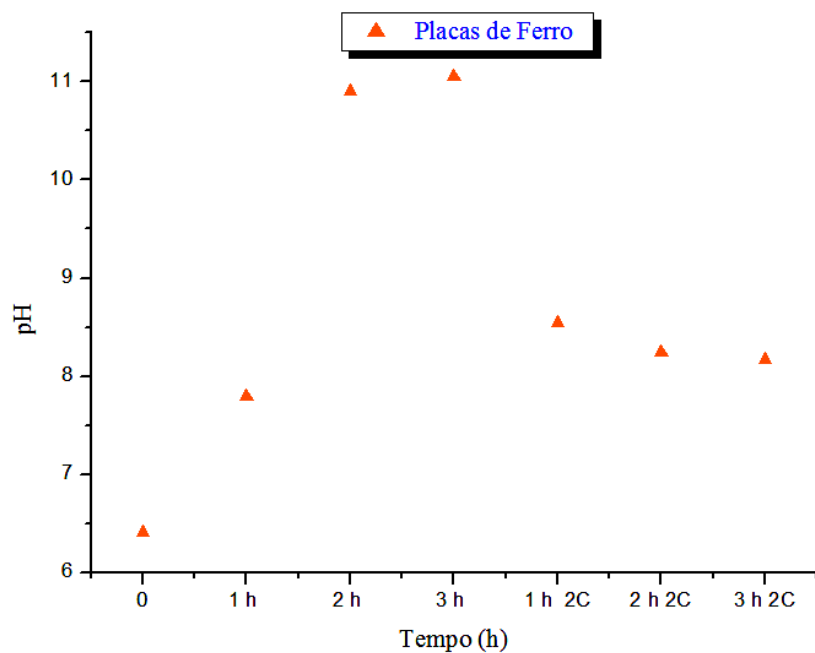


Figura 37: pH em função do tempo do efluente tratado com eletrodos de Ferro

Pelo gráfico, nota-se que o pH, à principio, tende a aumentar, saindo de um meio levemente ácido e tornando o meio muito básico, chegando ao pico de pH = 11,05, porém com o tratamento ele tem uma queda, ocorrida provavelmente devido à limpeza dos sedimentos e sobrenadantes do reator, feito isso percebe-se uma tendência a estabilização.

- **COMPORTAMENTO DA CONDUTIVIDADE EM FUNÇÃO DO TEMPO**

Na Figura 38 tem-se o comportamento da condutividade das amostras retiradas de hora em hora

CONDUTIVIDADE:

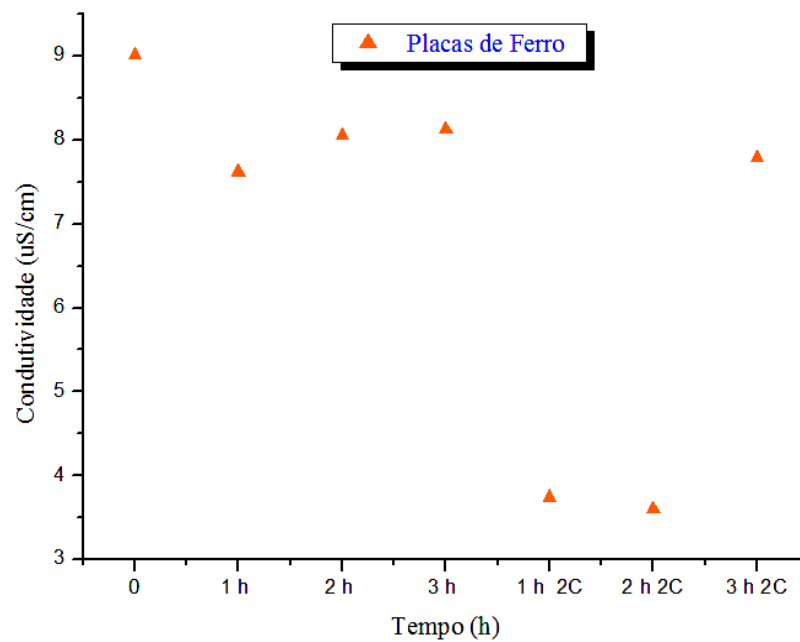


Figura 38: Condutividade em função do tempo do efluente tratado com eletrodos de Ferro

Assim como no efluente tratado com alumínio, a condutividade é alta, devido ao sal (NaCl) utilizado como fixador de cor no tecido. Nota-se, inicialmente, que esta condutividade tem uma tendência de estabilidade e após 3 h de tratamento de eletroflotação esta condutividade cai, e isso pode estar relacionado com a remoção dos sólidos decantados e do sobrenadante no reator.

- **COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO TEMPO**

Na Figura 39 tem-se o comportamento da condutividade das amostras retiradas de hora em hora

TEMPERATURA:

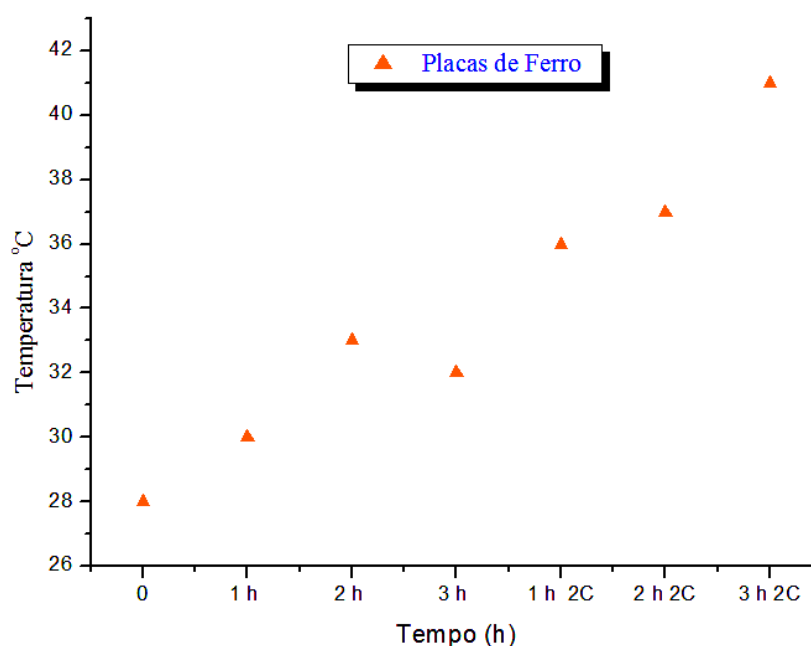


Figura 39: Temperatura em função do tempo do efluente tratado com eletrodos de Ferro.

Nota-se que a temperatura do efluente aumentou 13 °C, e que este aumento contribuiu para melhorar a eficiência de remoção, pois provocou a movimentação dos íons produzidos, o que facilitou a colisão deles com o coagulante formado.

Destes gráficos, tiram-se os seguintes resultados: no tratamento do efluente bruto, utilizando os eletrodos de Ferro, tivemos um variação significativa no pH, mas que no final representou um aumento (27,5%), em relação ao pH inicial. Foi obtido também uma variação significativa na condutividade durante o processo, e tendo como resultado final uma queda (-13,6%) e um aumento na temperatura significativo (46%).

4.3.2.1 – ESPECTROFOTOMÉTRICO DO EFLUENTE TRATADO COM ELETRODOS DE FERRO:

A seguir, as Figuras 40 e 41 referem-se ao estudo espectrofotométrico do efluente tratado com eletrodos de Ferro.

Na figura 40, tem-se o comportamento espectrofotométrico do efluente em seu estado bruto (sem tratamento):

EFLUENTE BRUTO (EB):

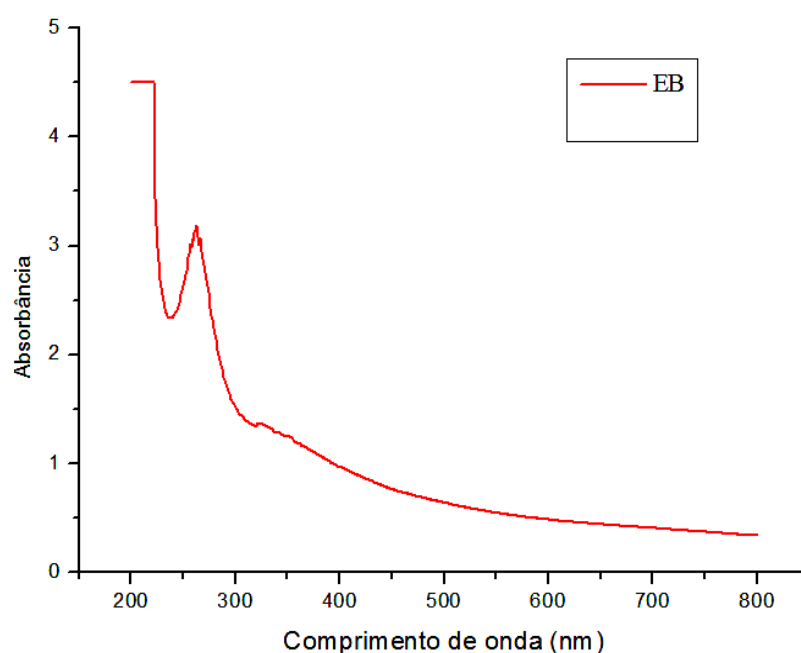


Figura 40: Absorbância em função do comprimento de onda do Efluente não tratado.

Na figura 41, tem-se o comportamento espectrofotométrico do efluente já tratado:

TRATAMENTO FINAL:

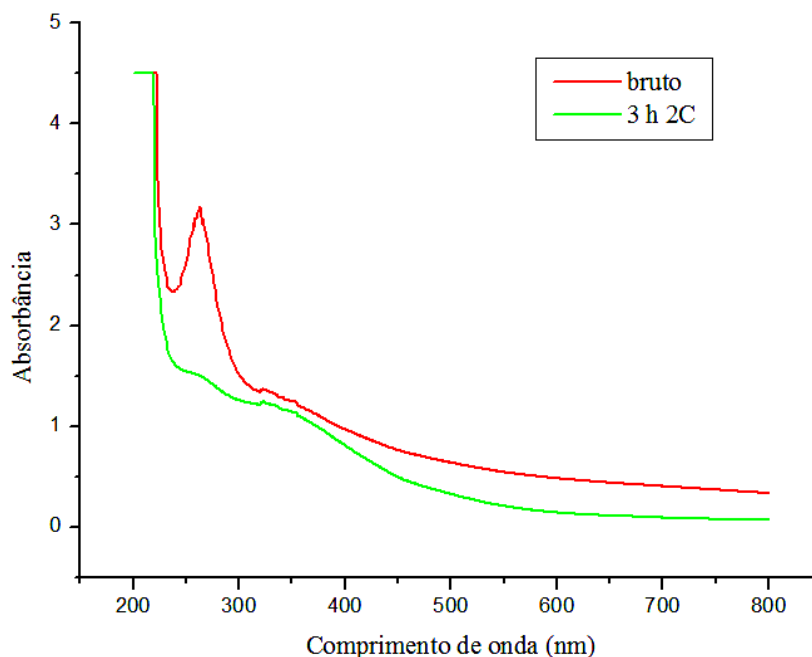
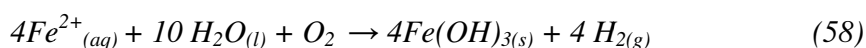


Figura 41: Absorbância em função do comprimento de onda do Efluente tratado.

No caso do tratamento com efluente de ferro, não foi obtida uma queda significativa na cor do efluente. Utilizando os picos encontrados no valor de $\lambda = 260$ nm, tem-se uma Absorbância do efluente bruto de 3,0521 e do tratado tem-se uma Absorbância de 1,5393, o que dá uma eficiência de remoção de cor de $\eta = 50\%$. Já no espectro do visível no $\lambda = 630$ nm, a absorbância do efluente bruto é de 0,4560 e do efluente tratado a Absorbância é de 0,1229, o que dá uma eficiência de remoção de cor de $\eta = 73\%$.

A remoção da cor, também é prejudicada no caso do uso de eletrodos de ferro porque o efluente adquire uma cor amarelada, fato já observado visualmente por FERREIRA (2006), o qual atribuiu a pouca capacidade de adsorção dos hidróxidos de ferro (III), que surge da seguinte reação:



Devido a isso, a coloração amarela pode ser notada na Figura 42 abaixo:



Figura 42: Tratamento de Efluente com Eletrodos de Ferro, sendo que amostra 1 refere-se ao efluente bruto e depois as amostras 2 a 4 foram as coletadas de hora em hora.

4.3.3 – ENSAIO COM ELETRODOS DE FERRO E ALUMÍNIO

Neste ensaio, utilizou-se dois reatores, o primeiro com eletrodos de Ferro utilizado nas três primeiras horas de tratamento, e o segundo com eletrodos de Alumínio utilizado nas três horas seguintes.

Os resultados obtidos, para os parâmetros de pH, condutividade e temperatura, no ensaio com eletrodos de ferro, estão expressos na tabela 26:

TABELA 26: RESULTADOS DO ENSAIO COM ELETRODOS DE FERRO E ALUMÍNIO

Ensaio Placa de Ferro + Alumínio	pH	Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
Amostra sem tratamento	9,05	3,315	29
1 h Cuba 1 - Ferro	10,10	7,735	33
2 h Cuba 1 - Ferro	9,67	6,852	35
3 h Cuba 1 - Ferro	10,67	6,585	36
1 h Cuba 2 - Alumínio	10,45	7,764	27
2 h Cuba 2 - Alumínio	10,62	7,830	32
3 h Cuba 2 – Alumínio	10,82	6,999	36

A seguir as Figuras 43 a 45 referem-se à tabela 26, de onde foram extraídos os seguintes gráficos:

- pH x Tempo
- Condutividade x Tempo
- Temperatura x Tempo

- **COMPORTAMENTO DO pH EM FUNÇÃO DO TEMPO**

Na Figura 43 tem-se o comportamento do pH das amostras retiradas de hora em hora:

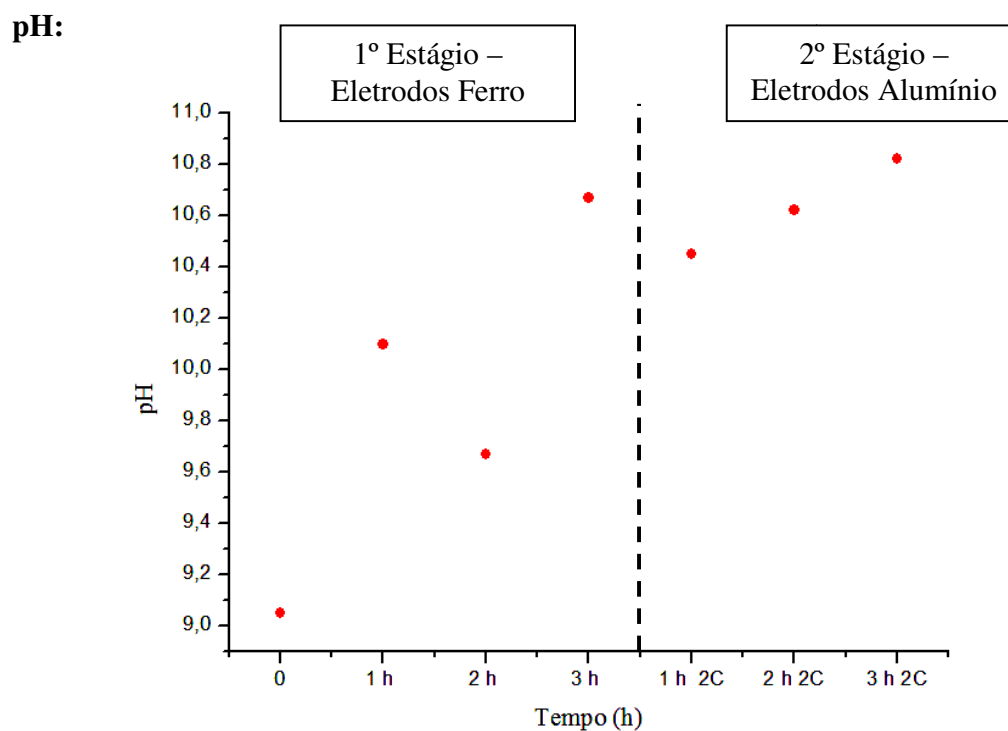


Figura 43: pH em função do tempo do efluente tratado com eletrodos de Ferro e Alumínio.

Pelo gráfico, nota-se que o pH aumentou significativamente com o tratamento feito com eletrodos de ferro, enquanto que no tratamento feito com eletrodos de alumínio ele teve um leve aumento.

- **COMPORTAMENTO DA CONDUTIVIDADE EM FUNÇÃO DO TEMPO**

Na Figura 44 tem-se o comportamento da condutividade das amostras retiradas de hora em hora:

CONDUTIVIDADE:

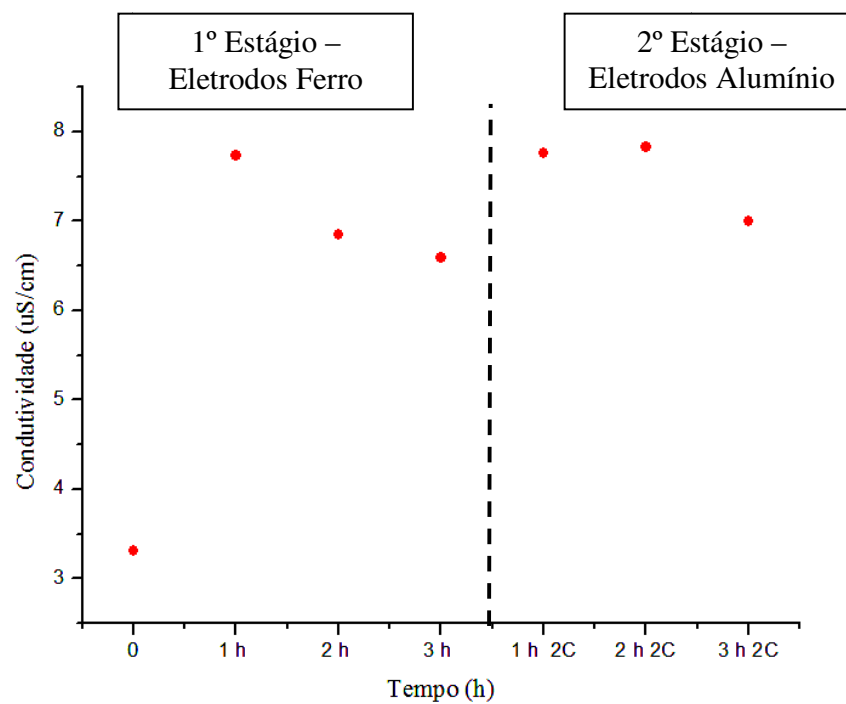


Figura 44: Condutividade em função do tempo do efluente tratado com eletrodos de Ferro e Alumínio.

Nota-se que a condutividade teve um acréscimo significativo na primeira hora (133%) e depois ela tendeu a estabilidade durante todo o processo.

- **COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO TEMPO**

Na Figura 45 tem-se o comportamento da temperatura das amostras retiradas de hora em hora

TEMPERATURA:

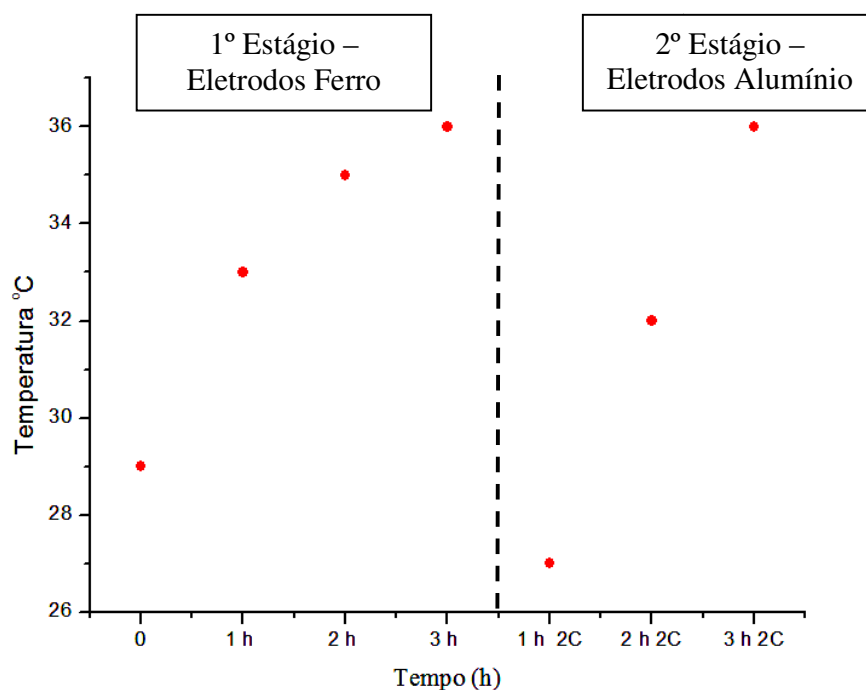


Figura 45: Temperatura em função do tempo do efluente tratado com eletrodos de Ferro e Alumínio.

Percebe-se, pelo gráfico, que a eletroflotação eleva a temperatura do efluente, o que ocorreu no primeiro estágio com eletrodos de Ferro, e a queda da temperatura, após 3 h de tratamento, pode ser explicada pela troca de reator, o que leva tempo e, além disso, houve movimentação do efluente, o que causa o seu resfriamento, porém, quando volta a ser tratado com eletrodos de alumínio, o efluente novamente tem um aumento de temperatura.

Destes gráficos, podemos chegar aos seguintes resultados, na primeira etapa do tratamento utilizando eletrodos de Ferro:

- Obteve-se uma variação no pH, que no final das três primeiras horas representou um aumento (18 %) em relação ao pH inicial:
- Uma variação bastante significativa na condutividade durante este processo, com um aumento de (99%) e,
- Um aumento na temperatura de (24%).

Quando passamos o efluente para outro reator utilizando os eletrodos de Alumínio, obteve-se os seguintes resultados considerando a variação em relação aos dados finais do efluente já tratado no reator com eletrodos de ferro:

- Pouca variação em relação ao pH, um aumento insignificante de (1%),
- Uma variação pequena na condutividade durante o processo (6%) e,
- Não teve aumento na temperatura (0%), porém, vale ressaltar que na transferência entre um reator e outro, quando foi feita a troca de eletrodos e a limpeza do sobrenadante e do sedimentado, houve uma queda significativa de temperatura, só recuperando essa temperatura no final do processo.

4.3.3.1 – ESTUDO ESPECTROFOTOMÉTRICO DO EFLUENTE TRATADO COM ELETRODOS DE FERRO E ALUMÍNIO:

Na figura 46 tem-se o comportamento espectrofotométrico do efluente em seu estado bruto (sem tratamento).

EFLUENTE BRUTO:

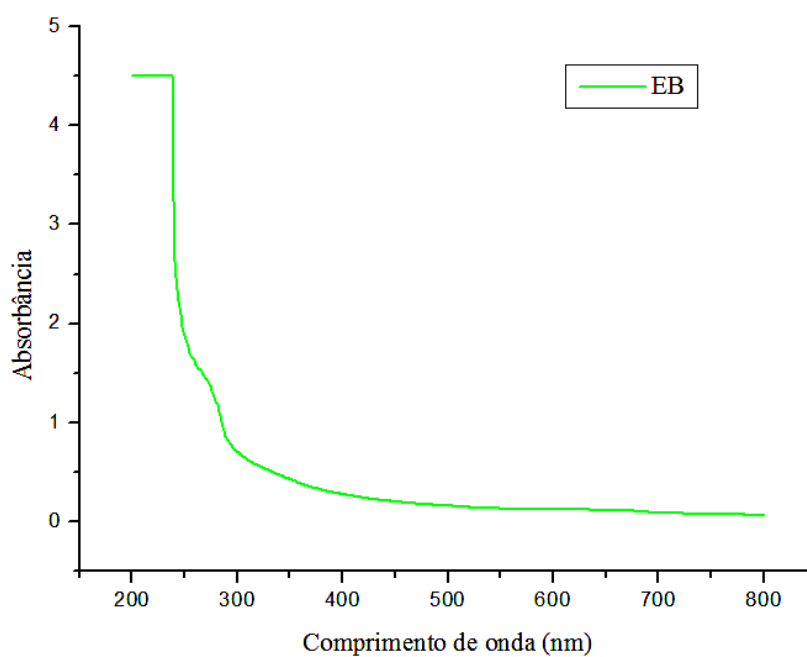


Figura 46: Absorbância em função do comprimento de onda do Efluente não tratado.

Na figura 47 vemos o gráfico da absorbância em função do comprimento de onda, tanto do efluente em seu estado bruto quanto do tratamento feito com os eletrodos de Ferro, bem como do tratamento feito com eletrodos de Alumínio.

EFLUENTE TRATADO:

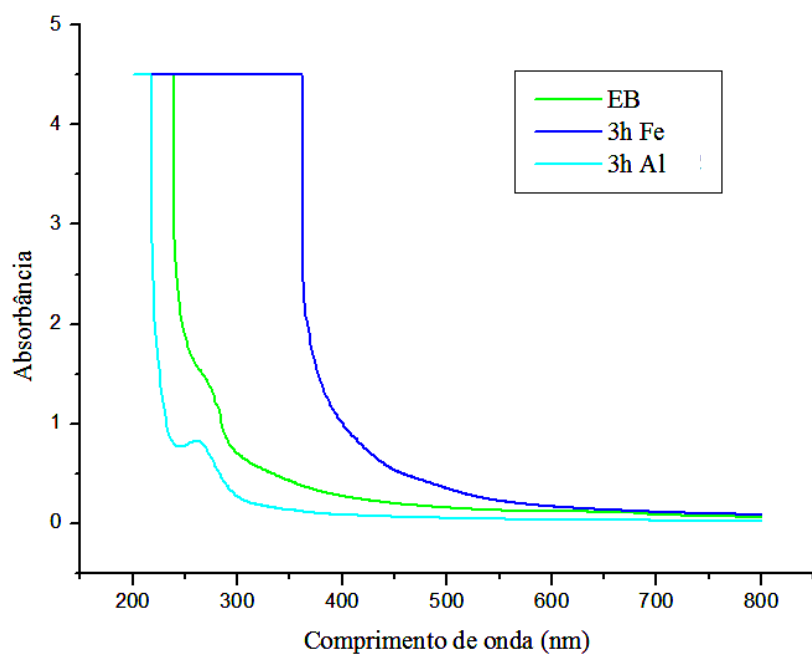


Figura 47: Absorbância em função do comprimento de onda do efluente tratado com eletrodos de Ferro (3 h) e depois com eletrodos de Alumínio (3 h)

Observa-se que a coloração do efluente piorou nas três primeiras horas, quando foi tratado só com eletrodos de Ferro, e depois melhora significativamente com o tratamento de Alumínio. Isto se deve a coloração amarela, efeito do Fe III, algo que pode ser notado nas Figuras 48 (a), (b) e (c):



(a)



(b)



(c)

Figura 48: Tratamento de Efluente com Eletrodos de Ferro, para as três primeiras horas, e depois com eletrodos de Alumínio para as três horas seguintes.

Na figura 48 (c) o efluente bruto é mostrado do lado esquerdo e sequencialmente as amostras coletadas de hora em hora.

Vemos que, por causa do Fe III , quando o efluente é tratado no primeiro reator com eletrodos de ferro, este adquire uma coloração amarelada, por isso na leitura do espectrofotômetro notamos que a curva do efluente tratado após 3 horas piora e muito até a faixa dos 600 nm (faixa do amarelo no espectrofotômetro). Com isso, o tratamento posterior com eletrodos de alumínio tem seu rendimento piorado, pois além de tratar o efluente, é necessário remover essa coloração também, entretanto, como este trabalho visa a remoção da cor, optou-se por um estudo mais aprofundado dos eletrodos de alumínio.

4.3.4 – COMPARATIVO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS OBTIDOS NOS TRATAMENTOS REALIZADOS

4.3.4.1 – pH

Nos três testes realizados, o pH apresentou uma elevação entre o pH inicial e o final. Com eletrodos de Alumínio o aumento foi de 6,48%, com de Ferro o aumento do pH foi de 27,46% e no conjunto híbrido obteve-se um aumento de 19,56%, dados registrados na Tabela 27:

TABELA 27 – PERCENTUAL DE ACRÉSCIMOS DOS pH INICIAIS E FINAIS

	Alumínio	Ferro	Ferro e Alumínio
pH Inicial	10,03	6,41	9,05
pH final	10,68	8,17	10,82
% Aumento	6,48%	27,46%	19,56%

Para FERREIRA (2006) o aumento significativo no valor do pH é atribuído à geração dos íons OH^- durante a etapa de redução da água, conforme a equação 59 abaixo:



Ainda, de acordo com a autora, os íons responsáveis pelo aumento do pH são os remanescentes do processo de coagulação. Esta característica também pode ser observada em demais trabalhos, como KOBAYASHI *et al.* (2006), IRDEMEZ *et al.* (2006), CHEN *et al.* (2000) e ANGELIS *et al.* (1998). Os resultados obtidos e dispostos na Tabela 27 quando

comparados com os resultados verificados na literatura, nota-se um comportamento previsto.

4.3.4.2 – CONDUTIVIDADE

Observou-se nos três testes realizados, resultados discrepantes, nos ensaios que usavam apenas placas de alumínio, a condutividade pouco se alterou durante todo o processo e no final teve uma variação de 0,43%, ou seja, praticamente não houve alteração. No experimento com placa de ferro, vemos que a condutividade caiu 13,56 %, embora houve dois pontos de queda, isso talvez se deva ao fato de ter sido feita a limpeza do reator. Na mistura dos dois processos tivemos um aumento de condutividade de 111,13%, porém, cabe ressaltar que a condutividade estava baixa no primeiro ponto, t (0), se fizéssemos o calculo desconsiderando esse ponto, visto que é a medida da condutividade no efluente bruto, e o nosso efluente é complexo, variando muito os seus padrões, nós teríamos uma variação de apenas 9,52%, estes dados podem ser observados na Tabela 28

TABELA 28 – PERCENTUAL DE ACRÉSCIMOS E DECRÉSCIMO DAS CONDUTIVIDADES INICIAIS E FINAIS

	Alumínio	Ferro	Ferro e Alumínio
Condutividade Inicial	3,251	9,011	3,315
Condutividade final	3,265	7,789	6,999
% variação	0,43%	- 13,56%	111,13 %

Embora a condutividade na eletroflotação seja o termômetro de averiguação do tratamento, na condutividade mais baixa, que foi a utilizada com placas de alumínio, tivemos um melhor resultado. Isto comprova o estudo de GAO *et al.* (2005), onde foi observado que o consumo de energia não diminui significativamente quando a

condutividade da solução for superior a 1,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Portanto, há um limite para aumento da condutividade e otimização do processo.

4.3.4.3 – TEMPERATURA

Na Tabela 29 estão relacionados os valores obtidos experimentalmente, a cada amostragem. O aumento da temperatura pode ser verificado nos três ensaios, aumento de 46,43% para as eletrodos de ferro, 25,93% para os eletrodos de Alumínio e 24,14% para o ensaio com eletrodos de Ferro e Alumínio conforme Tabela 29.

TABELA 29 – PERCENTUAL DE ACRÉSCIMOS DAS TEMPERATURAS INICIAIS E FINAIS.

	Alumínio	Ferro	Ferro e Alumínio
Temperatura Inicial	27	28	19
Temperatura final	34	41	36
% Variação	25,93%	46,43%	24,14%

Percebe-se, pela tabela, que a eletroflotação eleva a temperatura do efluente

De acordo com DANESHVAR *et al.* (2004), o aumento da temperatura da solução contribui para melhorar a eficiência de remoção, visto que este aumento proporciona um aumento da movimentação dos íons produzidos, o que facilita a colisão deles com o coagulante formado.

4.3.4.4 – ANÁLISE DE RESULTADOS

Através dos dados obtidos, que estão alinhados na tabela 30, pode-se observar que o pH, no tratamento em que são utilizados somente os eletrodos de Alumínio, obteve-se uma variação menor, um aumento de apenas 6,48%, o que é interessante para o descarte de efluentes, visto que, na tinturaria o efluente têxtil tem um pH elevado, e elevá-lo ainda mais traria complicações a ETE. Pela legislação ambiental, este efluente teria que ser corrigido para níveis aceitáveis, o que acarretaria em custo na operação e isto torna o Alumínio para o tratamento de efluente têxtil mais interessante e menos custoso.

No parâmetro da condutividade, observa-se que o tratamento com Alumínio pouco alterou a condutividade (0,43%), enquanto que a condutividade caiu no tratamento com Ferro (-13,56%), e, embora o tratamento com os dois materiais tenha uma variação considerável, isto se dá, porque o primeiro ponto de condutividade, aquele medido com o EB, era um ponto fora da curva, devido à complexidade do efluente têxtil, porém, cabe notar pelo gráfico, analisado todos os pontos medidos, que durante o processo envolvendo eletrodos de Ferro, a condutividade caiu, enquanto que com o Alumínio ela subiu. Como para o processo de Eletroflotação a condutividade é um parâmetro importante, que serve para avaliar a eficiência do tratamento, conclui-se que, neste parâmetro também, o tratamento com o Alumínio se mostra mais adequado.

Por fim, feita uma análise da temperatura, percebe-se que, nos três ensaios, a temperatura sobe. Como este é um dos parâmetros analisados pela CETESB no descarte do efluente, quanto menos a temperatura subir, melhor seria para a ETE, e neste quesito, embora o tratamento com dois materiais, seja o de melhor desempenho, subindo a temperatura em 24,14%, nota-se que o desempenho usando apenas o Alumínio, foi muito próximo disso (25,93%), enquanto que com eletrodos de Ferro o aumento foi significativo, foi de 46,43%, assim sendo, analisando este parâmetro o Alumínio mostrou ser o melhor material a ser usado.

TABELA 30 – EFICIÊNCIA PERCENTUAL DOS TRATAMENTOS RELATIVO AOS PARÂMETROS pH, DA CONDUTIVIDADE E DA TEMPERATURA

	Alumínio	Ferro	Alumínio e Ferro
Ph	6,48%	27,46%	19,56%
Condutividade	0,43%	- 13,56%	111,13 %
Temperatura	25,93	46,43	24,14

Pela análise dos três parâmetros propostos, pH, condutividade e temperatura, pode-se chegar a conclusão que o melhor material para fazer um tratamento de eletroflotação no efluente de uma indústria têxtil, que tinga malhas com corantes reativos, é o **Alumínio**.

A seguir, será feito um estudo mais aprofundado deste material, visto que ele se mostrou o mais adequado para o tratamento do efluente têxtil.

4.3.5 – EFICIÊNCIA DA REMOÇÃO DE COR COM ELETRODOS DE ALUMÍNIO

Nesta etapa do estudo, é proposta uma análise mais detalhada usando apenas as placas de Alumínio, visto que o mesmo mostrou-se o mais eficiente e eficaz na remoção da cor do efluente têxtil, com rendimento acima dos 90%.

Para tanto, foram coletadas duas amostras de efluente, em horários diferentes, uma com uma coloração azul e a outra com uma coloração vermelha. Feita a análise espectrofotométrica, obteve-se os seguintes resultados expressos nas Figuras 49 a 55:

- **COLORAÇÃO DO EFLUENTE BRUTO: AZUL**

Nas Figuras 49 a 52, tem-se o comportamento espectrofotométrico do efluente em seu estado bruto (sem tratamento), com 1 hora de tratamento e com 5 horas de tratamento respectivamente, e o resultado visual do tratamento.

EFLUENTE BRUTO COLORAÇÃO AZUL

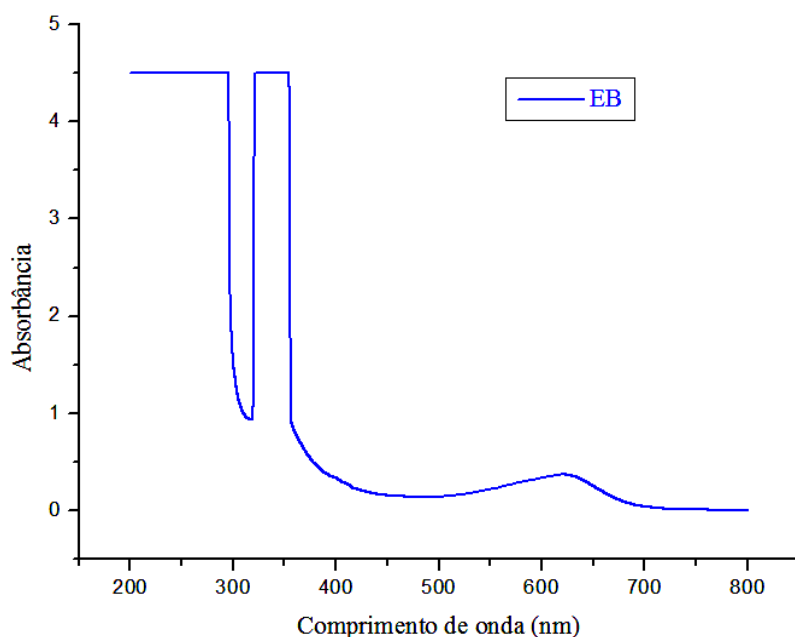


Figura 49: Absorbância em função do comprimento de onda do efluente Bruto.

EFLUENTE TRATADO DURANTE 1 h

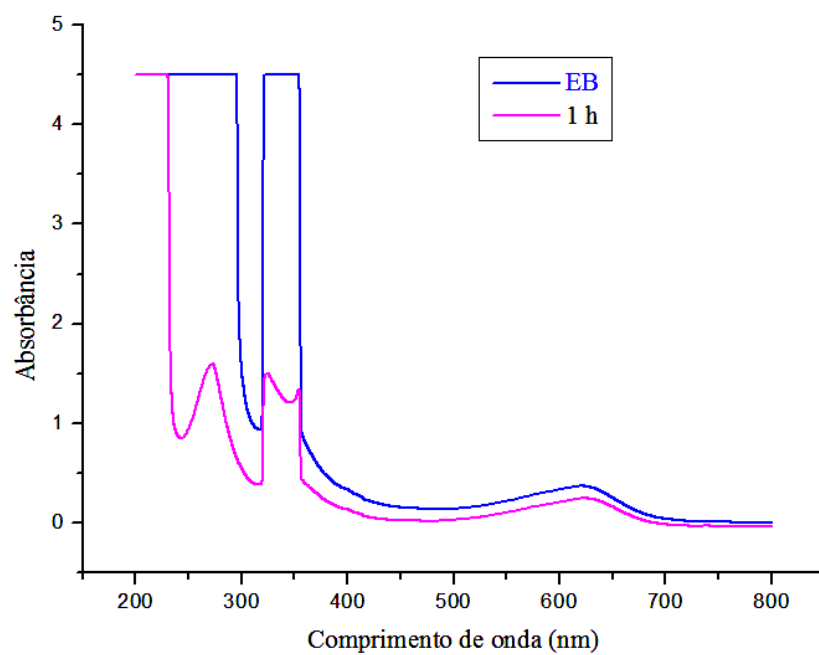


Figura 50: Absorbância em função do comprimento de onda do efluente tratado 1 h.

EFLUENTE TRATADO DURANTE 5 h

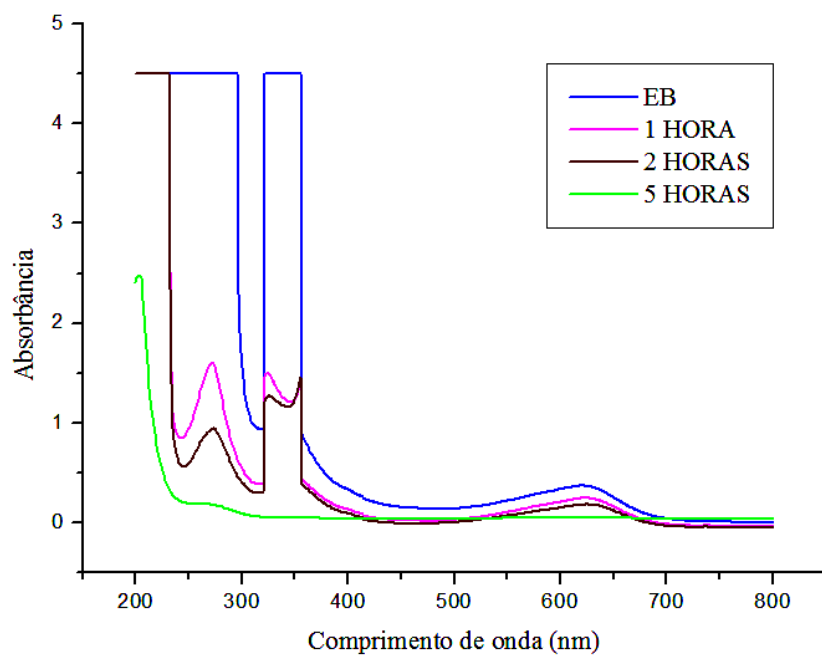


Figura 51: Absorbância em função do comprimento de onda do efluente tratado 5h.

Na Figura 52 pode-se ver o resultado obtido com o tratamento feito com eletrodos de Alumínio durante 5 h.



Figura 52: Tratamento de Efluente com Eletrodos de Alumínio onde vemos o efluente bruto mostrado do lado esquerdo e depois as amostras coletadas de hora em hora.

- **COLORAÇÃO DO EFLUENTE BRUTO: VERMELHA**

Nas Figuras 53 a 55 tem-se o comportamento espectrofotométrico do efluente em seu estado bruto (sem tratamento), com 1 hora de tratamento e com 5 horas de tratamento respectivamente.

EFLUENTE BRUTO COLORAÇÃO VERMELHA

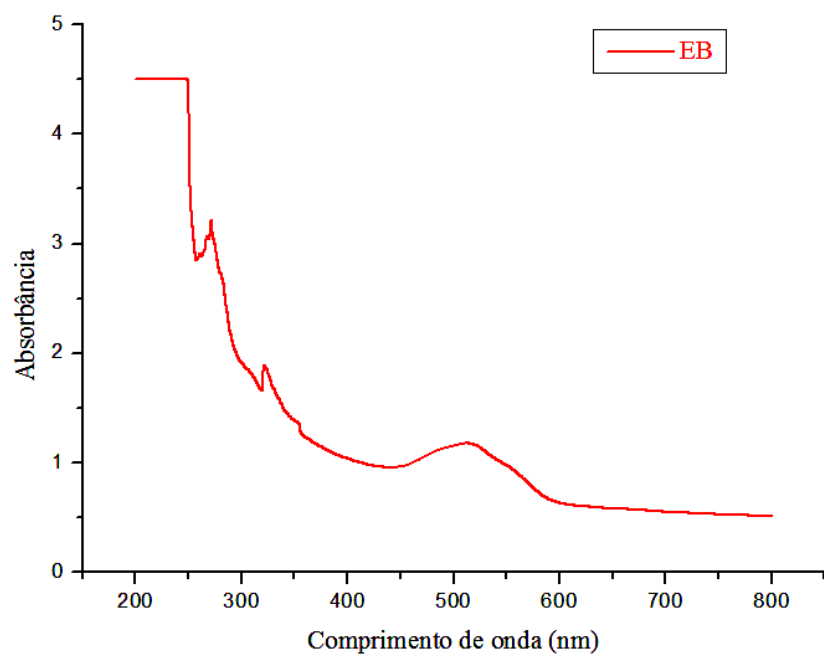


Figura 53: Absorbância em função do comprimento de onda do efluente Bruto.

EFLUENTE TRATADO DURANTE 1 h

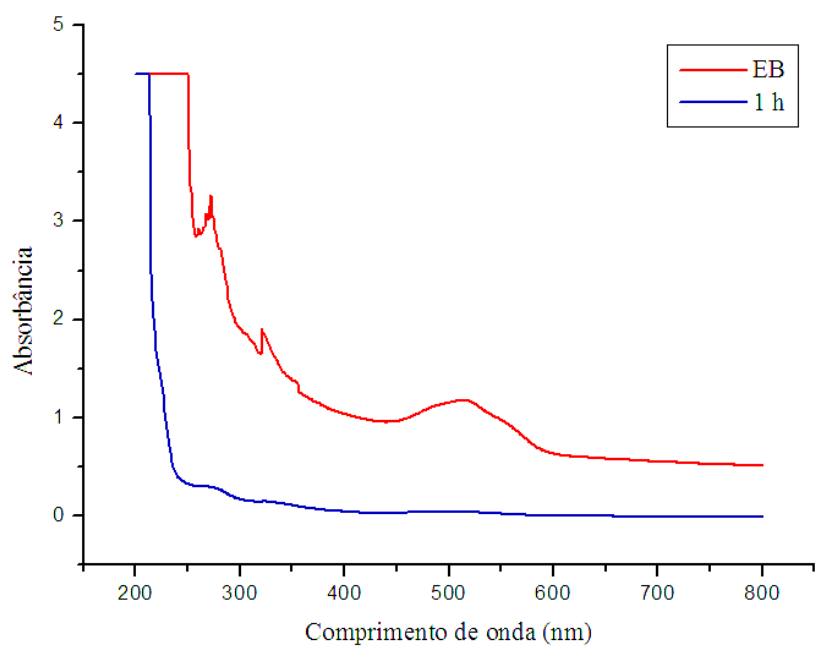


Figura 54: Absorbância em função do comprimento de onda do efluente tratado 1 h.

EFLUENTE TRATADO DURANTE 5 h

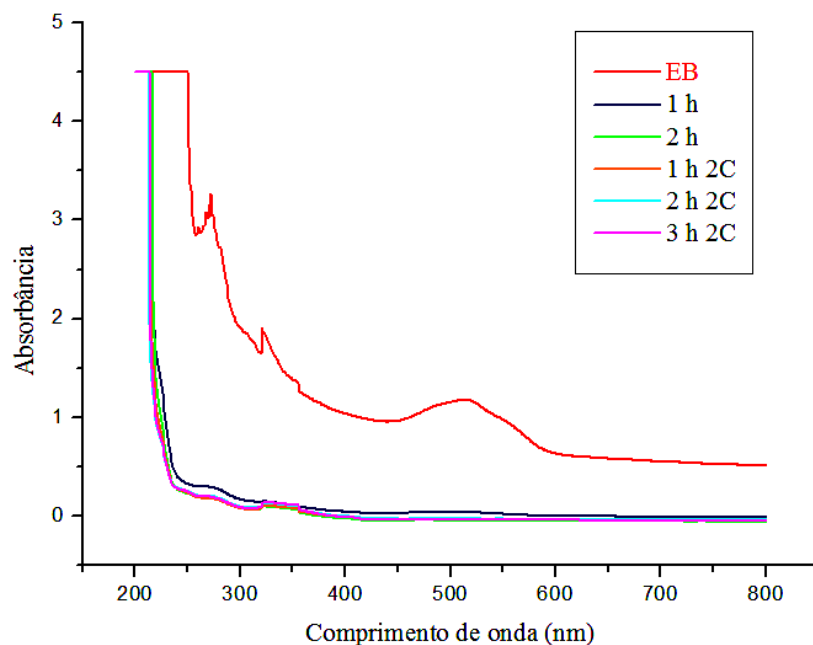


Figura 55: Absorbância em função do comprimento de onda do efluente tratado 5 h.

Observado os gráficos acima (Figuras 49 a 55) concluí-se que, embora o efluente têxtil seja complexo, mesmo coletados em horários e dias diferentes, com coloração bem distinta, percebe-se que eles possuem características em comum: primeiro pode-se notar que o efluente, em seu estado bruto, tem picos de Absorbância entre os comprimentos de onda da região de $200 < \lambda < 400$ nm e $550 < \lambda < 650$ nm, como um pico fica na região do ultravioleta, e outro na região do visível, decidiu-se fazer uma investigação nestas áreas.

Iniciou-se com o estudo na área do visível no espectrofotômetro que será detalhada a seguir:

4.3.5.1 – ESTUDO NA ÁREA DO VISÍVEL:

Como o corante, mesmo em porções de p.p.b. é detectável a olho nu, esta é a análise mais relevante para este estudo, mesmo porque, o corante está diretamente ligado a esta região no estudo espectrofotométrico. A tabela 31 mostra o resultado conseguido com a técnica de eletroflotação utilizando eletrodos de Alumínio.

TABELA 31 – PERCENTUAL DE REMOÇÃO DE COR

	EB – Azul	EB – Vermelho
1 Hora	33,9%	96,6%
2 Horas	51,1%	100%
3 Horas	76,4%	-
1 Hora 2ª Caixa	78,2%	-
2 Hora 2ª Caixa	85,3%	-

As Figuras 56 e 57 mostram o gráfico da Absorbância em função do comprimento de onda do efluente azul e do vermelho, e o excelente resultado conseguido através do tratamento efetuado.

EFLUENTE COLORAÇÃO AZUL

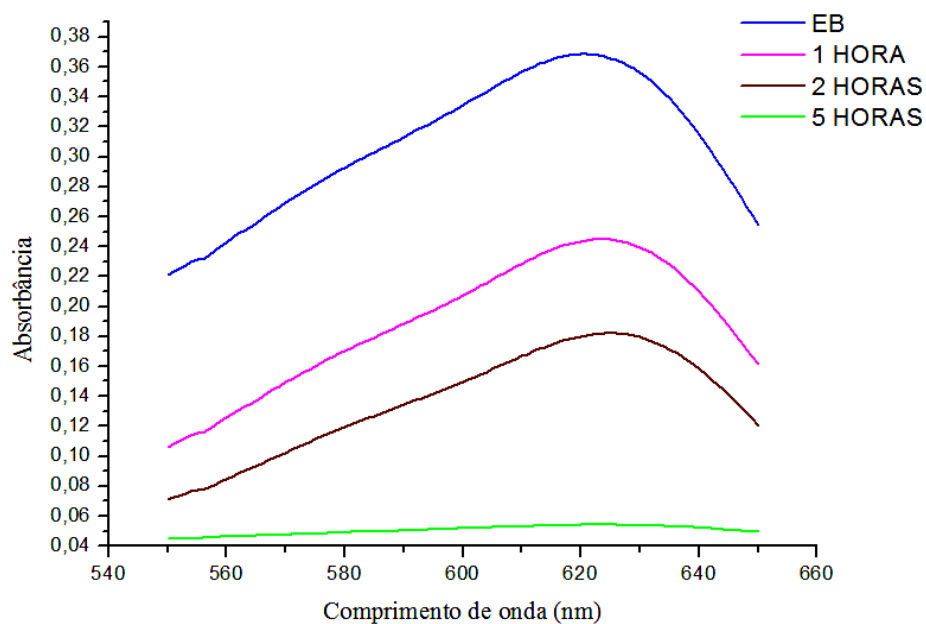


Figura 56: Absorbância em função do comprimento de onda do Efluente (Azul)

EFLUENTE COLORAÇÃO VERMELHA

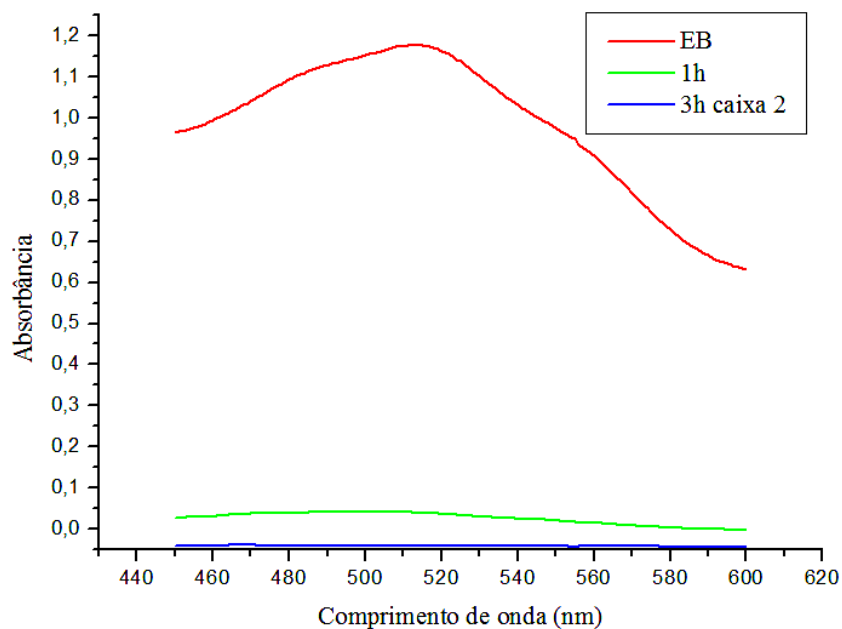


Figura 57: Absorbância em função do comprimento de onda do Efluente Vermelho

4.3.5.2 – ANÁLISE DOS DADOS DO ESTUDO NA ÁREA DO VISÍVEL:

Depois destes resultados díspares, foi feita uma investigação do motivo pelo qual no efluente de cor azul foram necessárias 5 horas de tratamento com um resultado de 85,3% de remoção de cor, enquanto que, no efluente de cor vermelha, com apenas 1 hora de tratamento obteve-se uma remoção de 96,6% de sua cor, e com 2 horas já tínhamos uma remoção completa da cor.

Analisado os gráficos representados nas Figuras 49 e 53, percebe-se que o Efluente bruto de coloração azul tem um pico na área do ultravioleta que ultrapassa a capacidade de medição do aparelho que é $A = 4,5$, na mesma região o efluente de coloração vermelha também tem um pico, mas que pode ser medido pelo aparelho.

Foi feito o levantamento das fichas de produção da empresa, no momento da coleta, para poder entender o que poderia estar causando aquele pico. Nestas fichas foi observado que, no momento da coleta do efluente de coloração azul, estava sendo realizado a purga em alguns equipamentos, o que lançou alguns produtos auxiliares no caudal do efluente.

Então, decidiu-se por fazer um estudo mais apurado na região do ultravioleta, e também avaliar a participação dos produtos auxiliares ao tingimento e o efeito que eles causam ao tratamento.

4.3.5.3 – ESTUDO NA ÁREA DO ULTRAVIOLETA:

As Figuras 58 e 59 mostram o resultado espectrofotométrico do tratamento feito com eletrodos de Alumínio na região do ultravioleta.

EFLUENTE COLORAÇÃO AZUL

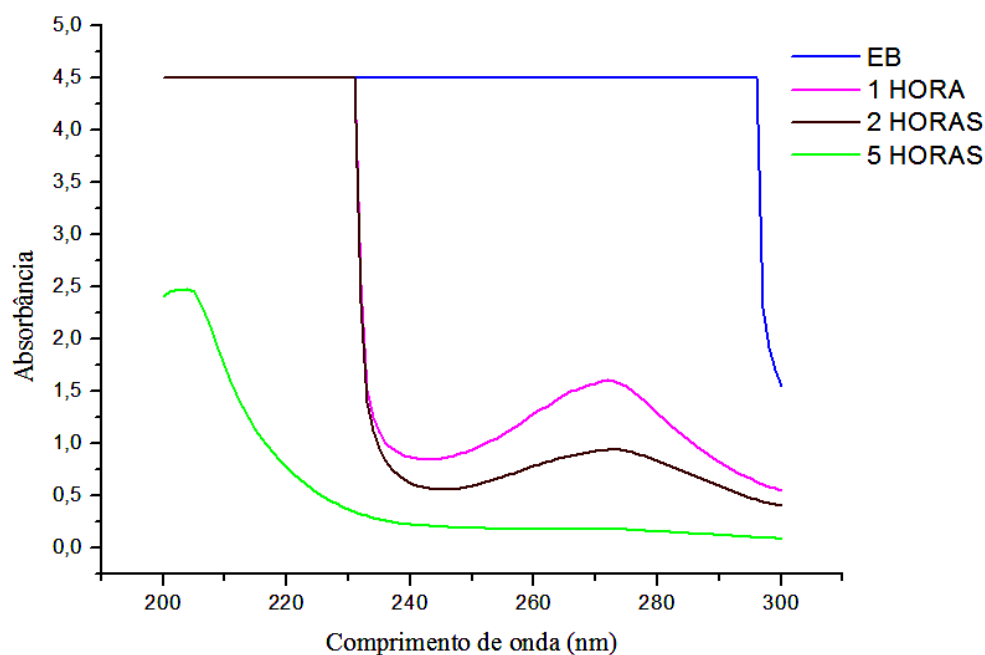


Figura 58: Absorbância em função do comprimento de onda do efluente (Azul) tratado na região do ultravioleta

Como no efluente bruto de coloração azul temos picos no espectrofotômetro acima de 4,5 de Absorbância, e por limitação, o aparelho não mede acima deste nível de Absorbância, não foi possível realizar um cálculo preciso da remoção de cor, porém, pode-se, com toda certeza, afirmar que o tratamento do efluente com eletroflotação mostra-se bastante eficaz, pois, na última análise (5h de tratamento) observa-se pela leitura que a Absorbância chegou próximo de $A = 0,0$; evidenciando assim o excelente resultado do tratamento feito com Eletroflotação no espectro do ultravioleta, e com eficiência próxima de 100% na remoção da cor.

No Efluente Bruto de coloração vermelha, tem-se uma medição que apresenta os valores de pico, conforme podemos observar na Figura 59, com isso pode-se fazer uma análise mais precisa, mostrando a eficiência e eficácia do método.

EFLUENTE COLORAÇÃO VERMELHA

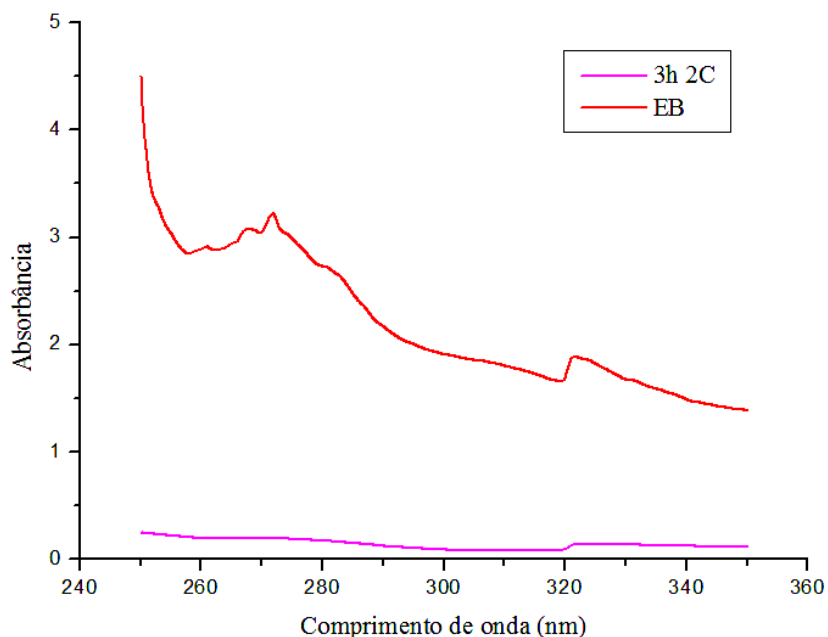


Figura 59: Absorbância em função do comprimento de onda do efluente (Vermelho) tratado na região do ultravioleta

Para fazer a análise da eficiência da técnica de eletroflotação, foi considerado o valor do pico ($\lambda = 272$ nm) e feito o cálculo de remoção de cor. Com isso pudemos confirmar uma eficiência de remoção de cor de 97,2%, o que comprova que esta técnica é muito eficaz para o tratamento na região do ultravioleta.

Como os dois efluentes tiveram picos na região do ultravioleta, e o corante está relacionado com a região do visível, realizou-se uma investigação nos produtos auxiliares ao tingimento, para descobrir quais poderiam resultar nos picos encontrados na região do ultravioleta.

Os auxiliares testados foram um Dispersante para corantes reativos (DI 5690), um antiebradura (AT 8910), um Alvejante (H_2O_2), um Deslizante (Medlub) e um sequestrante (DI 5160).

Foram feitas amostras nas proporções de 1:100 e a leitura foi feita com 15% de 20 mL da solução, esses dados, foram obtidos junto aos fabricantes dos produtos auxiliares, como sendo a percentagem residual destes produtos no efluente.

Nas Figuras 60 a 65 podem-se observar os gráficos de Absorbância realizados nos produtos químicos auxiliares para corantes reativos:

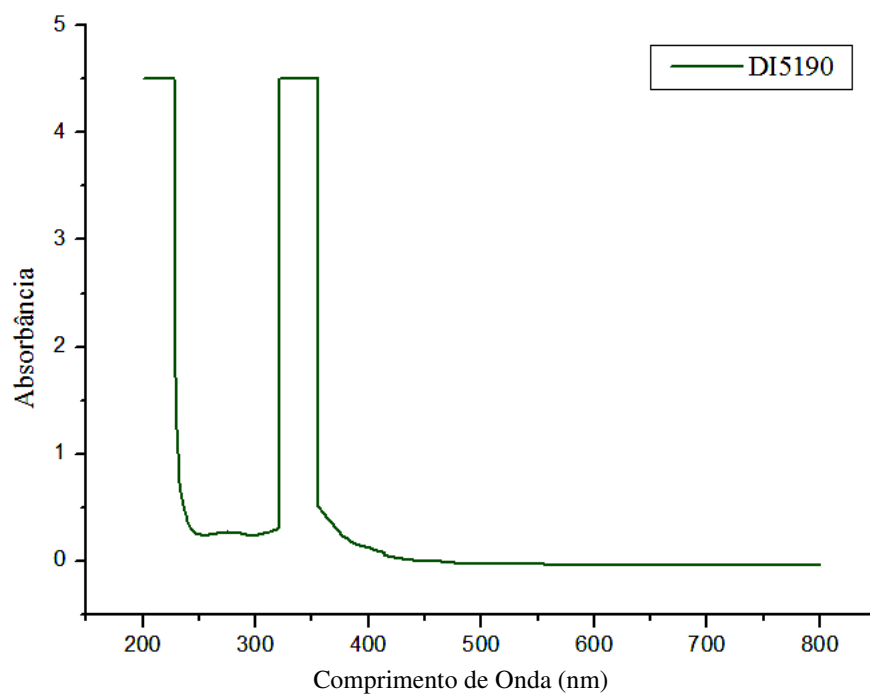


Figura 60: Absorbância em função do comprimento de onda do Dispersante.

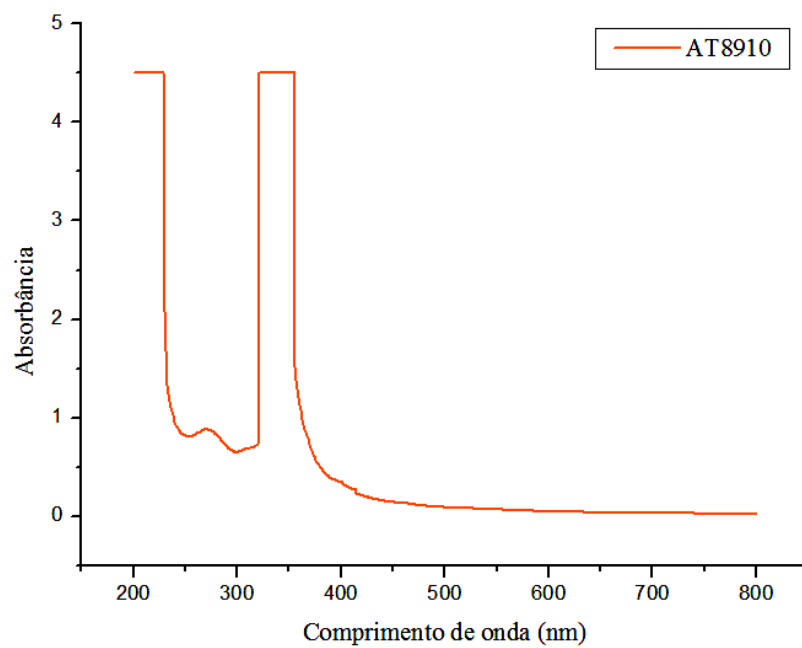


Figura 61: Absorbância em função do comprimento de onda do Antiquebradura.

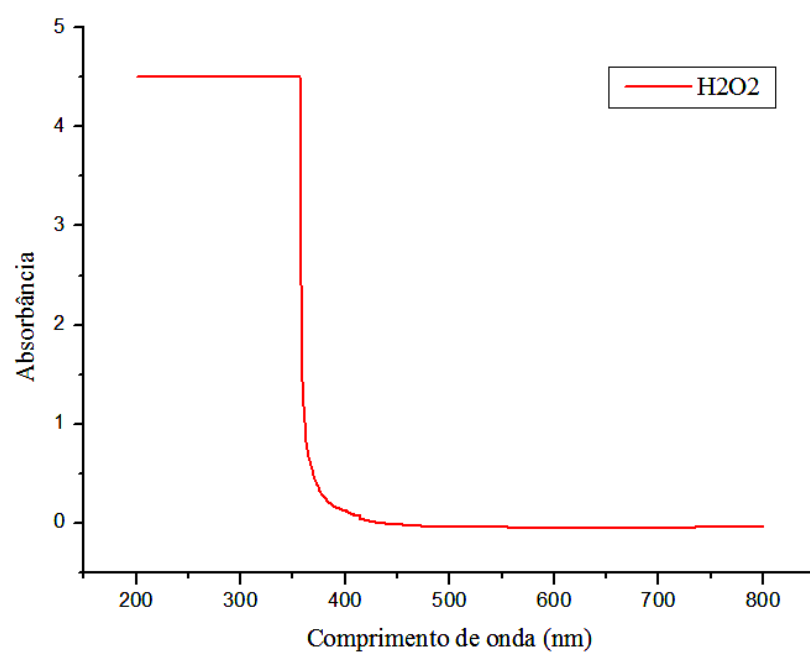


Figura 62: Absorbância em função do comprimento de onda do Alvejante.

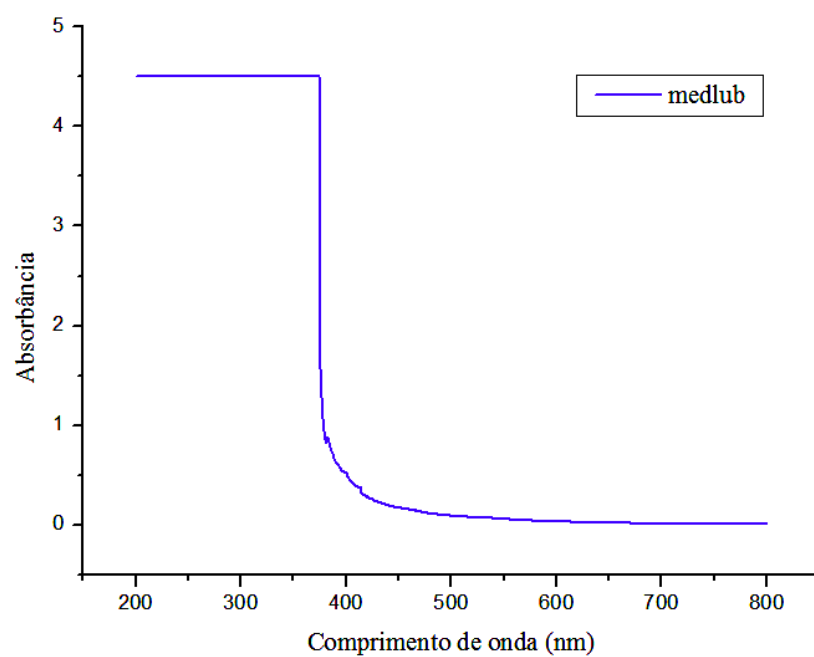


Figura 63: Absorbância em função do comprimento de onda do Deslizante.

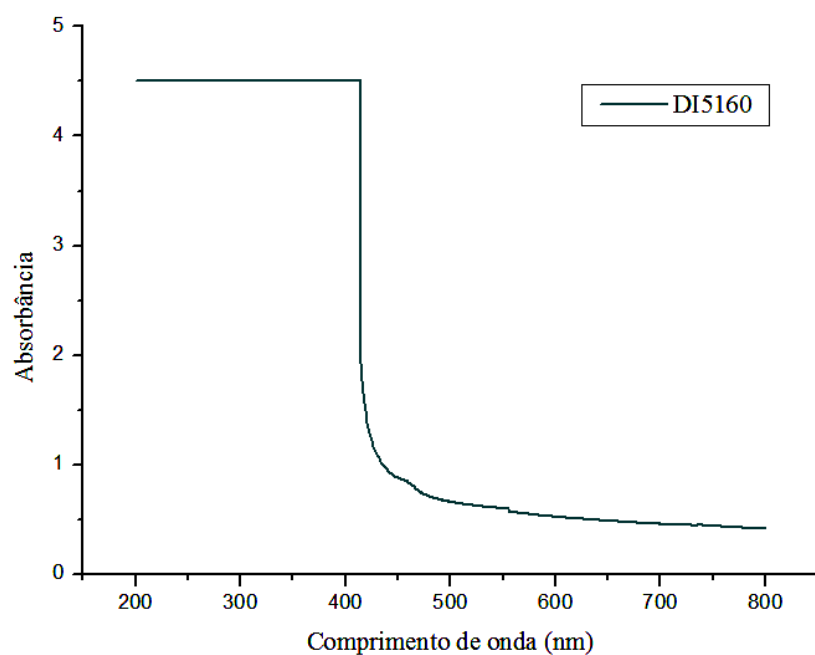


Figura 64: Absorbância em função do comprimento de onda do Sequestrante.

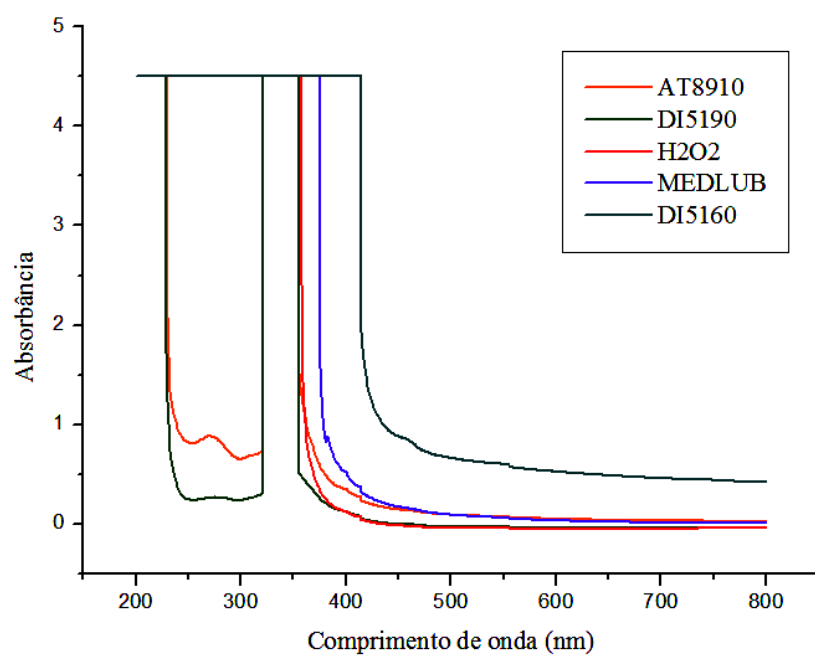


Figura 65: Absorbância em função do comprimento de onda de todos Auxiliares.

Nas Figuras acima (60 a 65) observa-se que todos os produtos químicos usados como auxiliares de tingimento tem um pico na área do ultravioleta, inclusive extrapolando a capacidade de medição do espectrofotômetro, concluí-se daí que os picos do efluente bruto na área do ultravioleta devem-se em grande parte a ação dos auxiliares de tingimento.

Visto que, o corante é o principal motivo da cor no efluente têxtil, e que ele entra no processo de maneira individual, foi feito uma nova investigação. Foi produzido um efluente simulado, onde foram elaboradas três receitas de tingimento, utilizando as cores amarelo, vermelho e azul, cores estas que servem como base da tricromia. Para isso fez-se uma solução considerando a utilização apenas do corante, sem os auxiliares, e com uma solução com substantividade de 80%, conforme informação obtida junto ao fornecedor, chegando aos seguintes resultados notados nas Figuras 66 a 74:

ENSAIO COM EFLUENTES SIMULADOS:

As Figuras 66 e 67 mostram o resultado espectrofotométrico do tratamento feito com eletrodos de Alumínio no efluente de coloração amarela, com amostras retiradas a cada 10 minutos.

- **EFLUENTE AMARELO:**

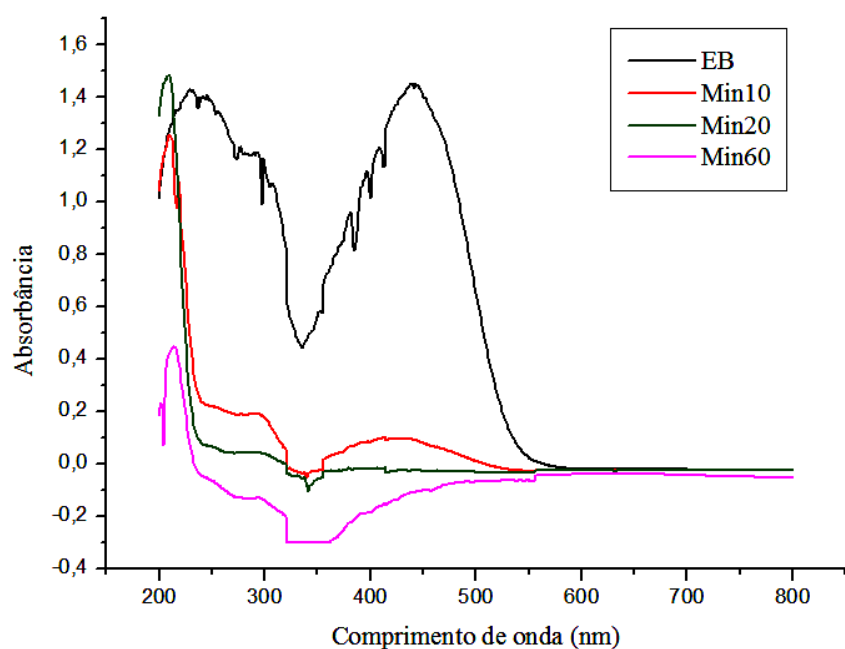


Figura 66: Absorbância em função do comprimento de onda do Efluente Amarelo.

EFLUENTE AMARELO NA REGIÃO DO VISÍVEL:

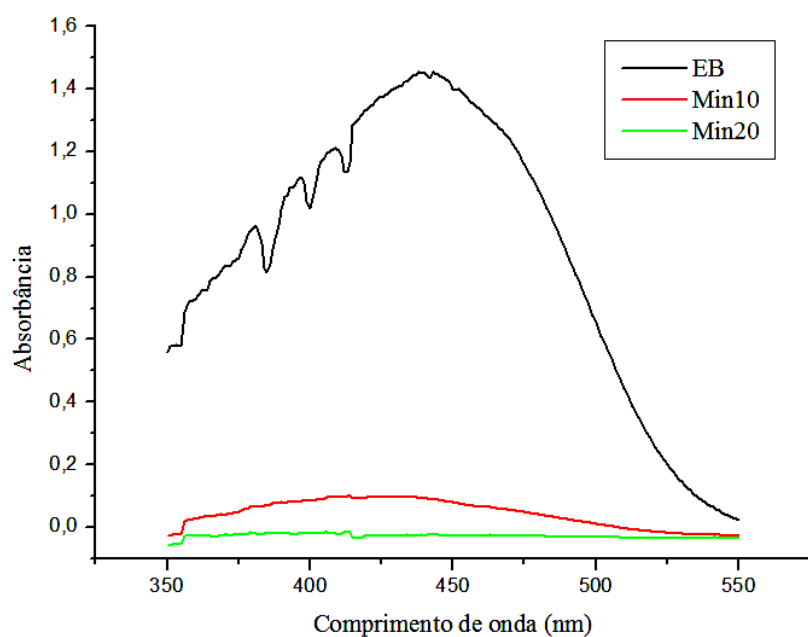


Figura 67: Absorbância em função do comprimento de onda do Efluente Amarelo tratado na região do visível

A Figura 68 mostra as amostras que foram retiradas a cada 10 minutos com a realização do tratamento de eletroflotação.



Figura 68: Tratamento de Efluente Simulado (amarelo) com Eletrodos de Alumínio Na figura vemos o efluente bruto mostrado do lado esquerdo e depois as amostras coletadas de 10 em 10 minutos.

As Figuras 69 e 70 mostram o resultado espectrofotométrico do tratamento feito no efluente de coloração vermelho, com amostras retiradas a cada 10 minutos.

- **EFLUENTE VERMELHO:**

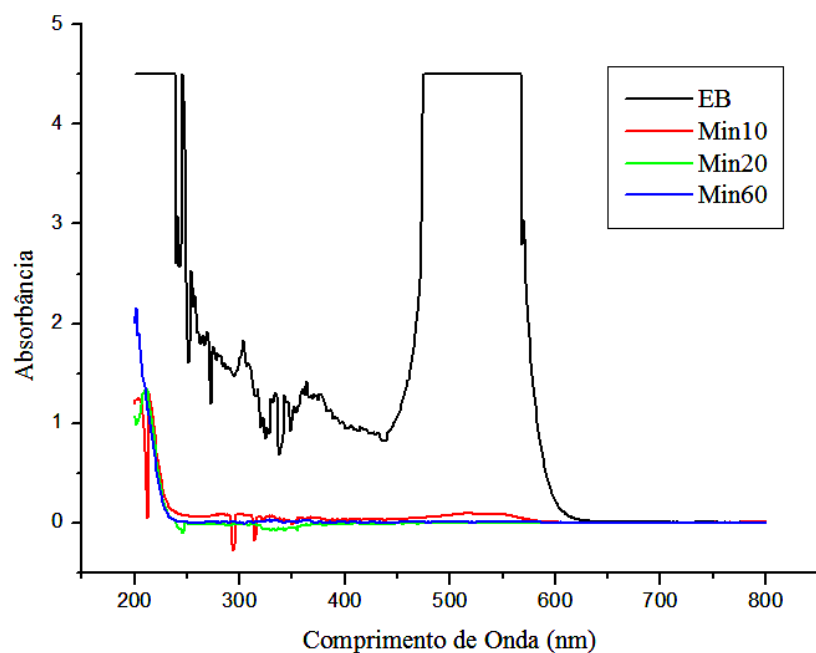


Figura 69: Absorbância em função do comprimento de onda do Efluente Vermelho.

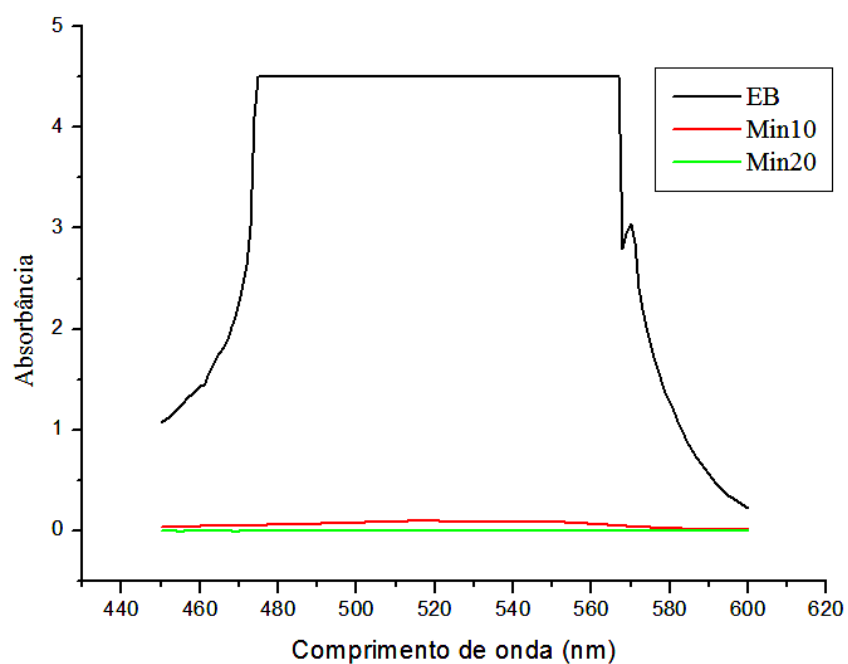


Figura 70: Absorbância em função do comprimento de onda do Efluente Vermelho tratado na região do visível.

A Figura 71 mostra as amostras que foram retiradas a cada 10 minutos com a realização do tratamento de eletroflotação.



Figura 71: Tratamento de Efluente Simulado (vermelho) com Eletrodos de Alumínio. Na figura vemos o efluente bruto mostrado do lado esquerdo e depois as amostras coletadas de 10 em 10 minutos.

As Figuras 72 e 73 mostram o resultado espectrofotométrico do tratamento feito no efluente de coloração vermelho, com amostras retiradas a cada 10 minutos.

- **EFLUENTE AZUL:**

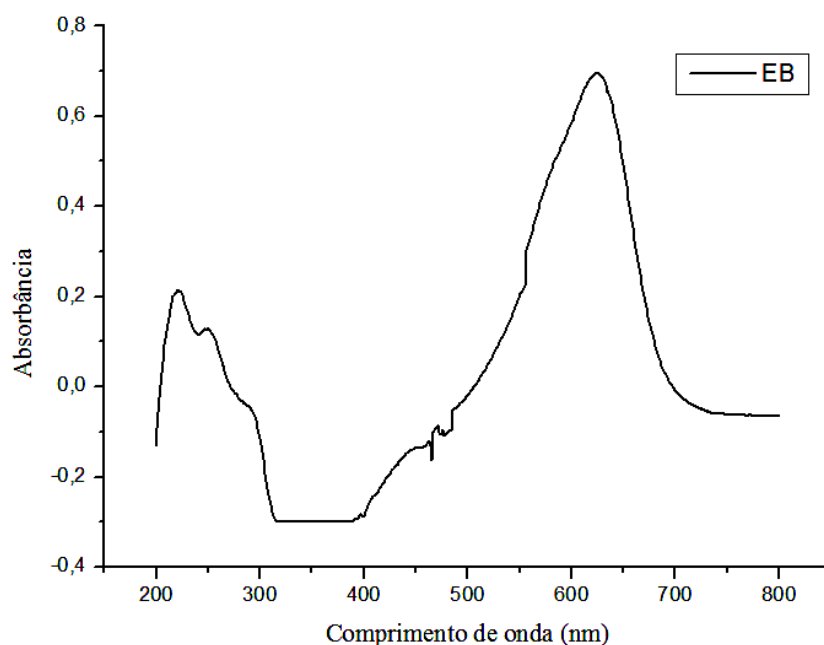


Figura 72: Absorbância em função do comprimento de onda do Efluente Azul

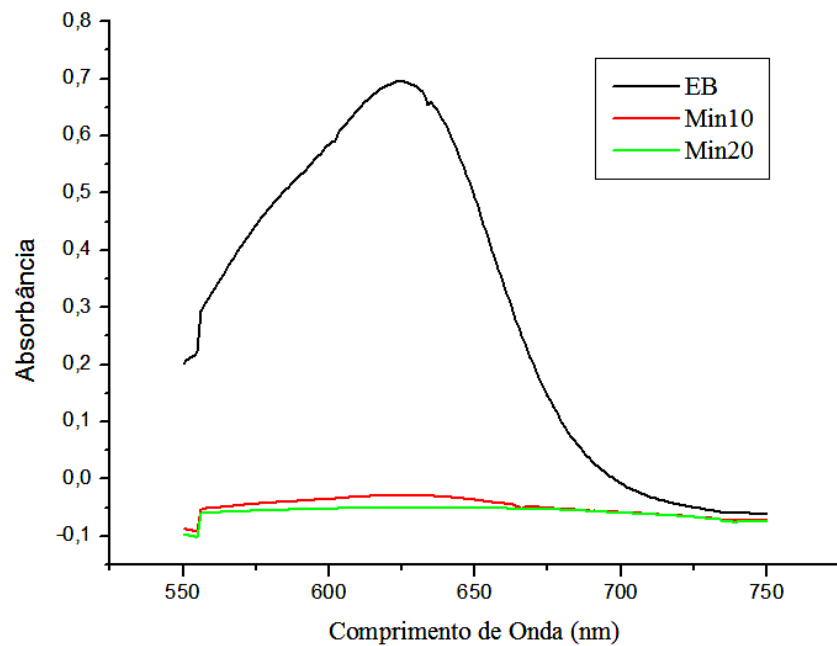


Figura 73: Absorbância em função do comprimento de onda do Efluente Azul tratado na região do visível

A Figura 74 mostra as amostras que foram retiradas a cada 10 minutos com a realização do tratamento de eletroflotação.



Figura 74: Tratamento de Efluente Simulado com Eletrodos de Alumínio. Na figura vemos o efluente bruto mostrado do lado esquerdo e depois as amostras coletadas de 10 em 10 minutos.

A seguir na tabela 32, pode-se observar a porcentagem de remoção de cor pelo tempo de tratamento.

TABELA 32 – PERCENTUAL DE REMOÇÃO DE COR

	10 Min.	20 Min.	30 Min.	40 Min.	50 Min.	60 Min.
Amarelo	93,8%	100%	-	-	-	-
Vermelho	96,8%	100%	-	-	-	-
Azul	98,9%	99,9%	100%	-	-	-

Com isso, pode ser observado que num tratamento de 20 minutos, conseguimos a remoção total da cor nos três corantes que são a base da tricromia.

5. – CONCLUSÕES

Apesar de o efluente têxtil ser de grande complexidade, a Eletroflotação mostrou ser bastante eficiente e eficaz, melhorando todos os parâmetros de análise da água.

Também notou-se que a Eletroflotação não serve como regulador de pH, para esse tipo de efluente, visto que, o efluente têxtil já tem um pH elevado. A Eletroflotação não baixou o pH, pelo contrário, isto prejudicaria o descarte devido ao controle ambiental, necessitando neste caso de um controle e tratamento para este parâmetro.

Foi feito um teste de passivação e notou-se que, se não houver inversão de polaridade, os eletrodos tem o tempo de vida bastante reduzido, por outro lado, feita a inversão de polaridade de hora em hora, obteve-se uma vida útil dos eletrodos, mais do que dobrada como sugere a literatura, pois os eletrodos foram utilizados mais de 20 vezes e ainda podem ser utilizados.

Deve-se tomar cuidado com volumes maiores de tratamento, visto que o sedimentado e o sobrenadante podem atingir os eletrodos, o que gera um curto-circuito no reator.

Para o efluente têxtil o material mais eficiente é, sem duvida, o Alumínio, em comparação com Ferro, visto que este, por causa do Fe(III) deixa o efluente com uma cor amarelada, o que perde o propósito deste estudo, e também vale salientar que o Aço Inox, mostrou ser ineficiente na remoção de cor deste tipo de efluente, com rendimento muito abaixo do esperado.

Optando-se pelo uso de eletrodos de Alumínio, foi possível realizar um estudo cabal da remoção de cor, aonde concluí-se que a Eletroflotação é eficiente na região do ultravioleta, região que está relacionada com o uso de produtos auxiliares ao tingimento, é também eficiente na região do visível, onde atuam os corantes. Como o corante entra num banho individual sem os produtos auxiliares, se utilizarmos neste descarte a eletroflotação obtém-se um excelente resultado na remoção da cor em um período de tempo curtíssimo.

Com tudo isso, vemos que a Eletroflotação pode ser um método bastante interessante, além de ser vantajoso, em diversos sentidos, como abordado durante este trabalho, para ser utilizado neste processo produtivo.

6. – SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Fazer um estudo profundo do sobrenadante e o sedimentado com Infravermelho, ou cromatografia, caracterizando-os.

Estudar a possibilidade de usar a Eletroflotação junto com Ultravioleta, para fazer um POA, e com isso estudar a melhoria da qualidade da água

Estudar o tempo de vida do eletrodo

Verificar o custo de toda a operação e com isso avaliar sua viabilidade

Fazer um estudo da cinética das reações

Analisar riscos pra uma estação de tratamento experimental, com sugestão de ser feito logo após o tingimento propriamente dito, não na ETE mas uma extensão da máquina de tingir com posterior reaproveitamento desta água no processo.

Estudar a geometria das placas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 . ABRAHÃO, J.A; SILVA, G.A.; Influência de Alguns Contaminantes na Toxicidade Aguda de Efluentes da Indústria Têxtil. *Revista Química Têxtil*, v. 67, p.8-34, 2002.
- 2 . AL-DEGS, Y.; KHRAISHEH, M. A. M.; ALLEN, S. J.; AHMAD, M. N.; *Water Resource* **2000**, 34, 927.
- 3 . ANDRADE FILHO, J. F.; SANTOS, L. F.; Introdução à Tecnologia Têxtil. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia da Indústria Química e Têxtil (SENAI/CETIQT), v.3, 1987.
- 4 . APHA, Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 21th ed. American Public Health Association, Washington, DC, 2005.
- 5 . ARAÚJO, M.; CASTRO, E.M.M.; Manual de Engenharia Têxtil. Volume 1. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa, 1984.
- 6 . ARSLAN I.; BALCIOGLU I. A.; BAHNEMANN D.W. Advanced Chemical Oxidation of Reactive Dyes in Simulated Dyehouse Effluents by Ferrioxalate - Fenton/UV-A and TiO₂/ UV-A processes. *Dyes and Pigments*, 47 pp 207-218, 2000
- 7 . BALAN, D. S. L.; A indústria têxtil e meio ambiente Tecnologia limpa e controle ambiental, Unesp – Rio Claro, 2002.
- 8 . BEECKMAN, G. B. Water conservation, recycling and reuse water resources development, v. 14, n. 03, p. 353-364, 1998
- 9 . BELLO, L, Água: A Mais Importante Commodity do Século XXI, *Banas Ambiental*, n. 8, pp 34-42, 2000

- 10 . BERNARDIS, R., Novos Conceitos em Tratamento e Reuso de Água, Latin Chemical, 2002
- 11 . BERTAZOLLI, R.; PELEGRINI, R.; Descoloração e degradação de poluentes urbanos em soluções aquosas através do processo fotoeletroquímico – Unicamp, 2001
- 12 . BITENCOURT, M. P. - Reaproveitamento do Lodo Gerado no Processo de Tratamento dos fluentes de Lavanderia (Tingimento e Lavagem). Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, UEM (2002).
- 13 . BOWEN, W. R.; MOHAMMAD, A. W., A Theoretical Basis for Specifying Nanofiltration Membranes-Dye/Salt/Water Streams, Center for Complex Fluids Processing, Department of Chemical and Biological Process Engineering, University of Wales Swansea, United Kingdom, Elsevier, Desalination 117, p. 257-264, Julho de 1998
- 14 . BRAILE, P.M; CAVALCANTI, J.E.W.A . Manual de tratamento de águas residuárias industriais. São Paulo: Cetesb, 1993 p. 319-343
- 15 . BROWN, D., Chemosphere, 12 ed., p. 397, 1983
- 16 . BUSTARD, M.; McMULLAN, G., McHALE, A. P., Biosorption of Textile Dyes by Biomass Derived from Kluyveromyces Marxianus IMB3. Bioprocess Engineering, 19, p. 427-430, 1998
- 17 . CAMMAROTA, M.C; COELHO, M.A.Z.; Tratamento Enzimático Para Remoção de Cor de Efluentes da Indústria Têxtil. Revista Química Têxtil, v. 65, p. 40-47, 2001.

- 18 . CARNEIRO, P. A.; OSUGI, M. E.; SENE, J. J.; ANDERSON, M. A.; ZANONI, M. V. B.; *Electrochim. Acta* **2004**, 49, 3807.
- 19 . CASQUEIRA, R. G., TOREM, M. L. KOHLER, H. M. The removal of zinc from liquid streams by eletroflotation. *Miner. Eng.*, v. 19, n. 13, p. 1388-1392, november 2006
- 20 . CASTILLO, M., BARCELLÓ, D., Characterisation of Organic Pollutants in Textile Wastewater and Ladfill Leachte By Using Toxicity-based Fractionation Methods Followed by Liquid na Gas Chromatography Coupled to Mass Spectrometric Detection, 2000, *Analytica Chimica Acta* 426, p.p. 253-264, 2001
- 21 . CEGARRA, J. Fundamentos científicos y aplicados de la tintura de materias textiles, Universidad Politécnica de Barcelona, 1981
- 22 CEGARRA, J., The dyeing of textile materials - the scientific bases and the techniques of application, Biella, Texilia, 1992
- 23 CERQUEIRA, A. A., Aplicação da técnica de eletrofloculação no tratamento de efluentes têxteis. Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2006. 111 p. Dissertação (Mestrado).
- 24 . CHEN, G., Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and purification Technology*, n. 38, p. 11-41, 2004.
- 25 . CHEN, X.; CHEN, C.; YUE, P. I.; *Sep. Purif. Technol.* **2000**, 19, 65.
- 26 . COOPER, P. J., Society Dyes and Colour, 100 ed., p. 98, 1993
- 27 . CORRÊA JR. B.; FURLAN, L. T.; Redução do Consumo de Água e da Vazão de Efluentes Através do Gerenciamento das Fontes e Reutilização de Águas – a Experiência de Paulínia. *Petro & Química*, v. 251, 72-78, 2003.

- 28 . CORREIA, V. M., STEPHENSON, T., JUDD, S. J.,
Characterisation of Textile Wastewaters - A Review, School of
Water Sciences, Cranfield University, United Kingdom, July 1994,
Environmental Technology, vol. 15, p.p. 917-929, 1994
- 29 . CORREIA, F.N.; REES, Y.; NEVES, E.B.; BARRAQUÉ, B.;
KRAEMER, A.; PERDOK, P.; ZABEL, T. – “Water availability,
uses and institutions in Europe”. in *Institutional Dimensions of
Water Resources Management Congress. Comparative Analysis in
the European Union and the United States*, Lisboa (Portugal), 10-
12 Jul. 1995, **1**, 109p.
- 30 . CRESPILO, F. N., REZENDE, M. O. *Eletroflotação: Princípios
e Aplicações*. São Carlos: Ed. Rima, 2004, 85 p.
- 31 . DADOS TÉCNICOS PARA A INDÚSTRIA TÊXTIL – IPT –
MALUF, E., KOLBE, W. – 2003
- 32 . DANESHVAR, N., SORKHABI, A. H., KASIRI, M. B.
Decolorization of dye solution containing Acid Red 14 by
electrocoagulation with a comparative investigation of different
electrode connections. J. Hazard Mater., B112, 55-62, 2004
- 33 . DE ANGELIS, D.F.; CORSO, C.R.; BIDOIA, E.D.; MORAES,
P.B.; DOMINGOS, R.N. e ROCHA-FILHO, R.C. Eletrolise de
resíduos poluidores. I - Efluente de uma indústria liofilizadora de
condimentos. *Quimica Nova*, v. 21, n. 1, p. 20-24, 1998.
- 34 . DEN, W., HUANG, C. Electrocoagulation for removal of silica
nano-particles from chemical-mechanical-planarization
wastewater. *Cool. Surf. A: PhPhysicochem. Eng. Aspects* 254, p.
81-89, 2005

- 35 . DESPERTAI! - Tingimento de tecido — no passado e no presente
-. p. 24-25, Abril 2007. Watchtower Bible and Tract Society of
New York. São Paulo: Sociedade Torre de Vigia de Bíblias e
Tratados
- 36 . DONINI, J. C., KAN, J., SZYNKARCZUK, J., HASSAN, T. A.
Operational cost of eletrocoagulation. *Can. J. Chem. Eng.*, 72, p.
1007-1012, 1994
- 37 . DOS SANTOS, A.B. *Reductive decolourisation of dyes by
thermophilic anaerobic granular sludge*. (PhD Thesis). Sub-
department of Environmental Technology, Wageningen:
Wageningen University, 2005.
- 38 . DROSTE, R. L., Theory and practice of water and wastewater
treatment. John Wiley & Sons, Inc. USA, 789 p. 1997.
- 39 . DUNCAN, A. Bibliographic teaching outline; Introductory
pollution prevention materials - National pollution center for higher
education, 1994
- 40 . DUTRA, L. E. D.; ANTUNES, A. M. S., A Água e a Industria
Quimica uma Questão de Responsabilidade Ambiental. O Estado
das Aguas no Brasil 2001-2002, ANA = Agencia Nacional das
Aguas, 1 ed., pp 77-101, 2003
- 41 . FERREIRA, L. H., Remoção de solidos em suspensão de efluente
da industria de papel por eletroflotação, 2006
- 42 . FIGUEIREDO, R. F., FADINI, P. S., NETO, N. L. C. A Eletrólise
e o Tratamento de Esgotos. *Bio*, v.5, n.4, p. 59-63, 1993

- 43 . FORGACS, E.; CSERHÁTI, T.; OROS, G., Removal of Synthetic Dyes from Wastewaters: a Review, Research Laboratory of Materials and Environmental Chemistry, Chemical Research Center, Hungarian Academy of Science, Budapest, Hungary, *Environment International*, 30, p. 953-971, maio de 2004.
- 44 . FORNARI, M. M. T., Aplicação da Técnica de Eletro-Floculação no Tratamento de Efluentes de Curtume, Dissertação de Mestrado, 2007, UNIOESTE
- 45 . FREITAS, K. R., Caracterização e Reuso de Efluentes do Processo de Beneficiamento da Indústria Têxtil, Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Univ. Federal de Santa Catarina, Fev. 2002
- 46 . GAO, P.; CHEN, X.; SHGEN, F.; CHEN, G. Removal of chromium (VI) from wastewater by combined electrocoagulation-electroflotation without a filter. *Sep. Purif. Technol.*, n. 43, p. 117-123, 2005
- 47 . GARRIDO, R. J. S., Alguns Pontos de Referencia para o Estágio Atual da Política Nacional de Recursos Hídricos. O Estado das Aguas no Brasil 2001-2002, ANA - Agencia Nacional de Aguas, 1 ed. P.p. 3-15, 2003
- 48 . GE, J., QU, J., LEI, P., LIU, H. New bipolar electrocoagulation-electroflotation process for the treatment of laundry wastewater. *Sep. Purif. Technol.*, 36, p. 33-39, 2004
- 49 . GLEICK, P., Water and conflict: Freshwater resources and international security, v. 18, n. 01, 1993
- 50 . GOLDER, A. K., HRIKAYA, N., SAMANTA, A. N., RAY, S. Electrocoagulation of methylene blue and eosin yellowish using mild steel electrodes. *J. Hazard Mater. B*. 127, p. 134-140, 2005

- 51 . GOULD, P. P., GROFF, K. A., Ozone Sci. Eng., 9 ed., p. 153, 1987
- 52 . GUARATINI, C. C. I.; ZANONI, M. V. B. Corantes Têxteis. Química Nova. v.23, pp 71, 78 2000.
- 53 . GUGLIELMETTI, L., in R. Anliker e G. Muller (eds), Fluorescent Whitening Agents. Threnie Stuttgart, p. 180, 1980
- 54 . GUTIÉRREZ, M. C.; CRESPI, M.; LÓPEZ-GRIMAU, V.; VALLDEPERAS, J., Reutilização de Aguas Residuais Descoloridas Mediante um Tratamento Eletroquímico, 2007
- 55 . HAMMER, M.J. – Sistemas de Abastecimento de Água e Esgotos, 1ª edição, Editora LTC, Rio de Janeiro, 1979.
- 56 . HART, S. How green production might sustain the world. Journal of the northwest environmental, 1994, 10: 4-14.
- 57 . HEMKEMEIER, MARCELO. *Estudo de tratamento eletrolítico aplicado a efluente líquido de abetodouro avícola*. Campinas: Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, 2001, 249 p. Tese (Doutorado)
- 58 . HESPANHOL, I.; Água e saneamento básico no Brasil: uma visão realista, 1999
- 59 . HITZ, H. R., HUBER, W., REED, R. H., J. Society Dye and Colour, 94 ed., p. 71, 1978

- 60 . HOLT, P. K., BARTON, G. W., WARK, M., MITCHELL, C. A. A quaitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation. *Cool. Surf. A: Pysicochem. Eng. Aspects* 211, p. 233-248, 2002
- 61 . HOSNY, A. Y., Separating oil from oil-water emulsion by electroflotation technique. *Separation Technology*, n. 6, p. 9-17, 1996.
- 62 . HU, C. Y.; LO, S. L., KUAN, W. H. Effects of co-existing anions on fluoride removal in electrocoagulation (EC) process using aluminum electrodes. *Water Res.*, n. 37, p. 4513-4523, 2003.
- 63 . IRDEMEZ, S., DEMIRCIOGLU, N. YILDIZ, Y. S. The effects of pH on phosphate removal from wastewater by electrocoagulation with iron plate electrodes. *J. Hazard. Mater.*,v. 137, n. 2, p. 1231-1235, 21 september 2006
- 64 . KINDSCHY, J. W.; KRAFT, M. e CARPENTER, M., Guide to hazardous materials nad wast management, Solano Press Book, 1997, p. 345
- 65 . KOBYA, M., CAN, O. T., BAYRAMOGLU, M. Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. *J. Hazard. Mater. B*. 100 p. 163-178,2006
- 66 . KOYUNCU, I., Reactive Dye Romoval in Dye/Salt Mixtures by Nanofiltration Membranes Containing Vinylssulphone Dyes: Effects of Feed Concentration and Cross Flow Velocity, Istambul Technical University, Faculty of Civil Engineering, Istambul, Turkey, Elsevier, *Desalination* 143, p. 243-253, fevereiro 2002

- 67 . KUMAR, P. R., CHAUDHARI, S., KHILAR, K. C., MAHAJAN, S. P. Removal of arsenic from water by electrocoagulation. *Chemosphere*, n. 55, p. 1245-1252, 2004
- 68 . KUNZ, A. (1999). Remediação de Efluente Têxtil. Tese de Doutorado, Instituto de Química – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 1999
- 69 . LA ROVERE, R. L, Perspectivas das micro, pequenas e médias empresas no Brasil, *Revista de Economia Contemporânea*, 2001
- 70 . LAING, I. G. The impact of effluent regulations on the dyeing industry. *Review of Progress in Coloration*, v. 21, pp 56-70, 1991
- 71 . LARUE, O., VOROBIEV, E., VU, C., DURAND, B. Electrocoagulation and coagulation by iron of latex particles in aqueous suspensions. *Sep. Purif. Technol.* 31, p. 177-192, 2003
- 72 . LEÃO, M.M.D.; CARNEIRO, E.V.; ANDRADE, L.I.F.; SOARES, A.F.S.; OLIVEIRA, A.P.; SANTANA, D.W.E.A. Aplicação da reação de Fenton na remoção de cor e da DQO de efluentes têxteis. In: 20o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. CD ROM... Rio de Janeiro, 10 a 14 de maio de 1999.
- 73 . LIMA, J. F. Um panorama da gestão e utilização dos recursos hídricos nos países da Bacia do Prata, 1999
- 74 . MANSOUR, L. B., CHALBI, S. Removal of oil from oil/water emulsions using electroflotation process. *J. Appl. Electrochem.*, v. 36, n.5, may 2006.
- 75 . MAYS, L. W. Water resources: an introduction. In: WATER RESOURCES HANDBOOK, McGraw-Hill, 1996, p. 693

- 76 . MEYBECK, M.; CHAPMAN, D.; HELMER, R., Global freshwater quality: a first assessment, Cambridge, Massachusetts, 1990
- 77 . MODIRSHALA, N., BEHNAJADY, M. A. , KOOSHAIAN, S. Investigation of the effects of different electrode of tartrazine from aqueous solutions by electrocoagulation. *Dyes Pigm.*, 74, 2, p. 249-257, 2007
- 78 MOLLAH, M. Y. A. et al. Electrocoagulation (EC) – science and applications. *Journal of Hazardous Materials*, v. 84, p. 29-41, 2001.
- 79 . MOLLAH, M. Y. A., MORKOSVSKY, P., GOMES, J. A. G., KESMEZ, M., PARGA, J., COCKE, D. L. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *J. Hazard Mater.* V. 114, p. 199-210, outubro 2004
- 80 . MORAN, C., HALL, M. E., HOWELL, R., Effects of Sewage Treatment on Textile Effluent, *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, 113, p.p. 272-274, 1997
- 81 . MORAN, J. M; MORGAN, M. D.; WIERSMA, J. H. Introduction to environmental science second edition, W. H. Freeman and company, N. Y, 1986
- 82 . MORRISON, R. T., BOYD, R. N., Química organica - Fundação Calouste Gulbenkian, 13a ed., 1996
- 83 . MOSTEFA, N. M.; TIR, M. Coupling flocculation with electroflotation for waste oil/water emulsion treatment. Optimization of the operationg conditions. *Desalination*, v. 161, nº; pp. 115-121, 2004.

- 84 . MURUGANANTHAN, M., RAJU, G. B., PRABHAKAR, S.
Separation of pollutants from tannery effluents by electro flotation.
Sep. Purif. Technol., 40, p. 69-75, 2004
- 85 . NOVAES, W. A água está pedindo muita urgência. O estado de
São Paulo, 06 de out. 2006
- 86 . PEARCE, C. I.; LLOYD, J. R.; GUTHRIE, J. T., The Removal of
Colour from Textile Wastewater Using Whole Bacterial Cells: A
Review, The Department of Colour Chemistry, University of
Leeds, Leeds, UK, Williamson Research Centre of
MolecularEnvironmental Science and the Department of Earth
Sciences, University of Manchester, Manchester, UK, Elsevier,
Dyes and Pigments 58, p. 179-196, março 2003
- 87 . PERALTA-ZAMORA, P.; TIBURTIUS, E.R.L; MORAES, S.G;
DURÁN, N.; Degradação Enzimática de Corantes Têxteis. *Revista
Química Têxtil*, v.68, p.32-38, 2002.
- 88 . PEREIRA, A. F. S., Aplicação da eletroaflotação no tratamento de
efluente na indústria têxtil 2007
- 89 . PERES, C. S.; ABRAHÃO, A. J., Características e sistemas de
tratamento de águas residuais da indústria têxtil - uma primeira
abordagem, *Revista Química Têxtil*, pp. 22-39, 1998
- 90 . PERSPICAZ - Watchtower Bible and Tract Society of New York.
(Org.) - ESTUDO PERSPICAZ DAS ESCRITURAS. São Paulo:
Sociedade Torre de Vigia de Bíblias e Tratados, 1991, p. 114-115.
Vol. 2.

- 91 . PHIPPS, E., Pollution prevention concepts and principles. In: National Pollution Prevention Center for higher education, Introduction Pollution Prevention Materials - University of Michigan, 1995
- 92 . PINHEIRO, H. M.; TOURAUD, E.; THOMAS, O. - Aromatic Amines From Azo Dye Reduction: Status Review With Emphasis on Direct UV Spectrophotometric Detection in Textile Industry Wastewaters. *Dyes and Pigments*. V.61, p.121-139, 2004
- 93 . POON, C. P. C. Electroflotation for groundwater decontamination. *J. Hazard. Mater.*, 35, p. 159-170, 1997
- 94 . PRETORIUS, W. A. LOHANNES, W. G. & LEMPert, G. G. Electrolytic iron flocculant production with a bipolar electrode in series arrangement. *Water AS*, 17 (02) p. 133-138, 1991
- 95 . REBOUÇAS, A., Água e desenvolvimento rural. *Estudos Avançados* n.15, p. 327- 344, 2001.
- 96 . ROSALEN, L.A., Biodegradação de efluentes têxteis e nove corantes técnicos utilizando fungos basidiomicetos, *Revista Química Têxtil*, n. 76 p. 44-52, 2004
- 97 . ROZZI, A; MALPEI, F.; COLLI, S.; UBERTI, M., Distribution of Absorbance in the Visible Spectrum Related to Molecular size Fractions in Secondary and Tertiary Municipal - Textile Effluent. *Water Science Technology*, 38, p. 473-480, 1998
- 98 . RUBACH, S.; SAUR, I. F. Onshore testing of produced water by electroflocculation *Filt. Sep.*, p. 877-882, october 1997
- 99 . RUBIO, J.; SOUZA, M. L.; SMITH, R. W. Overview of flotation as a wastewater treatment technique. **Minerals Engineering**, v.15, p.139-155, 2002.

- 100 . SALEM, V., Tingimento Têxtil, Apostila do Curso de Tingimento Têxtil, Golden Química do Brasil, Módulo I e II, novembro de 2000
- 101 . SALES, P.T.F., OLIVEIRA, M.B, KYIOMI, P., DUTRA, .M.S., GOMES, W.V., BRITO, N.N., BARBOSA, A.C., SILVA, C.R.U., FIORENTINO, J.C., LOPES, T., PELEGRINI, R., “ tratamento de corante dispersivo por processo fotocatalítico com TiO₂” III Fórum de Estudos Contábeis, FIC, Rio Claro Sp, 2003
- 102 . SANIN, L. B. B.; A Indústria Têxtil e o Meio Ambiente. Tecnologia e Meio Ambiente. In: XIV Congresso da FLAQT – Caracas, p.13-34, 1997.
- 103 . SANTOS, M. A., Remoção de Cor de Efluentes Texteis Através de um Processo Biológico; Dissertação de Mestrado, UFSC, Santa Catarina, Brasil, 1998
- 104 . SANTOS, M. R. G.; GOULART, M. O. F.; TONHOLO, J.; ZANTA, C. L. P. S., The application of electrochemical technology to the remediation of oily wastewater. *Chemosphere*, n. 64, p. 393-399, 2006.
- 105 . SHEN, F., CHEN, X., GAO, P., CHEN, G. Electrochemical removal of fluoride ions from industrial wasterwater. *Chem. Eng. Sci.*, n. 58, p. 987-993, 2003.
- 106 . SHEN, Y.; WANG, D.; J. HAZAR. MATER., 2002, 89, 267
- 107 . SILVA, A. L. C., Processo eletrolítico: Uma alternativa para o tratamento de águas residuárias. 2002, 60f. Monografia de Especialização em Química Ambiental, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

- 108 . SILVA, G. L., “ Avaliação do impacto ambiental gerado pelo processo de tingimento utilizado nas indústrias do setor têxtil: influência na coloração das águas residuárias descartadas”, Exame de Qualificação de Doutorado da Faculdade de Engenharia Química, Campinas SP, 2003
- 109 . SPERLING, M. V.; Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos Princípios de Tratamento Biológico de Águas Residuárias. Vol. 1 BeloHorizonte: DESA-UFMG, 1996
- 110 . STEINHART, M. R. V., Auxiliares Texteis do Ponto de Vista dos Tensioativos, Quimica Têxtil, p.p. 76-80, dezembro de 2000
- 111 . STYLIDI, M.; KONARIDES, D. I.; VERYKIOS, X. E.; Appl. Catal., B, 2003, 40, 271
- 112 . TAKATSUJI, W.; NAKAUCHI, M.; YOSHIDA, H., Industrial Technology Center of Wakayama Prefecture, Wakayama, Department of Chemical Engineering, Osaka Prefecture University, Sakai, Japan, Journal of Bioscience and Bioengineering, vol 88, n. 3, p.p. 348-351, junho de 1999
- 113 . TALARPOSHTI, A. M.; DONNELLY, T.; ANDERSON, G. K.. Colour removal from a simulated dye wastewater colour removal from a simulated dye wastewater using a two phase anaerobic packed bed reator, *Water reserch*, v. 35, n. 2, pp 425-432, 2001
- 114 . TEIXEIRA, W. A. Tingimentos texteis com água de reuso via processo H₂O₂/UV - Universidade de São Paulo, 2009
- 115 . TOLEDO, R. A. S.; Tecnologia da Reciclagem. Quimica Têxtil, p.p. 8-14, Março de 2004

- 116 . TOREM, M. L.; CUNHA, F. O.; CASQUEIRA, R. G., Eletroflotação aplicada a remoção de metais pesados contidos em efluentes líquidos. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*. v. 1, n.4 , p. 40-46, 2005.
- 117 . VANDEVIVERE, P.C., BIANCHI, R., VESTRETE, W., “ Treatment and reuse of wastewater from the textile wet-processing industry: review of emerging technologies” , *J. Chemical Technological and Biotechnology*, 72, pp289-302, 1998.
- 118 . WALLACE, T. H., Biological treatment of a synthetic dye water and na industrial textile wasterwater containing azo dye compounds, 2001
- 119 . WIENDL, W. G. *Processos eletrolíticos no tratamento de esgotos sanitários*. Rio de Janeiro: ABES, 1998, 367 p.
- 120 . ZANONI, M. V. B. *Ciencia Hoje*, 2001, pp. 61-64



Remoção de cor de efluente têxtil pela técnica de eletroflotação Um estudo espectrofotométrico

Autores: Ricardo Augusto Camboim
(ricardocamboim@gmail.com)

Orientação: Prof. Dr. João Sinézio de Carvalho Campos
(sinezio@feg.unicamp.br)

Departamento de Tecnologia de Polímeros,
Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP
Campinas, S.P., Brasil – CP: 6066, CEP 13083-970

Revisão Técnica: Humberto Sabino

RESUMO

Com a crescente preocupação ambiental e ecológica, bem como o aumento no rigor legislativo, torna-se necessário aprimorar e desenvolver técnicas que viabilizem o descarte dos efluentes da indústria têxtil, tanto de uma forma mais limpa como mínima.

No presente artigo utiliza-se a técnica de eletroflotação, usando eletrodos de ferro e alumínio, para o tratamento de efluente de tinturaria de tecidos, a qual utiliza corantes reativos.

É importante ressaltar que, neste processo, existem várias vantagens em utilizá-lo, e, dentre elas, podemos citar: 1) não utilizar nenhum produto químico, mas, somente energia elétrica; 2) grande remoção da coloração do efluente; 3) seu tempo de tratamento ser bem menor, em comparação com outros tratamentos já experimentados.

Além de enfatizar a importância da água, será descrita toda a parte experimental desta técnica, contendo seus materiais e métodos, resultados obtidos e conclusões.

Pela análise visual do sobrenadante, verifica-se, adicionalmente, uma significativa remoção de material orgânico, tornando-o atrativo do ponto de vista ambiental.

PALAVRAS-CHAVE: eletroflotação, efluente têxtil, tratamento de água, preocupação ambiental

INTRODUÇÃO:

"Water is for life not to dye".

"Água é para a vida não para tingir" – Esse foi o grande mote da última ITMA (*International Textile Machinery*

Exhibition), realizada em 2007, e essa é uma preocupação crescente para a Indústria Têxtil.

A água é uma das principais matérias primas no acabamento têxtil. Mesmo com o avanço tecnológico e modernização de equipamentos e processos, sempre é necessária a utilização de uma quantidade considerável de água, tanto para obtenção de aquecimento ou resfriamento, nos processos de beneficiamento, como também tem a função de meio de transporte dos produtos químicos utilizados, enfim, ela é utilizada em todas as fases do processo de beneficiamento: lavagem, purga, tingimento e amaciamento. Ela serve também para a retirada do excesso dos produtos considerados indesejáveis ao substrato têxtil, como, por exemplo, os corantes reativos, que por terem uma fixação de 60-85%, são retirados em sua forma reagida, bem como em sua forma hidrolisada, através de sucessivas lavagens.

Outra questão importante a ser analisada diz respeito à qualidade do efluente, pois tais efluentes são caracterizados por apresentar elevada carga orgânica e forte coloração (BERTAZZOLI et al, 2001), podendo causar, além de contaminações, impacto no corpo receptor (KUNZ, 1999).

O problema ambiental agrava-se à medida que esses efluentes são descartados em corpos hídricos responsáveis pelo abastecimento de água em municípios. Além de acarretar problemas de qualidade de água para o abastecimento, elevam-se os custos das empresas de saneamento responsáveis pelo tratamento e abastecimento d'água.





Hoje, como nunca antes, tanto a quantidade quanto a qualidade da água doce do planeta estão ameaçadas. Não podemos nos deixar enganar pelo fato de que, mesmo em algumas regiões afortunadas, ela é apenas aparentemente abundante.

Os aquíferos estão entre os principais depósitos de água doce da Terra, mas não são inesgotáveis. Esses depósitos de água são como dinheiro no banco: não dá para continuar fazendo saques se a pessoa faz poucos depósitos. Mais cedo ou mais tarde, é preciso prestar contas.

Algumas citações a seguir expressam e ratificam esta importante preocupação:

"Continuamos agindo como se a água doce fosse um recurso inesgotável. Mas não é." — Kofi Annan, ex-Secretário-Geral Das Nações Unidas.

"Uma das grandes contradições da natureza humana é que só damos valor às coisas quando elas se tornam escassas", diz Elizabeth Dowdeswell, subsecretária-geral da ONU. "Só entendemos o valor da água quando o poço seca. E os poços estão secando, não só em regiões sujeitas à secas, mas também em lugares que em geral não são associados à escassez de água."

Assim, o grande desafio será reduzir o consumo de água, diminuir a poluição, e no caso da área têxtil, minimizar a questão da cor no efluente, sem afetar a otimização do processo e os rendimentos do negócio.

Neste sentido, a indústria têxtil vem buscando alternativas tecnológicas tanto para diminuir a quantidade de água utilizada em equipamentos e processos, além de inserir a importante variável ecológica na mentalidade do setor produtivo, quanto para se adequar às especificações qualitativas de Órgãos Ambientais, que desempenham um papel extremamente atuante, no sentido de que sejam devidamente instalados sistemas de tratamento para a melhoria da qualidade do efluente, a fim de minimizar os problemas ambientais.

As Resoluções CONAMA N°20/86 e a sua sucessora, do dia 17.03.2005, a Resolução N° 357/05, não fixavam limites de cor para o lançamento de efluentes, e, durante muitos anos se subestimou o impacto ambiental causado pelo lançamento de efluentes têxteis com níveis de cor elevados, muitas vezes considerando-se a cor como sendo

apenas um aspecto meramente de natureza visual e estética, entretanto, segundo TEIXEIRA (2009), uma análise criteriosa da referida Resolução, estipula que, de acordo com o tipo de água (doce, salgada ou salobra), a Resolução determina um valor máximo de 75 mg Pt/L (valor utilizado como padrão de cor). Portanto, não é permitido alterar a coloração do corpo receptor, suas características, seu enquadramento e, principalmente, a sua qualidade.

É importante ressaltar que os processos de tratamentos de efluentes convencionais até o momento utilizados, são incapazes de remover os corantes de maneira total e ambientalmente correta.

Os métodos empregados para a otimização de DQO (Demanda Química de Oxigênio), da maioria dos efluentes estão bem estabelecidos. No entanto, no que se refere aos tratamentos utilizados para a remoção da cor do efluente tratado, estes tem se mostrado complexos demais e de difícil implementação.

Muitos dos processos utilizados em estações de tratamento de efluentes envolvem a adição de agentes coagulantes e floculantes, como, por exemplo, polieletrólitos como sais de ferro e de alumínio.

ELETROFLOTAÇÃO

Dentro da vasta literatura é conhecida a grande variedade de tratamentos de efluentes, no entanto, o presente trabalho visa mostrar resultados obtidos com o processo de eletroflotação, no qual utiliza-se apenas energia elétrica, ou seja, não há adição de nenhum outro elemento. Cabe aqui, ressaltar que este trabalho é uma continuidade das pesquisas realizadas no FISPOL, grupo de trabalho orientado pelo prof. Sinézio, o qual vem orientando trabalhos de pós graduação, nesta área desde 2002, com menção aos trabalhos desenvolvidos por Aline Figueiredo Soares Pereira e Leticia Henn Ferreira, obtendo excelente resultado com a técnica de eletroflotação, destaca-se também o primeiro prêmio obtido no congresso têxtil no Chile em 2008.

Apresenta-se a seguir o que vem a ser a eletroflotação aplicado em efluente têxtil de uma tinturaria. Posteriormente, a parte experimental deste trabalho, descrevendo-se os materiais, e os métodos utilizados, e por fim, são

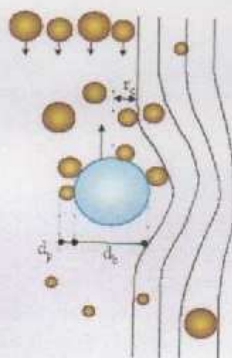


apresentados os resultados, as conclusões e a bibliografia utilizada.

O grande diferencial do processo de eletroflotação é que não há a adição de produtos químicos, pois, trata-se de um processo eletroquímico, baseado na geração de bolhas de gás (geralmente, H_2 ou O_2), via eletrólise das moléculas de água, e, independente do material utilizado, estas bolhas são responsáveis pelo transporte das partículas coaguladas até a superfície e, com isto, substituem os aditivos floclulantes, eliminando resíduos poluidores do processo.

A flotação de partículas em suspensão é um fenômeno cinético composto por diversas etapas (ou micro-fenômenos), que se encontram ilustrados na Figura 1, abaixo:

Figura 1. Fenômeno de "captura" (colisão + adesão) de partículas de diâmetro (d) por bolhas de diâmetro (d_b) dentro de um raio crítico (r_c).



Fonte: Torem, Maurício Leonardo –
Flotação Aplicada à Remoção de Metais Pesados

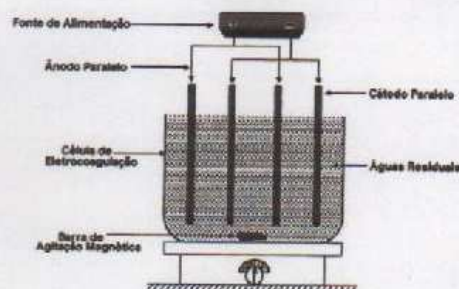
Com a flotação há a formação de uma camada de espuma, denominada sobrenadante, cuja espessura aumenta com o decorrer do tempo de tratamento.

Esta tecnologia torna-se uma alternativa promissora para o atendimento à legislação ambiental. Ela possibilita ampliar a capacidade de tratamento dos sistemas físico-químicos tradicionais, pois utiliza os mesmos fundamentos básicos de coagulação-floculação, e, adicionalmente, disponibiliza elementos que potencializam o método pela geração de oxigênio e hidrogênio nas reações

de eletrólise, formando um fluxo ascendente de microbolhas (Figura 1) que interagem com todo efluente presente no interior do reator, sendo este submetido às reações de oxidação e redução, facilitando a floculação e a flotação da carga poluidora existente, aumentando a eficiência do processo de tratamento (SILVA, 2002).

Segundo FERREIRA (2006), tecnicamente, a eletroflotação é um sistema em que há a aplicação de uma diferença de potencial (d.d.p.) num conjunto de placas (eletrodos) dispostas paralelamente e intercaladas, em arranjo denominado de colméia, que se encontram completamente submersas no efluente a ser tratado, conforme ilustra a Figura 2:

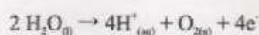
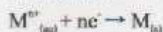
Figura 2. Desenho esquemático de um reator de eletroflotação em escala de bancada com eletrodos monopolares conectados em paralelo (MOLLAH et al., 2004)



Quando a d.d.p. é aplicada, por uma fonte externa, o material do ânodo é oxidado. Da mesma forma, o cátodo estará sujeito à redução, ou deposição redutiva, do elemento metálico.

Durante a eletrólise, ocorre a transferência de elétrons entre o poluente e o eletrodo. Através desta transferência, ocorrem reações do tipo redox, que transformam ou destroem os compostos poluentes, mineralizando-os ou tornando-os mais biodegradáveis. A eletrólise pode ser conduzida para promover reações catódicas, no caso de remoção de metais, ou para promover reações anódicas, favorecendo, então, a oxidação de compostos orgânicos.

As principais reações com o metal M estão resumidas a seguir (MOLLAH et al., 2004):

**No ânodo:****No cátodo:****MATERIAIS****EFLUENTES**

As amostragens para caracterização dos efluentes foram coletadas diretamente na fábrica no ponto de entrada no sistema de tratamento. Chamou-se de efluente bruto aquele que é proveniente do processo industrial, coletado no tanque de equalização, antes do tratamento físico-químico. Foram colhidas quatro amostragens, em dias diferentes, no ponto acima citado.

REATOR

Para realização dos experimentos de eletroflotação, o arranjo escolhido para o reator foi o arranjo monopolar em paralelo, utilizando um reservatório de polietileno em forma de cuba com um volume útil de 50 litros.

Utilizou-se uma fonte de alimentação com potência ajustável de até 300 Watts, contendo um protetor de corrente de curto. Adaptou-se no fundo da cuba uma torneira para a retirada de sedimento, e na parte superior, uma seringa para coleta de amostras, conforme figura 3:

Figura 3. Reator com coletor de amostras



Após alimentação do reator, com o efluente a ser tratado, os eletrodos metálicos são polarizados por intermédio da fonte de energia e, de acordo com as condições impostas ao tratamento, ajusta-se a potência elétrica. Após este ajuste, as amostras do efluente tratado são coletadas em intervalos de tempos.

As amostras são submetidas à medidas de temperatura, condutividade e pH. Já a análise de cor é feita em um espectrofotômetro.

MÉTODOS

O espectrofotômetro é o equipamento que mede a quantidade de luz foi absorvida pela amostra. Antes de passar pela amostra, a intensidade da luz é simbolizada por I_0 , e depois de passar pela amostra é simbolizada por I .

A transmitância da amostra é definida pela razão (I/I_0) , a qual normalmente é expressa em porcentagem de transmitância (%T). A partir dessa informação, a absorvância de ambos é determinada para esse certo comprimento de onda ou como uma função de uma faixa de comprimentos de onda.

Uma cela transparente, comumente chamada de cuvete, é preenchida com a amostra líquida e inserida no espectrofotômetro. O caminho óptico L pela amostra é então a largura da cuvete.

Para se obter informação sobre a absorção de uma amostra, ela é inserida no caminho óptico do aparelho. Então, luz UV e/ou visível em um certo comprimento de onda (ou uma faixa de comprimentos de ondas) é passada pela amostra.

O método utiliza a Lei de Beer-Lambert para determinar de um modo quantitativo a concentração de substâncias em solução que absorvem radiação:

$$A = -\log_{10}(I/I_0) = \epsilon \cdot c \cdot L$$

Onde:

* A é a absorvância medida;

* I_0 é a intensidade da luz incidente a um dado comprimento de onda;

* I é a intensidade transmitida pela amostra;

* L é o caminho óptico pela amostra (distância que a luz percorreu por ela),

* ϵ é uma constante conhecida como absorbtividade molar (a qual varia de substância para substância)





* c é a concentração da substância.

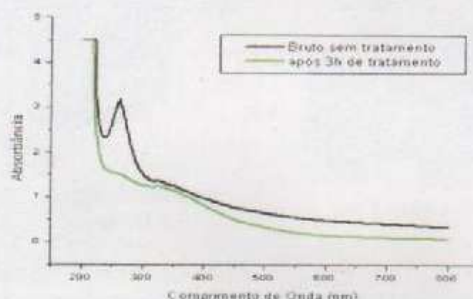
O limite do aparelho é de 4,5 de Absorbância, e acima disto, o aparelho não mede refletindo assim a opacidade do efluente.

RESULTADOS OBTIDOS

A seguir, são apresentados os resultados obtidos neste trabalho, onde utiliza-se de eletrodos de ferro e de alumínio.

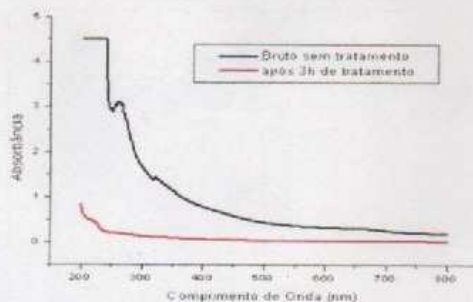
ELETRODOS DE FERRO

Figura 4. Absorbância em função do comprimento de onda do Efluente Tratado com eletrodos de Ferro.



ELETRODOS DE ALUMÍNIO

Figura 5. Absorbância em função do comprimento de onda do Efluente tratado com eletrodos de alumínio

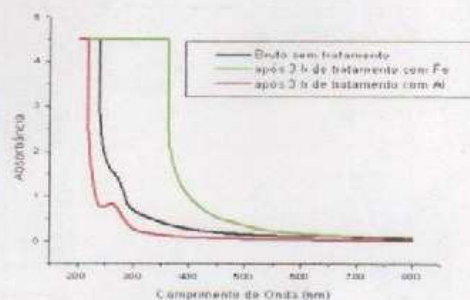


Comparando os dois gráficos acima, nota-se que o tratamento com placas de alumínio mostra-se mais eficiente do que o tratamento com placas de ferro. Pode-se notar que, enquanto o tratamento com ferro só começa a

perder a opacidade a partir de 250 nm, no de Alumínio vemos que o efluente tem sua opacidade muito baixa desde o começo da medição. Após este estudo, foi feito um estudo híbrido, usando na primeira metade do tempo placas de ferro e na segunda metade placas de alumínio, obtendo-se o resultado abaixo (Figura 6).

ELETRODOS DE FERRO E ALUMÍNIO

Figura 6: Absorbância em função do comprimento de onda do Efluente Tratado com eletrodos de Ferro (3 h) e depois com eletrodos de Alumínio (3 h)



Observou-se que, no tratamento com eletrodos de ferro, o efluente adquire uma coloração amarelada, isso ocorre devido à presença de Fe^{III} , que é liberado nas reações, fazendo com que na leitura do espectrofotômetro a curva do efluente tratado após 3 horas não tenha o efeito desejado, na faixa até 550 nm, resultando, portanto, na piora do rendimento do tratamento. Isso pode ser observado na Figura 7, onde temos 7 amostragens a primeira localizada do lado esquerdo é o Efluente Bruto sem tratamento e depois as amostras foram tiradas de hora em hora, as três primeiras a seguir são tratadas com eletrodos de Ferro onde pode-se notar a forte coloração amarela. Já nas amostras seguintes que foram tratadas com Alumínio, pode-se notar uma melhora significativa, sendo que a última amostra, a que está localizada na extrema direita da Figura 7, temos uma redução de 70% da cor do Efluente.

Como este estudo tem como objetivo a remoção da cor no efluente têxtil, optou-se pela utilização de placas de Alumínio, como melhor opção para obtenção dos resultados.



Figura 7. Tratamento de Efluente com Eletrodos de Ferro para as três primeiras horas, e depois com eletrodos de Alumínio para as três horas seguintes.



Abaixo encontram-se as seqüências de fotos tiradas do tratamento do efluente com placas de Alumínio:

Figura 8: Tratamento de Efluente com Eletrodos de Alumínio onde vemos o efluente bruto mostrado do lado esquerdo e depois as amostras coletadas de hora em hora, até um limite de 6 horas



ELETRODOS DE ALUMÍNIO

Como o corante, mesmo em porções de p.p.b. é detectável a olho nu, esta é a análise mais relevante para este estudo.

ESTUDO NA ÁREA DO VISÍVEL AMOSTRA 1 (Coloração do efluente azul)

Figura 9. Absorbância em função do comprimento de onda do Efluente tratado com eletrodos de alumínio

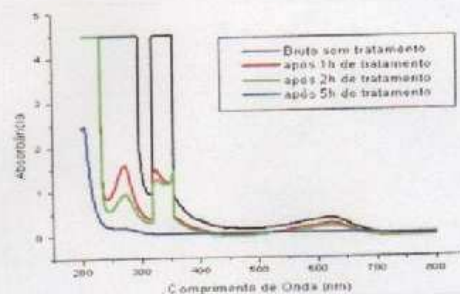
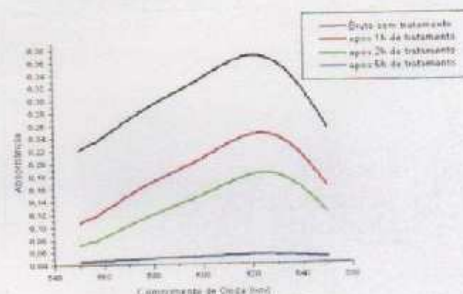


Figura 10. Absorbância em função do comprimento de onda do Efluente (Azul) tratado na região do visível



Aqui foi observada uma queda significativa na cor do efluente, utilizando os picos encontrados no valor de $\lambda = 620$ nm, onde temos uma absorbância do efluente bruto de 0,3684 e do efluente tratado a Absorbância é de 0,0541, utilizando a fórmula de cálculo de remoção de cor:

$$\varepsilon = 100 \frac{A_i - A_f}{A_i}$$

Onde:

ε = Eficiência de remoção de cor

A_i = Absorbância Inicial

A_f = Absorbância Final

Neste caso, conseguimos uma eficiência de remoção de cor 85%.

Nas figuras a seguir, foi observado uma queda significativa na cor do efluente, utilizando os picos encontrados no valor de $\lambda = 520$ nm, tivemos uma remoção de 100% da cor do efluente.



Figura 11. Absorbância em função do comprimento de onda do Efluente (Vermelho) tratado com eletrodos de alumínio

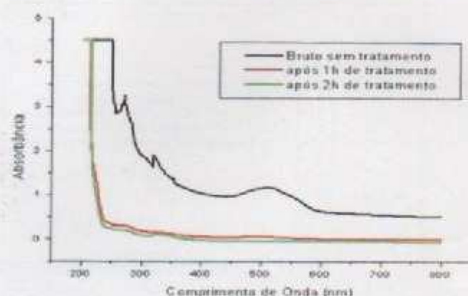
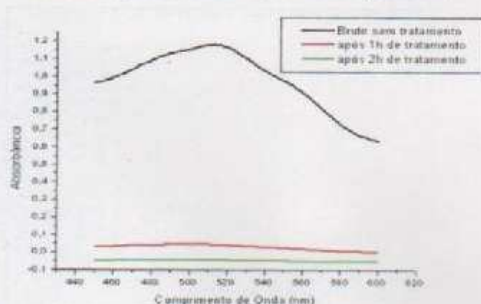


Figura 12. Absorbância em função do comprimento de onda do Efluente (Vermelho) tratado na região do visível



CONCLUSÕES

Observa-se que, pelos dados obtidos, para o tratamento de efluentes de uma tinturaria de tecidos, com corantes reativos, o melhor material para as placas, entre aqueles que foram testados, é o alumínio, pois para a mesma amostra de um efluente obteve-se uma redução de 91,7%, ao se utilizar o Alumínio, ao passo que utilizando Ferro alcançou-se uma redução de cor de 70,3%.

Ao aprofundar o estudo com as placas de Alumínio, trataram-se amostras de efluente nas cores azul e vermelho, obteve-se como resultado uma redução de 85% da cor do efluente azul (6 h de tratamento). Já na amostra de coloração vermelha, obteve-se uma remoção total da cor (100%) em um tempo relativamente curto (2 h de tratamento), cabe ressaltar que ambos os resultados são bons, frente aos tratamentos convencionais de efluentes.

Esse resultado é consequência da complexidade do efluente, sendo assim objetiva-se a partir deste trabalho

continuar a investigação, fazendo assim, um estudo mais apurado procurando a melhor alternativa do ponto de coleta e tratamento do efluente.

Cabe ressaltar que, como vantagem, temos que na técnica de eletroflotação não são utilizados artificiais químicos (floculantes, coagulantes, corretores de pH,...), mas somente corrente elétrica e um reator de simples montagem e prático manuseio. Outra vantagem é que o tempo de residência para o tratamento do efluente é muito pequeno em comparação com os sistemas convencionais.

Diante dos estudos aqui realizados conclui-se que o tratamento de efluente da indústria têxtil com a técnica de eletroflotação é muito promissor, visando o cuidado com o meio ambiente.

As investigações futuras estarão pautadas em otimização do material do reator, e uma completa análise técnico e econômica da eletroflotação.

BIBLIOGRAFIA

- APHA, Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 17th ed. American Public Health Association, Washington, DC, 1992.
- ABAUJO, M.; CASTRO, E.M.M.; Manual de Engenharia Têxtil, Volume 1, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1994.
- Bertanelli, R.; Pellegrini, R.; Descoloração e degradação de polímeros urbanos em situações aquosas através do processo fotoeletrolítico - Unicamp, 2001.
- CASTILLO, M.; BARCELLO, D.; Characterization of Organic Pollutants in Textile Wastewater and Lachrymatory By Using Toxicity-based Fractionation Methods Followed by Liquid na Gas Chromatography Coupled to Mass Spectrometric Detection, 2000, Analytica Chimica Acta 426, p.p. 251-264, 2001.
- CORREIA JR. B.; FURLAN, L. T.; Redução do Consumo de Água e do Volume de Efluente Através do Gerenciamento das Fontes e Reutilização de Água - a Experiência de Paulínia, Petró de Química, v. 251, 72-78, 2003.
- CRISPINHO, F. N.; REZENDE, M. D. Eletroflotação: Princípios e Aplicações. São Carlos: Ed. Rima, 2004, 83 p.
- FERRERA, L. H.; Remoção de Sólidos em Suspensão de Efluente da Indústria de Papel por Eletroflotação - Dissertação de mestrado - UNICAMP.
- FIGUEIREDO, R. F.; FADINI, P. S.; NETO, N. L. C. A Eletrolise e o Tratamento de Efluentes, Rio, v. 5, n. 4, p. 59-63, 1993.
- FORNARI, M. M. T.; Aplicação da Técnica de Eletro-floculação no Tratamento de Efluentes de uma Indústria Têxtil - UNIOESTE.
- GUARATINI, C. C. I.; ZANONI, M. V. B. Corantes Têxteis. Química Nova, v. 23, pp 71, 78 2000.
- Kunz, Ailton (1999). Remediação de Efluente Têxtil. Tese de Doutorado, Instituto de Química - Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).
- MOLLAH, M. Y. A.; MORKOSYKY, P.; GOMES, J. A. G.; KESMEZ, M.; PARGA, J. COCKE, D. L. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. J. Hazard Mater. V. 114, p. 199-210, outubro 2004.
- PIRALTA-ZAMORA, P.; TIBURTUS, E.R.L.; MORAES, S.G.; DURÁN, N.; Degradação Enzimática de Corantes Têxteis. Revista Química Têxtil, v. 68, p. 32-38, 2002.
- PEREIRA, A. F. S.; Aplicação da Eletroflotação no tratamento de Efluente na Indústria Têxtil, Dissertação de Mestrado - UNICAMP - 2007.
- SANTOS, M. A.; Remoção de Cor de Efluentes Têxteis Através de um Processo Biológico; Dissertação de Mestrado, UFSC, Santa Catarina, Brasil.
- SILVA, A. L. C.; Processo eletrolítico: Uma alternativa para o tratamento de águas residuais. 2002, 60f. Monografia de Especialização em Química Ambiental, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- TORRES, M. L.; CUNHA, F. O.; CASQUEIRA, R. G.; Eletroflotação aplicada a remoção de metais pesados contidos em efluentes líquidos. Tecnologia em Metalurgia e Materiais, v. 1, n. 4, p. 40-46, 2005.
- TEIXEIRA, W. A. Tingimento Têxtil com água de reuso via processo H2O2/UV. Universidade de São Paulo, 2009.