

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS AMBIENTAIS

CARLA NÚBIA DE SOUZA

**TRATAMENTO PRIMÁRIO DE EFLUENTES BRUTOS DE
CURTUME QUIMICAMENTE APRIMORADO POR
SEDIMENTAÇÃO**

Campo Grande, MS
2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS AMBIENTAIS

CARLA NÚBIA DE SOUZA

**TRATAMENTO PRIMÁRIO DE EFLUENTES BRUTOS DE
CURTUME QUIMICAMENTE APRIMORADO POR
SEDIMENTAÇÃO**

Dissertação apresentada para obtenção do grau de
Mestre no Programa de Pós-Graduação em Tecnologias
Ambientais da Universidade Federal de Mato Grosso do
Sul, na área de concentração em Saneamento Ambiental
e Recursos Hídricos.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Nobuyoshi Ide

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Nobuyoshi Ide
Orientador – UFMS

Prof. Dr. Tsunao Matsumoto
UNESP – Ilha Solteira

Prof.^a Dr.^a Maria Lúcia Ribeiro
UFMS

Campo Grande, MS
2007

Souza, Carla Núbia de
Tratamento Primrio de Efluentes Brutos de Curtume
Quimicamente Aprimorado por Sedimentao / Carla Núbia
de Souza – Campo Grande, 2007.

Dissertao (Mestrado) – Universidade Federal de Mato
Grosso do Sul, 2007.
Orientador: Prof. Dr. Carlos Nobuyoshi Ide

DEDICATÓRIA

Aos meus pais e irmãs, que sempre estiveram ao meu lado
À minha avó Sebastiana, pelo seu exemplo de vida, carinho e apoio
Ao meu esposo Edson,
pela compreensão, incentivo e amor

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Carlos Nobuyoshi Ide, pela dedicação e atenção que sempre dispensou na orientação deste trabalho.

Ao Curtume Induspan, em especial ao Sr. Dirceu Deboni, ao Sr. Fabiano Deboni e ao Sr. Edson Antônio de Freitas, que disponibilizaram toda estrutura necessária para realização desse trabalho nas dependências da indústria.

Aos colaboradores da ETE, do laboratório e da mecânica do curtume Induspan, que sempre foram muito prestativos e atenciosos.

Aos técnicos do Laboratório de Qualidade Ambiental – LAQUA que, com o apoio irrestrito que prestaram, tornaram-se grandes amigos.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	IV
AGRADECIMENTOS	V
SUMÁRIO.....	VI
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	X
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
RESUMO	XIV
ABSTRACT	XV
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1. Objetivos Gerais	3
2.2. Objetivos Específicos	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. Processo de Transformação de Peles.....	5
3.2. O Processamento do Couro	6
3.2.1. Remolho	7
3.2.2. Encalagem e Depilação	8
3.2.3. Lavagem e Descalcinação	8
3.2.4. Purga.....	8
3.2.5. Píquel.....	9
3.2.6. Curtimento	9
3.3. Características do Efluente Bruto	9
3.4. Tratamento Físico-Químico de Efluentes Líquidos.....	11
3.5. Parâmetros a Serem Monitorados.....	12
3.5.1. Temperatura.....	13
3.5.2. Potencial Hidrogeniônico (pH).....	13
3.5.3. Turbidez.....	13
3.5.4. Alcalinidade.....	15
3.5.5. Condutividade.....	16
3.5.6. Sólidos Totais	16

3.5.7. Sólidos Sedimentáveis	16
3.5.8. Demanda Química de Oxigênio	17
3.5.9. Cromo Total.....	17
3.5.10. Sulfeto.....	18
3.5.11. Alumínio e Ferro	19
3.5.12. NTK – Nitrogênio Total Kjeldahl	19
3.6. Interação entre as Partículas Coloidais.....	20
3.6.1. Força de Van Der Waals.....	20
3.6.2. Dupla Camada Elétrica.....	21
3.7. Coagulação e Flocculação	23
3.7.1. Mecanismos de Coagulação	23
3.7.2. Diagrama de Coagulação – Amirthajah e Mills	27
3.7.3. Unidade de Mistura Rápida	28
3.7.4. Flocculação.....	29
3.8. Sedimentação.....	30
3.8.1. Unidades de Sedimentação.....	31
3.9. Coagulantes	32
3.9.1. Sulfato de Alumínio	32
3.9.2. Cloreto Férrico.....	35
3.9.3. Hidroxicloreto de Alumínio	37
3.10. Auxiliares de Coagulação / Flocculação	37
3.11. O Curtume e o Meio Ambiente	38
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
4.1. Apresentação da Indústria	40
4.1.1. Descrição da Estação de Tratamento de Efluentes do Curtume.....	40
4.2. Equipamentos Utilizados para Realização dos Testes.....	45
4.2.1. Coluna de Sedimentação	46
4.2.2. Equipamento de Reatores Estáticos – Jarteste.....	47
4.2.3. PHmetro, Cronômetro Digital, Balança Analítica.....	47
4.3. Produtos Utilizados	47
4.3.1. Produtos Químicos	48
4.3.2. Auxiliar de Flocculação.....	50
4.4. Procedimentos	50

4.4.1. Coleta de Amostras para os Ensaios de Jarreste	50
4.4.2. Parâmetros Operacionais Adotados para os Ensaios de Coagulação-Floculação-Sedimentação (Jarreste)	53
4.4.3. Ensaios de Coagulação-Floculação-Sedimentação (Jarreste).....	54
4.4.4. Realização dos Testes.....	55
4.4.5. Caracterização do Efluente Bruto e Parâmetros Monitorados.....	57
4.4.6. Coleta e Preservação de Amostras Para os Testes Analíticos	58
4.4.7. Técnicas Analíticas Utilizadas	58
4.4.8. Controle do Volume de Lodo a Ser Produzido	59
4.4.9. Construção da Curva de Sedimentação	60
4.4.10. Método de Avaliação do Custo/Benefício do Processo de Sedimentação	61
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	62
5.1. Determinação da Melhor Dosagem dos Coagulantes.....	62
5.1.1. Caracterização do Efluente Bruto.....	62
5.1.2. Monitoramento dos Clarificados Obtidos.....	63
5.2. Determinação do Melhor pH de Atuação dos Coagulantes.....	65
5.2.1. Caracterização do Efluente Bruto.....	65
5.2.2. Monitoramento dos Clarificados Obtidos.....	66
5.3. Determinação da Melhor Dosagem do Auxiliar de Floculação	68
5.3.1. Caracterização do Efluente Bruto.....	68
5.3.2. Monitoramento dos Clarificados Obtidos.....	69
5.3.3. Curva de Sedimentação	71
5.4. Custos	72
5.4.1. Avaliação de Custos dos Testes	73
5.5. Análise dos Custos	73
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	75
6.1. Conclusões.....	75
6.2. Recomendações	76
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
APÊNDICE A	81
APÊNDICE B.....	82
APÊNDICE C.....	84

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 – Fluxograma das principais etapas do processo de curtimento.....	7
FIGURA 3.2 – Distribuição de tamanhos de partículas na água.....	14
FIGURA 3.3 – Curva de energia potencial de interação entre partículas coloidais.....	21
FIGURA 3.4 – Configuração esquemática da dupla camada elétrica.....	22
FIGURA 3.5 – Esquema da dupla camada elétrica que envolve a superfície da partícula.....	22
FIGURA 3.6 – Coagulação através da adsorção - neutralização de cargas.....	25
FIGURA 3.7 – Coagulação por varredura.....	26
FIGURA 3.8 – Diagrama de coagulação do Sulfato de Alumínio.....	27
FIGURA 3.9 – Esquema de agregação coloidal por floculação.....	29
FIGURA 4.1 – Fluxograma da estação de tratamento de efluentes.....	41
FIGURA 4.2 – Peneira estática.....	42
FIGURA 4.3 – Homogeneizador.....	43
FIGURA 4.4 – Decantadores primários.....	44
FIGURA 4.5 – Reator lodo ativado.....	44
FIGURA 4.6 – Laboratório da ETE do Curtume.....	45
FIGURA 4.7 – Coluna de sedimentação.....	46
FIGURA 4.8 – Detalhes dos registros da coluna de sedimentação.....	47
FIGURA 4.9 – Procedimento de coleta.....	51
FIGURA 4.10 – Análise de sólidos sedimentáveis do efluente bruto.....	51
FIGURA 4.11 – Grande quantidade de sólidos sedimentáveis no efluente bruto.....	51
FIGURA 4.12 – Grande quantidade de lodo gerado no jarteste.....	51
FIGURA 4.13 – Detalhe do volume de lodo gerado no jarteste.....	51
FIGURA 4.14 – Volume de lodo em diferentes tempos de coleta.....	52
FIGURA 5.1 – Jarteste com Cloreto Férrico.....	64
FIGURA 5.2 – Jarteste com Sulfato de Alumínio.....	64
FIGURA 5.3 – Jarteste com Hidroxicloreto de Alumínio.....	65
FIGURA 5.4 – Resultados obtidos para determinação do melhor pH.....	67
FIGURA 5.5 – Curva característica da remoção de sólidos sedimentáveis e turbidez.....	72

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – Rebanho dos principais Estados em 2005.....	4
TABELA 3.2 – Curtumes do Estado de Mato Grosso do Sul, em 2005.	5
TABELA 3.3 – Comparação de efluente com uso e sem uso de reciclagem dos banhos residuais.....	10
TABELA 3.4 – Características físico-químicas do efluente bruto do curtume.....	11
TABELA 3.5 – Velocidade terminal das partículas sólidas.....	15
TABELA 3.6 – Produtos químicos comumente empregados na precipitação química.	24
TABELA 3.7 – Fórmulas específicas do HCA, a acidez total, o teor de Al_2O_3 e as massas específicas das soluções fornecidas pelo fabricante.	37
TABELA 4.1 – Especificação físico-química Sulfato de Alumínio, isento de ferro.	48
TABELA 4.2 – Impurezas do Sulfato de Alumínio.	48
TABELA 4.3 – Características e especificações do Hidróxicloreto de Alumínio.	49
TABELA 4.4 – Especificação físico-química do Cloreto Férrico.....	50
TABELA 4.5 – Parâmetros físicos da pesquisa.	53
TABELA 4.6 – Dosagens dos produtos para ajuste de pH.	57
TABELA 4.7 – Parâmetros usados para caracterização do efluente bruto e para monitoramento do clarificado.....	58
TABELA 4.8 – Técnicas analíticas e unidades utilizadas.....	59
TABELA 5.1 – Caracterização do efluente bruto utilizado nos ensaios para determinar melhor dosagem de coagulante.	62
TABELA 5.2 – Resultados dos clarificados obtidos em jarteste, para dosagem de coagulante escolhida.....	63
TABELA 5.3 – Caracterização do efluente bruto utilizado nos ensaios para determinar a melhor faixa de pH.	66
TABELA 5.4 – Resultados dos clarificados obtidos em jarteste para o pH escolhido.	67
TABELA 5.5 – Caracterização do efluente bruto.	68
TABELA 5.6 – Resultado dos clarificado obtidos no jarteste.	70
TABELA 5.7 – Eficiência de remoção dos coagulantes.	70
TABELA 5.8 – Dados obtidos com a coluna de sedimentação.	71
TABELA 5.9 – Preços dos coagulantes e do auxiliar de floculação.....	73
TABELA 5.10 – Terceirização de retirada de lodo.....	73

TABELA 5.11 – Composição de custos para efluente bruto com turbidez de 1.766UNT e DQO de 5.053mg.L ⁻¹	73
TABELA A.1 – Caracterização do efluente bruto.....	81
TABELA A.2 – Resultados do teste com coagulante Cloreto Férrico 21%.....	81
TABELA A.3 – Resultados do teste com coagulante Sulfato de Alumínio 18%.	81
TABELA A.4 – Resultados do teste com coagulante Hidroxicloreto de Alumínio 18%.	81
TABELA B.1 – Caracterização do efluente bruto.....	82
TABELA B.2 – Resultados do teste com coagulante Cloreto Férrico 21% e ajuste de pH (cal/ácido).....	82
TABELA B.3 – Resultados do teste com coagulante Sulfato de Alumínio 18% e ajuste de pH (cal/ácido).....	83
TABELA B.4 – Resultados do teste com coagulante Hidroxicloreto de Alumínio 18% e ajuste de pH (cal/ácido).....	83
TABELA C.1 – Caracterização do efluente bruto.....	84
TABELA C.2 – Resultados do teste com coagulante Cloreto Férrico 21%, com auxiliar de floculação.	84
TABELA C.3 – Resultados do teste com coagulante Sulfato de Alumínio 18%, com auxiliar de floculação.	85
TABELA C.4 – Resultados do teste com coagulante Hidroxicloreto de Alumínio 18%, com auxiliar de floculação.	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APHA	American Public Health Association
AWWA	American Water Works Association
CCET	Centro de Ciências Exatas e Tecnologia
cps	Centipoise
DBO _{5,20}	Demanda Bioquímica de Oxigênio (5 dias à temperatura de 20°C)
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DHT	Departamento de Hidráulica e Transportes
DLVO	Derjaguim, Landau, Verwey e Overbeek
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
INDUSPAN	Indústria e Comércio de Couros do Pantanal Ltda
LAQUA	Laboratório de Qualidade Ambiental
NTK	Nitrogênio Total Kjeldahl
pH	Potencial Hidrogeniônico
PZ	Potencial Zeta
PRFV	Polietileno Revestido de Fibra de Vidro
rpm	Rotações por minuto
UH	Unidade de Hazen
UNT	Unidade Nefelométrica de Turbidez
UFMS	Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

cv	Cavalo vapor
G_f	Gradiente de velocidade de floculação
G_m	Gradiente de velocidade de mistura
G_{mr}	Gradiente de velocidade de mistura rápida
$m.dia^{-1}$	Metro por dia
$m.h^{-1}$	Metro por hora
$m^3.h^{-1}$	Metro cúbico por hora
$mL.L^{-1}$	Mililitro por litro
$mg.L^{-1}$	Miligramma por litro
nm	Nanômetro
μm	Micrômetro
s^{-1}	Por segundo
T_f	Tempo de floculação
T_m	Tempo de mistura
T_{mr}	Tempo de mistura rápida
T_s	Tempo de Sedimentação
V_s	Velocidade de sedimentação

RESUMO

SOUZA, C. N. Tratamento primário de efluentes brutos de curtume quimicamente aprimorado por sedimentação. Campo Grande, 2007. 85 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

Este trabalho investigou a atuação de diferentes tipos de coagulantes no processo físico-químico: coagulação, floculação e sedimentação, no tratamento de efluente bruto de uma indústria curtidora de peles bovinas. Foi avaliada a eficiência de remoção de determinados parâmetros, Turbidez, DQO, Ferro, Alumínio, Cromo Total, Fosfato, Sulfeto, Amônia, NTK, Cloretos, Sólidos Totais e Sólidos Sedimentáveis, comparando os resultados obtidos através da sedimentação. Os coagulantes utilizados no trabalho desenvolvido foram: Hidroxicloreto de Alumínio, Sulfato de Alumínio e Cloreto Férrico, com um auxiliar de floculação, polímero aniônico. Os testes foram realizados com o uso do jarreste e coluna de sedimentação. Foi possível observar os pontos ótimos de coagulação/floculação com maior ou menor eficiência na remoção de poluentes. Obteve-se através da coluna de sedimentação 88% de remoção de sólidos sedimentáveis e 87% de remoção de turbidez. E com o uso do Hidroxicloreto de Alumínio, uma eficiência de remoção de 20% de DQO, 82% de turbidez, 64% de Ferro, 53% de Alumínio, 96% de Cromo, 38% de fosfato e 13% de amônia. A relação custo/benefício realizada com o uso dos três coagulantes; mostrou que o Hidroxicloreto de Alumínio é o coagulante mais indicado para o efluente estudado.

Palavras-Chave: tratamento primário, curtume, coagulação-floculação.

ABSTRACT

SOUZA, C. N. Primary treatment of tannery wastewater chemically enhanced by sedimentation. Campo Grande, 2007. 85 p. Dissertation (Masters) - Federal University of Mato Grosso do Sul

This Work investigated the effect of different types of coagulants on the coagulation, flocculation and sedimentation of tannery wastewater. The efficiency removal of several parameters was assessed: turbidity, chemical oxygen demand (COD), iron, aluminum, total chrome, phosphate, sulfate, ammonia, total kjeldahl nitrogen (NTK), chloride, total solids and saleable solids, comparing the results obtained from sedimentation alone the coagulants used were aluminum hidroxichloride, aluminum sulfate and ferric chloride, using an anionic polymer as auxiliary de flocculation. The tests were connived out using jartest and the column sedimentation. It was possible to observe optimum coagulation/flocculation paints based on the removal of the assessed parameters. Through the sedimentation column a removal of 88% of saleable solids and 87% of turbidity was achieved. Using alluminium hidroxichloride the following efficiency removal were achieved: 20% COD, 82% turbidity, 64% iron, 53% aluminium, 96% chromium, 38% phosphate and 13% ammonia. The cost-benefit analysis showed that aluminum hidroxichloride is the better choice for the studied effluent.

Keywords: primary treatment, tanning, coagulation-flocculation.

1. INTRODUÇÃO

É crescente a preocupação com a qualidade e quantidade de água subterrânea e superficial disponível para consumo. Com a escassez de água já ocorrendo em alguns lugares do planeta, o homem está sendo obrigado a considerar a importância do uso racional e do tratamento adequado que se deve ter para as águas servidas independente do uso para o qual foi destinada.

A maior cobrança e fiscalização dos órgãos ambientais de âmbito federal, estadual e municipal, e a consolidação de leis mais rígidas de controle para os despejos líquidos oriundos de atividades industriais, vêm obrigando as atividades potencialmente poluidoras a tomar medidas cabíveis que amenizem os impactos ambientais sobre os recursos hídricos.

O processamento do couro sofreu diversas transformações nos últimos anos, incentivadas sobretudo por questões ambientais e econômicas. Com a finalidade de racionalizar a produção de couros, novas tecnologias, envolvendo equipamentos, produtos químicos e processos produtivos foram surgindo e sendo progressivamente implantadas nos curtumes (Gonçalves & Teixeira, 2006).

A indústria curtidora de peles bovinas, curtume, simplesmente usa o subproduto da cadeia da carne. A natureza ecológica pode se evidenciar quando os curtumes dão destino a 900 mil toneladas de matéria putrescível por ano, caso não fosse industrializada, esta enorme quantidade de peles seria um problema ambiental de impacto considerável (Klein, 2001).

A maioria das operações que se submete uma pele, com o objetivo de transformá-la em um produto nobre, que sirva para vestir ou calçar, se realiza em meio aquoso. O volume de águas residuárias gerado pelas indústrias curtidoras mundial está estimado em 500 milhões de metros cúbicos anuais, o que equivale ao volume de efluente produzido por 6,5 milhões de habitante, mas com carga contaminante bem maior (Adzet *et al.*, 1986).

Os curtumes sempre foram mal vistos e muito cobrados ambientalmente, pois, geram alta carga poluidora e liberam odores desagradáveis, que são originados, principalmente, na primeira etapa do processo de industrialização da pele. Em decorrência principalmente da liberação de gases com odores indesejáveis há uma grande resistência na instalação de curtumes próximos de cidades, lugarejos ou onde haja concentração de pessoas, forçando os seus dirigentes a investirem cada vez mais na melhoria de processos que minimizem os impactos ambientais causados.

No ramo de curtimento de peles, os curtumes, nos últimos anos, vêm dando grandes passos no aperfeiçoamento de técnicas e no investimento de equipamentos para suas estações de tratamento de efluentes. Procurando atender a legislação foram desenvolvidos vários estudos e trabalhos no Centro Tecnológico do Couro, em Estância Velha no Rio Grande do Sul, e em curtumes localizados também no Rio Grande do Sul (Claas & Maia, 1994).

Com a implantação dos sistemas biológicos - tratamento secundário, e com sua operacionalização a indústria curtidora deu seu passo decisivo para revolução tecnológica no tratamento de seus efluentes, e começaram a investir nos sistemas de tratamento. Antecedendo a implantação dos sistemas biológicos, os curtumes disponibilizavam de um tratamento primário para os seus efluentes, sistemas que normalmente eram subdimensionados para atender o volume gerado de efluente no processo produtivo, devido o aumento da produção após a instalação dos mesmos. Esses sistemas eram basicamente compostos de grades, peneiras, tanque de homogeneização e um tratamento físico químico – coagulação/floculação, que com o tempo foram sendo aprimorados com intuito de obter uma melhor eficiência do sistema (Claas & Maia, 1994).

Nas estações de tratamento, os sistemas primários e secundários estão interligados e dependem do processo produtivo da atividade industrial, para que se consiga efetuar um bom tratamento de suas águas servidas e um efluente final dentro dos parâmetros previstos pela legislação.

Neste trabalho, foi estudado o processo físico-químico de coagulação/floculação seguido da sedimentação ou flotação, utilizando os efluentes brutos de uma indústria curtidora de peles bovinas, que adota a segregação e reciclagem dos banhos nas etapas da depilação/encalagem e curtimento. É apresentada a eficiência de diferentes coagulantes: Sulfato de Alumínio, Hidroxicloreto de Alumínio e Cloreto Férrico na remoção de poluentes no tratamento físico-químico de seus efluentes, visando a sua melhoria para tratamento em unidades seguintes.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos Gerais

Estudar a viabilidade técnica e econômica da aplicação de diferentes coagulantes no processo de coagulação/floculação, através da sedimentação em efluentes brutos de uma indústria curtidora de peles bovinas, que utiliza a segregação e reciclagem dos banhos de caleiro (depilação/encalagem) e curtimento.

2.2. Objetivos Específicos

- Selecionar o melhor coagulante no tratamento físico-químico de efluentes brutos de curtume;
- Avaliar o processo de sedimentação como técnica para remoção de poluentes obtidos no processo de coagulação-floculação.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para Gomes *et al.* (2007), a indústria de curtimento de peles é uma das mais importantes ramificações das agroindústrias, no Estado de Mato Grosso do Sul, uma vez que agrega grande valor às peles, um dos subprodutos originados em frigoríficos e matadouros que, possivelmente, possui mais nobre destinação no mercado.

Segundo o Instituto FNP (2006), em 2005, o Estado de Mato Grosso do Sul destacou-se como o segundo maior produtor de bovinos do Brasil, 19.476.012 cabeças. Ficando o Estado do Mato Grosso em primeiro lugar com 21.881.504 cabeças; e em terceiro Minas Gerais com 19.113.297, seguido por Goiás, Rio Grande do Sul e São Paulo. A Tabela 3.1, mostra o número de cabeças por Estado.

TABELA 3.1 – Rebanho dos principais Estados em 2005.

Estado	Número de Cabeças
Mato Grosso	21.881.504
Mato Grosso do Sul	19.476.012
Minas Gerais	19.113.297
Goiás	15.915.541
Rio Grande do Sul	11.427.973
São Paulo	11.405.067

Fonte: Instituto FNP (2006).

Em consequência da oferta de peles em Mato Grosso do Sul, várias indústrias de curtimento de couros se instalaram no Estado. A Tabela 3.2 mostra a capacidade de produção diária de couros instalada em Mato Grosso do Sul.

A capacidade produtiva diária do Estado em couros, conforme mostra a Tabela 3.2, verifica-se um total de 18.500 couros *wet-blue* industrializados por dia, gera um volume considerável de resíduos líquidos e sólidos; e, conseqüentemente, exige profissionais qualificados para dar destino adequado a esses resíduos.

Os técnicos e profissionais que atuam nas estações de tratamento, independente da atividade industrial, têm que ter ao menos um conhecimento básico do processo produtivo gerador de algum tipo de resíduo (Claas & Maia, 1994).

O tratamento físico-químico de efluentes de diferentes atividades industriais consiste basicamente nos mesmos procedimentos, que consiste no ajuste de pH do efluente, na adição

de um coagulante a base de alumínio, ferro ou ainda um coagulante orgânico, e de um auxiliar de floculação, polímero aniônico ou catiônico, que são determinados de acordo com as características do efluente.

TABELA 3.2 – Curtumes do Estado de Mato Grosso do Sul, em 2005.

Curtume	Capacidade Máxima Produtiva Diária em Couros
BMZ Couros – Dourados	1.500
Curtume Bertin – Rio Brillhante	2.200
Curtume Couro Azul – Campo Grande	2.500
Curtume Independência – Nova Andradina	4.000
Curtume Monte Aprazível – Paranaíba	2.000
Curtume Panorama – Amambaí	1.000
Curtume Panorama – Iguatemi	800
Curtume Três Lagoas – Três Lagoas	2.000
Induspan – Campo Grande	2.500
Total	18.500

Fonte: SINDICOUROS (2006).

O curtume onde se realizou essa pesquisa é a INDUSPAN, Indústria e Comércio de Couros do Pantanal Ltda., que se localiza no município de Campo Grande, com uma produção diária de 2000 peles por dia, até a fase *wet-blue*.

Com o intuito de familiarizar o leitor no que consiste o processo químico de curtimento de peles bovinas, e conseqüentemente, o volume e carga poluidora que é gerado com a industrialização do couro, serão descritas as etapas do processo de transformação das peles até a fase de interesse neste trabalho conhecida como *wet-blue*.

3.1. Processo de transformação de Peles

Para obtenção do couro bovino, no processo de transformação, a pele sofre modificações de propriedades físicas e químicas e de sua estrutura (Gutterres & Osório, 2004).

Em sua estrutura primária, a pele é constituída por cadeias de aminoácidos unidas entre si, e por uma estrutura secundária em forma de hélice que interage com outras cadeias,

através de ligações transversais. As várias interações entre as cadeias de aminoácidos formam a proteína essencial da pele que é o colágeno (Adzet *et al.*, 1986).

A pele no estado de quando é retirado do animal é chamada de couro verde. Nessa fase é aplicado, quando necessário, um conservante ainda no frigorífico com a finalidade de interromper todas as causas que favorecem sua decomposição, de modo a conservá-las nas melhores condições possíveis até o início do processo de curtimento. De modo geral, a conservação das peles resume na desidratação das peles, visando criar condições que impossibilitem o desenvolvimento de bactérias e ação enzimática. O sal é um tipo de conservante aplicado em grande escala nas peles bovinas, quando usado convenientemente e em quantidades adequadas, mantém a pele em boas condições por um ou mais anos (Claas & Maia, 1994).

Um dos problemas mais difíceis de prevenir é a eliminação ou diminuição do conteúdo de sal proveniente dos banhos de píquel, que é o banho que visa preparar as fibras colágenas, para uma fácil penetração dos agentes curtentes e do curtimento, devido à influência do próprio sal na redução do inchamento ácido e aos danos irreversíveis provocados na pele quando o sal não é utilizado ou quando é utilizado, mas de forma insuficiente (Palop, 2004).

A desvantagem do emprego do sal como conservante, se deve à grande quantidade utilizada causando sérios problemas de poluição. A quantidade de sal usada não deve exceder 50% do peso das peles e deve se observar a pureza do sal usado, a sua granulometria, estocagem e umidade relativa na câmara de armazenamento (Adzet *et al.*, 1986).

3.2. O Processamento do couro

O couro constitui a pele do animal livre da ação de microrganismos, ou seja, preservada da putrefação por processos químicos denominados de curtimento, tornado-a macia e flexível, podendo ser utilizada para fabricação de diversos artigos (Adzet *et al.*, 1986).

A indústria que mais utiliza produtos químicos em suas etapas é a indústria do couro – transformação de peles em couro. Com isso, contribuem com uma carga muito grande para seus efluentes, sendo motivo de preocupação de todos os setores envolvidos (Pfeifer, Silvana & Leih, 2001).

O processamento de curtimento de peles bovinas envolve várias etapas físicas, químicas e mecânicas. Para um maior esclarecimento do processo químico, será citada brevemente a seqüência das etapas. A Figura 3.1 mostra a seqüência das principais etapas no processo de curtimento. Na legenda do fluxograma verifica-se a quantidade de água utilizada em cada etapa em relação ao peso de pele processada.

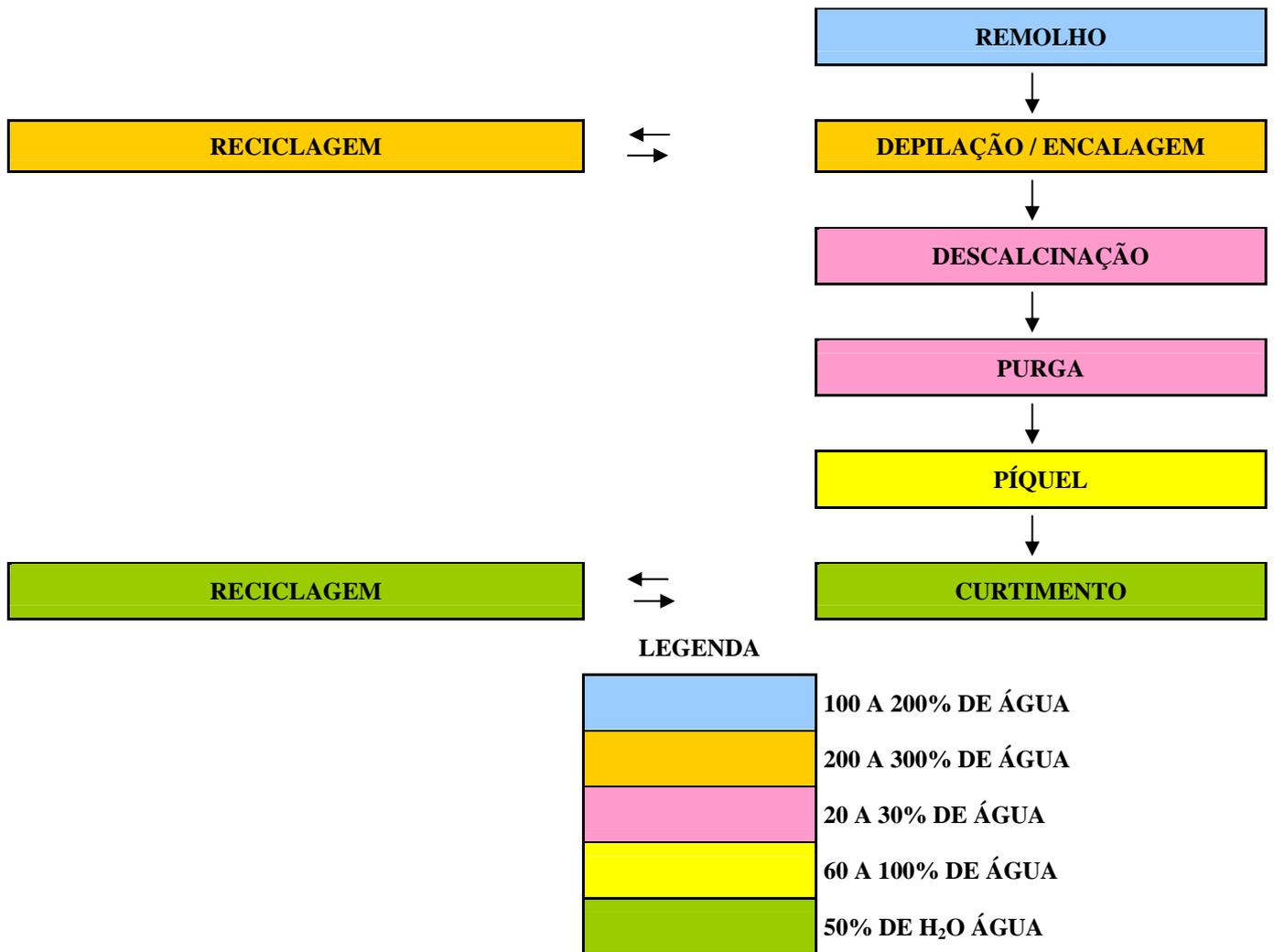


FIGURA 3.1 – Fluxograma das principais etapas do processo de curtimento.
Fonte: Claas & Maia (1994).

3.2.1. Remolho

O processo do remolho, além de repor a quantidade de água existente pelas peles antes de serem retiradas do animal, tem também a finalidade de limpar as impurezas existentes na pele (Claas & Maia, 1994).

O remolho deficiente poderá causar sérios danos no couro curtido, diminuindo, assim, a qualidade do produto final. O couro pode apresentar superfície quebradiça, zonas mais rígidas, bem como originar couros duros (Hoinacki, 1989).

3.2.2. Encalagem e depilação

O processo de encalagem e depilação ou caleiro tem por finalidade remover o pêlo e todo o sistema epidérmico e, também, preparar a pele para as operações mecânicas que seguem. Os produtos utilizados neste processo são: aminas, Hidróxido de cálcio, Sulfeto de sódio e tensoativos. O volume de água consumido é de 200% em relação ao peso das peles, sendo 100% do banho reciclado (Hoinacki, 1989).

3.2.3. Lavagem e descalcinação

A desencalagem ou descalcinação consiste na remoção do Hidróxido de cálcio e outros produtos alcalinos que se encontram depositados ou quimicamente ligados às fibras do material dérmico. O pH varia de 8,5 a 9,5. O processo utiliza os seguintes produtos: sais amoniacais, ácidos fracos e tensoativos. O volume de água consumido é de 20 a 30% em relação ao peso das peles (Hoinacki, 1989).

É a etapa onde há um grande consumo de água, pois a limpeza é efetuada com grande quantidade desta, buscando extrair os sais do couro.

3.2.4. Purga

Tem por objetivo fazer a limpeza do material, removendo estruturas fibrosas como materiais queratinosos, gorduras, bulbos pilosos e outros materiais indesejáveis retidos entre as fibras colágenas. É adicionada ao mesmo banho da descalcinação e o produto utilizado é a enzima pancreática (Gerhard, 1998).

3.2.5. Píquel

Visa preparar as fibras colágenas para uma fácil penetração dos agentes curtentes. No banho de píquel é utilizado de 6 a 10% de cloreto de sódio, 1,0 a 1,5% de ácido sulfúrico e 60 a 100% de água (Claas & Maia, 1994).

3.2.6. Curtimento

O curtimento consiste na transformação da pele em material imputrescível e estável, onde a pele se transforma em couro. Os sais de cromo são os mais utilizados atualmente como curtentes (Claas & Maia, 1994).

Nesta etapa, ocorre o aumento da estabilidade de todo o sistema colágeno, diminuindo a capacidade de intumescimento do mesmo, aumento da temperatura de retração e estabilização face às enzimas. O couro, ao passar pela etapa de curtimento, recebe o nome de *wet-blue*, devido sua consistência e cor azul em que se encontra (Adzet *et al.*, 1986).

Para Freitas (2007), com a utilização de sais de cromo como curtentes, existe a opção de trabalhar com a reciclagem direta desse banho de curtimento, o que pode reduzir o teor de cromo no efluente em até 90%.

Após o curtimento o couro passa por outros processos mecânicos e químicos, de acordo com o artigo a que é destinado. Mas, é de interesse neste estudo citar somente até a fase do curtimento, couro *wet-blue*, que é a fase final do processo de curtimento, da indústria que permitiu a realização desta pesquisa.

3.3. Características do efluente bruto

O processo de curtimento de peles bovinas gera resíduos líquidos em elevadas quantidades, e de composição extremamente complexa que dificulta seu tratamento (Freitas, 2006).

Uma larga variedade de constituintes pode ser encontrada no efluente bruto de um curtume: sais, bases e ácidos orgânicos, tensoativos, aminas, proteínas, aminoácidos, álcoois, ácidos carboxílicos, ácidos graxos, lipídios, enzimas, polímeros, solventes orgânicos,

compostos aromáticos, metais (Cr^{+3} , Mn^{+2} , Fe^{+2} , Fe^{+3} , Al^{+3} e outros), e características físico-químicas de grande diversidade, como pH, potencial de oxi-redução (potencial redox), teor de sólidos, turbidez, alcalinidade, acidez, condutividade, cor, dureza, demanda química de oxigênio (DQO) e demanda bioquímica de oxigênio ($\text{DBO}_{5,20}$), entre outras (Claas & Maia, 1994).

Pode-se observar uma elevada quantidade de proteínas em efluente bruto de curtume, juntamente com restos de produtos químicos. Segundo Adzet *et al.* (1986), as medidas destinadas a diminuir os gastos no tratamento de efluente podem seguir dois caminhos: redução dos volumes de água a ser tratada e redução dos materiais contaminantes usados e dispersos na água.

A caracterização das linhas geradoras de efluentes visa possibilitar o estudo da reutilização destes banhos no processo produtivo. A outra possibilidade é que se pode estabelecer condições de tratamento, em separado, para cada banho residual ou grupos de banhos residuais (Ribeiro *et al.*, 2002).

Para von Sperling *et al.* (2001), o processo que apresenta as maiores perspectivas de evolução em todo o mundo é a reciclagem, sendo a alternativa considerada mais econômica e ambientalmente mais adequada. A Tabela 3.3 mostra as diferenças de concentrações do efluente bruto de curtume, com uso e sem uso de reciclagem.

Na Tabela 3.3, pode-se observar as vantagens em se trabalhar com reciclagem de banhos no processo de curtimento de peles bovinas. Os efluentes das indústrias que usam a reciclagem de banhos no processo curtimento têm uma concentração bem menor de carga poluidora tendo, conseqüentemente, menos gastos no tratamento de seus efluentes.

TABELA 3.3 – Comparação de efluente com uso e sem uso de reciclagem dos banhos residuais.

Parâmetros	Unidades	Concentrações	
		sem reciclagem	com reciclagem
pH	-	8,6	7,5
Sólidos Sedimentáveis	mg.L ⁻¹	90,0	21,0
DQO	mg.L ⁻¹	7250	4000
$\text{DBO}_{5,20}$	mg.L ⁻¹	2350	1800
Cromo Total	mg.L ⁻¹	94,0	15,0
Sulfeto	mg.L ⁻¹	26,0	10,0

Fonte: Claas & Maia (1994).

Esta pesquisa foi realizada utilizando o efluente bruto de um curtume de peles bovinas que utiliza a segregação e reciclagem dos banhos de depilação/encalagem – etapa do processo onde é acrescentado o Sulfeto de sódio como agente depilador, e dos banhos de curtimento – etapa do processo onde se acrescenta o cromo como agente curtidor. Mas, mesmo utilizando a segregação e reciclagem dos banhos, é importante mencionar que segue um residual de sulfeto e cromo para a estação de tratamento de efluentes, o que pode ser observado na Tabela 3.4, que mostra uma pré-caracterização do efluente bruto a ser estudado.

TABELA 3.4 – Características físico-químicas do efluente bruto do curtume.

Parâmetros	Unidades	Efluente bruto
Temperatura	°C	42
pH	-	8,2
OD	mg.L ⁻¹	ND
DBO _{5,20}	mg.L ⁻¹	2080
DQO	mg.L ⁻¹	5694
Ferro Total	mgFe.L ⁻¹	52,3
Fósforo Total	mgPO ₄ ⁻³ .P.L ⁻¹	18,6
Nitrogênio Total	mgN.L ⁻¹	2750
Amônia	mgNH ₃ .N.L ⁻¹	2740
Nitrato	mgNO ₃ .N.L ⁻¹	0,83
Cloreto	mgCl ⁻ .L ⁻¹	9268
Cromo Hexavalente	mgCr ⁺⁶ .L ⁻¹	ND
Cromo Trivalente	mgCr ⁺³ .L ⁻¹	58,5
Cromo Total	mgCr.L ⁻¹	58,5
Sulfeto	mgS ⁻² .L ⁻¹	25
Sólidos Totais	mgST.L ⁻¹	33554

Legenda: ND = não detectado.

Fonte: INDUSPAN (2003).

3.4. Tratamento físico-químico de efluentes líquidos

Nos fenômenos da depuração dos efluentes estão envolvidos processos físicos, químicos e biológicos. Os processos físicos são o gradeamento, a filtração, a sedimentação, a flutuação e a flotação. Todos os processos físicos alcançam apenas as substâncias que não se encontram dissolvidas. As substâncias dissolvidas podem ser removidas da água, por processos que levem as moléculas a se transformar em partículas que sejam atingidas pela depuração física. No limite entre as substâncias dissolvidas e não-dissolvidas encontram-se as

suspensões coloidais (Imhoff, 1996). O tratamento físico-químico é essencial para a obtenção de uma boa eficiência do tratamento de efluentes de curtumes. O uso de coagulantes químicos e auxiliares de floculação; têm sido amplamente difundidos, podendo ser empregado em pontos da estação de tratamento.

Para Gomes *et al.* (2007), o tratamento primário constitui a base de todo o processo de tratamento de efluentes líquidos gerados no processo produtivo de um curtume. O afluente ao tanque de homogeneização independente da realização ou não de reciclagens, constitui um líquido extremamente complexo, quanto à percentagem que cada banho ocupa em relação ao volume total de efluentes gerados diariamente.

A complexidade química que caracteriza um efluente, como o gerado pela indústria curtidora, desencadeia um grande número de reações que podem ocorrer paralelamente à reação de precipitação. Os coagulantes e os floculantes (auxiliares de floculação), interagem com as substâncias presentes no efluente, resultando em uma melhor eficiência do tratamento primário (Claas & Maia, 1994).

3.5. Parâmetros a serem monitorados

Muitos são os parâmetros utilizados para caracterizar a contaminação das águas, que também servem para controlar as diferentes técnicas de tratamento de efluentes (Adzet *et al.*, 1986).

As características da água e das impurezas presentes conhecidas são determinantes, para se realizar uma boa coagulação. Os parâmetros como pH, alcalinidade, cor, turbidez, temperatura, sólidos totais dissolvidos, tamanho e distribuição de tamanhos das partículas em estado coloidal e em suspensão entre outros, têm grande influência na coagulação/floculação das águas (Di Bernardo & Dantas, 2005).

A seleção dos parâmetros a serem monitorados, baseia-se nas características específicas dos efluentes de curtume. A presente pesquisa foi realizada em uma indústria que processa peles bovinas somente até a fase de curtimento. Os vários segmentos da indústria de peles e couros, e as tecnologias alternativas aos processos convencionais de tratamento, implicam numa diferença bastante acentuada no que se refere às características dos resíduos líquidos gerados (Claas & Maia, 1994).

3.5.1. Temperatura

A alteração desse parâmetro pode ter origem natural ou antropogênica; origem natural – transferência de calor radiação, condução e convecção (atmosfera e solo); origem antropogênica – águas de torres de resfriamento e despejos industriais. Esse parâmetro é utilizado com mais frequência na caracterização de corpos d'água e caracterização de águas residuárias brutas (von Sperling, 1996).

A temperatura dos efluentes pode ter importância em certos casos, pois o aumento da mesma acelera os processos de decomposição, sendo sua ação, neste caso, comparável à de uma carga poluidora nos primeiros trechos dos cursos de água receptores (Imhoff, 1996).

3.5.2. Potencial hidrogeniônico (pH)

Os constituintes responsáveis pelo pH são os sólidos dissolvidos e gases dissolvidos de origem natural ou antropogênica; origem natural – dissolução de rochas, absorção de gases da atmosfera, oxidação da matéria orgânica e fotossíntese; origem antropogênica – despejos domésticos e despejos industriais. Esse parâmetro é utilizado com mais frequência na caracterização de águas de abastecimento brutas, tratadas, residuárias brutas, controle da operação das estações de tratamento de água, efluentes e dos corpos d'água (von Sperling, 1996).

Devido às características específicas dos efluentes de curtumes, sua faixa de pH situa-se entre 7 e 9. Essa faixa de pH possibilita trabalhar com um efluente mais próximo do pH de precipitação do cromo, entre 8 e 8,5, e o residual de sulfeto também exige um pH acima de 7,0, para evitar desprendimento do gás sulfídrico (H_2S) (Claas & Maia, 1993).

3.5.3. Turbidez

A turbidez representa o grau de interferência com a passagem da luz através da água, conferindo uma aparência turva à mesma. Os constituintes responsáveis são os sólidos em suspensão que podem ter origem natural ou antropogênica: origem natural – partículas de rocha, argila e silte, algas e outros microrganismos; origem antropogênica – despejos

domésticos, despejos industriais, microrganismos e erosão. Esse parâmetro é utilizado com mais frequência na caracterização de águas de abastecimento brutas, tratadas e controle da operação das estações de tratamento de água (von Sperling, 1996).

A presença de partículas na forma coloidal, em suspensão, matéria orgânica e inorgânica finamente dividida, plâncton e outros organismos microscópicos causam a turbidez das águas (Di Bernardo, 1993).

As propriedades coloidais são geralmente evidenciadas em substâncias cujas partículas variam ente 5nm e $0,2\mu\text{m}$ (Vogel, 1981).

A Figura 3.2 mostra a distribuição dos componentes responsáveis pela turbidez das águas. Verifica-se que as partículas suspensas assumem os tamanhos de 10^{-3}mm a 10^{-1}mm , com esse tamanho é possível por meio da sedimentação ou flotação obter a separação da fase líquida da sólida (Pavanelli, 2001).

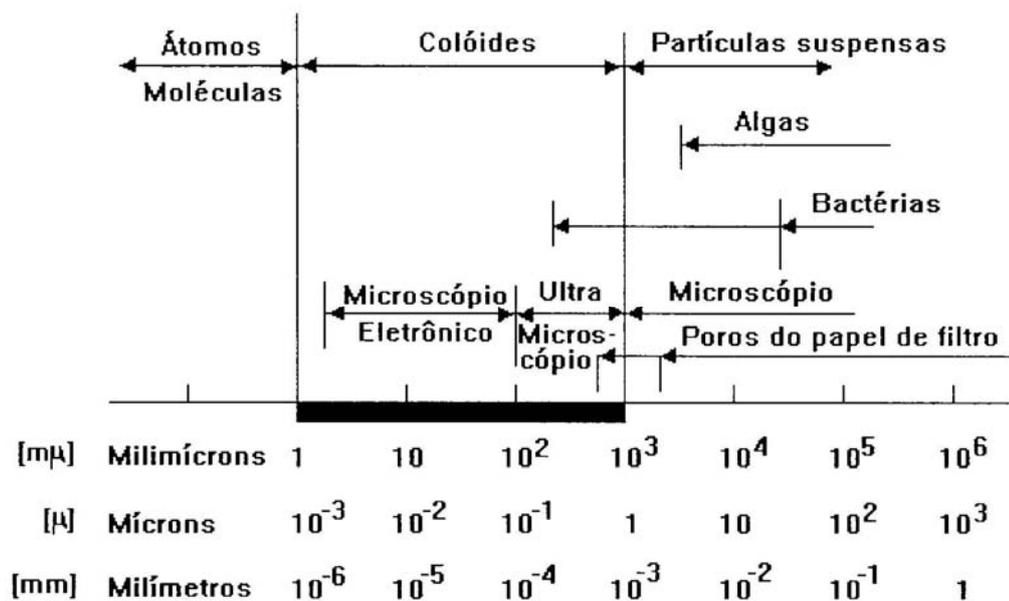


FIGURA 3.2 – Distribuição de tamanhos de partículas na água.
Fonte: Di Bernardo (1993).

Comparando as águas não servidas que possuem partículas, matéria orgânica e outros que interferem na sua turbidez, com o efluente bruto de uma atividade industrial de curtimento de peles bovinas, verifica-se uma turbidez muito mais elevada no efluente bruto, em decorrência da grande quantidade de resíduos orgânicos provenientes das peles e dos produtos químicos que são acrescentados (Claas & Maia, 1994).

A Tabela 3.5 foi construída especificamente com base no processo de curtimento de peles bovinas. Pode-se ver o teor de sólidos e a velocidade média terminal (definir como é determinada) das partículas, em cada banho gerado no processo produtivo.

Na Tabela 3.5, verifica-se que o banho de caleiro é o que apresenta maior quantidade em mL por litro de sólidos sedimentáveis, com uma velocidade média terminal de $0,9\text{m.h}^{-1}$, isso comprova uma das importâncias de se trabalhar com a reciclagem do banho de caleiro.

TABELA 3.5 – Velocidade terminal das partículas sólidas.

Fluido característico	Teor de sólidos sedimentáveis (mL.L^{-1})	Velocidade média terminal (m.h^{-1})
Banho de Caleiro	300	0,9
Banho de Curtimento	50	0,4
Efluente Homogeneizado	250	0,8
Efluente Floculado	120	1
Efluente Secundário - lodos ativados	160	0,5

Fonte: Claas & Maia (1994).

3.5.4. Alcalinidade

A alcalinidade é a quantidade de íons na água que reagirão, para neutralizar os íons hidrogênio. É uma medição da capacidade da água de neutralizar os ácidos.

Os principais constituintes da alcalinidade são os bicarbonatos, carbonatos e os hidróxidos, na forma de sólidos dissolvidos. Podem ter origem natural ou antropogênica: origem natural – dissolução de rochas, reação do CO_2 com água; origem antropogênica – despejos industriais.

Esse parâmetro é utilizado com mais frequência na caracterização de águas de abastecimento brutas, tratadas, águas residuárias brutas e controle da operação das estações de tratamento de água (von Sperling, 1996).

Para Claas & Maia (1994), efluentes brutos de curtumes, com pH abaixo de 4,4, indicam ausência de alcalinidade. A alcalinidade favorece a formação de hidróxidos insolúveis, resultantes da reação com os coagulantes, são essenciais á etapa de coagulação do efluente.

3.5.5. Condutividade

Para Macedo (2003), a condutividade é utilizada para determinar as concentrações iônicas. Qualquer espécie com carga elétrica, presente em uma solução, contribuirá para a condutância total.

3.5.6. Sólidos Totais

Considera-se sólido total, aquela matéria sólida deixada num recipiente após a evaporação de uma amostra de água e sua subsequente secagem a temperatura determinada. Os sólidos totais afetam a dureza da água e aumentam o grau de poluição (APHA, 2005).

Para Imhoff (1996), a determinação mais importante é a dos sólidos suspensos, pois estes vão formar o lodo. Costuma-se fazer distinção entre sólidos grosseiros, sólidos sedimentáveis e sólidos não-sedimentáveis.

Quanto à natureza, de maneira geral, os sólidos totais são divididos em sólidos suspensos (resíduo não filtrável) e sólidos dissolvidos (resíduo filtrável). No controle da poluição de cursos d'água, o conhecimento da concentração de sólidos suspensos é tão significativo quanto o conhecimento da $DBO_{5,20}$ (APHA, 2005).

A quantidade de sólidos totais, após peneiramento, obtido no efluente do Centro Tecnológico do Couro em Estância Velha – RS, considerando a inexistência da reutilização de banhos residuais é de 15.000mg.L^{-1} (Claas & Maia, 1994). De acordo com Metcalf & Eddy (1979), de 80 a 90% de sólidos suspensos de efluentes de curtume podem ser removidos por precipitação química, sendo que, os sólidos em suspensão, presentes no efluente bruto homogeneizado, são de difícil sedimentação.

3.5.7. Sólidos sedimentáveis

Os sólidos sedimentáveis constituem o volume de matéria orgânica e inorgânica que sedimenta em 1 hora, no cone Imhoff, causando prejuízos à população presente nos sedimentos, quando inorgânica, e removendo o oxigênio dissolvido na água, quando orgânica (APHA, 2005).

3.5.8. Demanda Química de Oxigênio

O conjunto de poluentes orgânicos de um resíduo líquido pode ser quantificado por meio do oxigênio requerido para sua oxidação. Neste particular, faz-se a distinção entre demanda química de oxigênio (DQO), e a demanda bioquímica (DBO) (Imhoff, 1996).

A demanda química de oxigênio expressa a medida de oxigênio equivalente àquela porção de matéria orgânica e inorgânica capaz de ser oxidada por uma agente oxidante forte. (APHA, 2005).

É característico do efluente bruto das indústrias curtidoras de peles bovinas possuírem uma DQO alta. A etapa de depilação/encalagem do processo de curtimento representa 42,75% da DQO, em relação a DQO global gerada em todo o processo, o que comprova a importância ambiental da reciclagem dos banhos do processo de industrialização do couro (Claas & Maia, 1994).

Segundo Metcalf & Eddy (1979), de 40 a 70% da $DBO_{5,20}$, de 30 a 60% da DQO e 80 a 90% da massa bacteriana do efluente bruto de curtume pode ser removido por precipitação química no processo de coagulação/floculação.

3.5.9. Cromo total

Há duas principais formas de curtimento de peles bovinas: vegetal – utiliza-se taninos extraídos de plantas; e minerais – usa sais de cromo, zircônio e alumínio. O cromo é a forma mais utilizada pelas características que oferece, por isso são empregados em grande escala no setor coureiro, sendo impostas normas e exigências mais severas aos curtumes, quanto à presença de cromo no efluente final (Soares, Hermann, Martins, 2003).

O cromo é um produto especificamente proibido pelas legislações e sua presença pode inibir os processos biológicos. Sua concentração se expressa como cromo total em $mg.L^{-1}$, ou em parte por milhão - ppm; se existe cromo hexavalente deve-se medir à parte (Adzet *et al.*, 1986).

O cromo é considerado o vilão das indústrias curtidoras de peles bovinas, por ser conhecido pelo seu potencial tóxico. É essencial aos seres humanos em certas quantidades, no caso de intoxicação os órgãos normalmente afetados pelo o cromo são o fígado, rim, trato gastro e sistema circulatório (Andreoli, von Sperling, Fernandes, 2001).

As principais fontes no meio ambiente de cromo e seus usos mais comuns são a mineração e as indústrias de cromagem e de curtimento de couro para confecção de bens de consumo (Freitas *et al.*, 2006).

O cromo utilizado no processo de curtimento de peles bovinas é o cromo na sua forma trivalente, dentro dos limites aceitáveis pela legislação não é nocivo ao meio ambiente quando do lançamento dos efluentes industriais dos banhos de processo. O principal problema está na possibilidade de transformação do cromo III para cromo VI (Bernardes & Ordakowski, 2005).

O cromo foi descoberto por Vauquelin, em 1797, mas quem descobriu a ação curtente do cromo trivalente foi o alemão Knapp, em 1858 (Prados *et al.*, 2002a).

O elemento cromo existe na natureza de diversas formas. Tem origem na mineração da cromita (FeCr_2O_4), ou de hidróxidos de cromo misturados ou oclusos em óxidos de ferros. Pode ocorrer em compostos nos estados de oxidação de +2 a +6, sendo a forma trivalente (+3) a mais estável e curtente (Prados, Lucca, Resende, 2002a).

Os principais depósitos mundiais de cromita encontram-se na Rússia, Turquia, Filipinas, Cuba e África do Sul. No Brasil, são encontradas jazidas na Bahia, Minas Gerais e Goiás (Soares, Hermann, Martins, 2003).

Os despejos de resíduos industriais são as principais fontes de contaminação das águas dos rios com metais pesados, como por exemplo na indústria de curtimento de peles bovinas, sendo usado na linha de produção (von Sperling, 2002b).

Trabalhar com reciclo dos banhos de curtimento, o qual consiste na recuperação do banho residual propriamente dito, e/ou a precipitação do cromo deste banho, para uso no curtimento de peles de lotes seguintes são as duas possibilidades existentes para a eliminação dos sais de cromo das águas residuais (Prados, Lucca, Resende, 2002b).

3.5.10. Sulfeto

O sulfeto de sódio (Na_2S) é um sal de hidrólise alcalina, agente nucleofílico que reage com a queratina, hidrolisando-a e transformando-a em cadeias menores e solúveis (TANQUÍMICA IND. & COM. LTDA, 2004).

O problema do sulfeto de sódio resulta quando o pH do efluente cai abaixo de 9,5, havendo liberação de gás sulfídrico (H_2S) que é muito tóxico, com odor característico de ovo

podre. Em baixas concentrações causa dor de cabeça, náuseas e irritação nos olhos e pode ser letal em concentrações maiores.

O sulfeto de hidrogênio é facilmente solúvel em água e causa rápida corrosão em metais, instalações e materiais de construção. Se descarregado em corpos d'água, mesmo que em baixas concentrações pode causar risco de toxicidade a vida aquática. (Page, 2005).

As etapas que ofertam sulfeto em seus banhos residuais representam cerca de 28% do volume total de despejo. O sulfeto presente nos despejos de curtumes é o composto de alta toxidez que gera o maior desconforto nas instalações de tratamento (Claas & Maia, 1994).

Visto sobre a perspectiva do tratamento de efluentes líquidos, a melhor forma de eliminação do sulfeto do efluente consiste na reutilização dos banhos de depilação e caleiro principal, seguindo para o tratamento só os banhos com contribuição secundária de sulfeto, aplicando, nesses, a oxidação catalítica com permanganato de potássio ou peróxido de hidrogênio entre outros (Claas & Maia, 1994).

3.5.11. Alumínio e Ferro

O monitoramento dos parâmetros alumínio e ferro deve-se principalmente a adição desses sais minerais, utilizados como coagulantes, capazes de formar íons metálicos hidrolisados nos ensaios físico-químicos.

Altas dosagens de coagulantes, além de implicar em custos elevados no tratamento, conferem um aumento indesejável da relação DQO/DBO (Claas & Maia, 1994).

3.5.12. NTK – Nitrogênio Total Kjeldahl

O nitrogênio pode estar presente na água sob várias formas: molecular, orgânico, amônia, nitrito, nitrato; é um elemento indispensável ao crescimento de algas, mas, em excesso, pode ocasionar um exagerado desenvolvimento desses organismos, fenômeno chamado de eutrofização.

O nitrato presente na água pode causar a metahemoglobinemia; a amônia é tóxica aos peixes. São causas do aumento do nitrogênio na água: efluentes domésticos e industriais; fertilizantes; detergentes; excrementos de animais (Macêdo, 2003).

A remoção do nitrogênio contido em efluentes líquidos de curtumes, principalmente aqueles de processo completo, pode significar uma redução significativa nos riscos da eutrofização de corpos receptores (Claas & Maia, 1994).

Para Adzet *et al.* (1986), a etapa química de industrialização do couro que contribui freqüentemente com elevados teores de nitrogênio para o efluente é a desengalgação, devido aos sais amoniacais que são acrescentados nessa etapa.

3.6. Interação entre as partículas coloidais

O fenômeno conhecido como Movimento Browniano explica as partículas coloidais em solução. Quando colocadas em um campo elétrico, geralmente, migram para um dos eletrodos, evidenciando que as partículas coloidais apresentam carga definida, que pode ser negativa ou positiva. A estabilidade de um sistema está intimamente associada à carga elétrica de suas partículas (Vogel, 1981).

Devido ao Movimento Browniano, as partículas se movem continuamente, em decorrência das interações entre as forças de repulsão de origem elétrica e de atração de Van Der Waals, que contribuem para a estabilidade do sistema (Di Bernardo, 1993).

3.6.1. Força de Van Der Waals

São as forças atrativas entre as partículas, que são atribuídas às flutuações de cargas nos átomos e resultam de interações entre dipolos permanentes ou induzidos, nos átomos interatuantes dos colóides da água (Di Bernardo & Dantas, 2005). A Figura 3.3 mostra a curva de energia potencial de interação entre partículas coloidais.

A teoria DLVO é originada das pesquisas dos cientistas russos Derjaguim e Landau e dos cientistas holandeses Verwey e Overbeek. Esta teoria descreve a interação total resultante das contribuições das interações atrativas (força de Van Der Waals) e repulsivas (forças da dupla camada elétrica), que torna possível a estabilidade da partícula. Para que se consiga uma suspensão estável, segundo a teoria, as forças de interações repulsivas devem superar as forças de atração de Van Der Waals (Pavanelli, 2001).

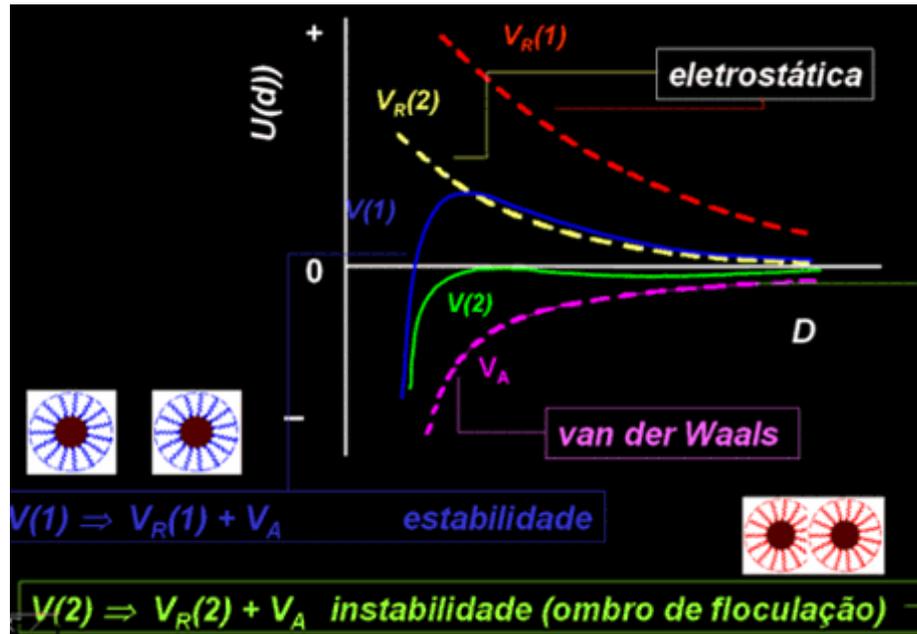


FIGURA 3.3 – Curva de energia potencial de interação entre partículas coloidais.
 Fonte: Pontificia Universidad Católica de Chile (2007).

3.6.2. Dupla camada elétrica

A adsorção ou dessorção de íons entre as partículas sólidas e a solução circundante ocorrem na superfície das partículas, onde tem origem a força da dupla camada elétrica (Pavanelli, 2001).

A carga negativa de uma partícula e o acúmulo de íons com carga oposta na região da interface sólido-líquido forma a dupla camada elétrica (Di Bernardo, 1993). As Figuras 3.4 e 3.5 mostram o esquema da teoria da dupla camada elétrica.

Na teoria da dupla camada verifica-se a existência da camada difusa – íons negativos aproximam-se da camada compacta atraindo íons positivos; da camada de Stern – concentração elevada de íons positivos próximos à superfície do colóide; e do Potencial de Nernst – o potencial elétrico criado pela presença do colóide na água diminui com a distância a partir da superfície do mesmo (Di Bernardo, 1993).

A Figura 3.4 mostra também o potencial zeta – potencial eletrocinético que é igual à diferença de potencial entre a parede da partícula e o seio do líquido (Claas & Maia, 1994).

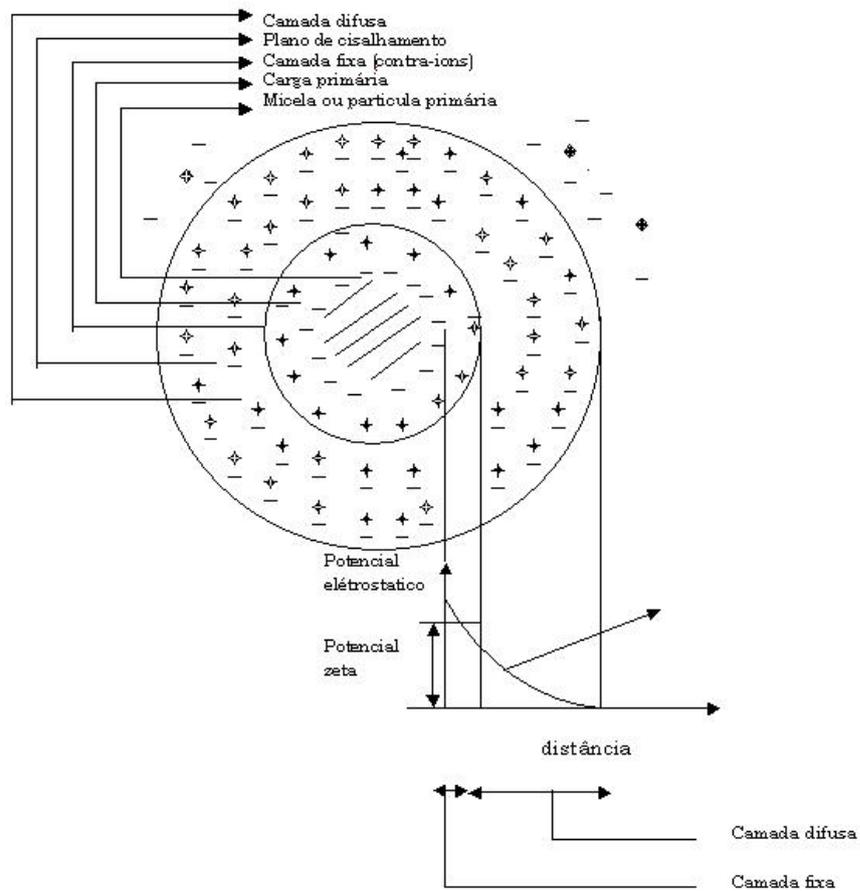


FIGURA 3.4 – Configuração esquemática da dupla camada elétrica.
 Fonte: Di Bernardo & Dantas (2005).

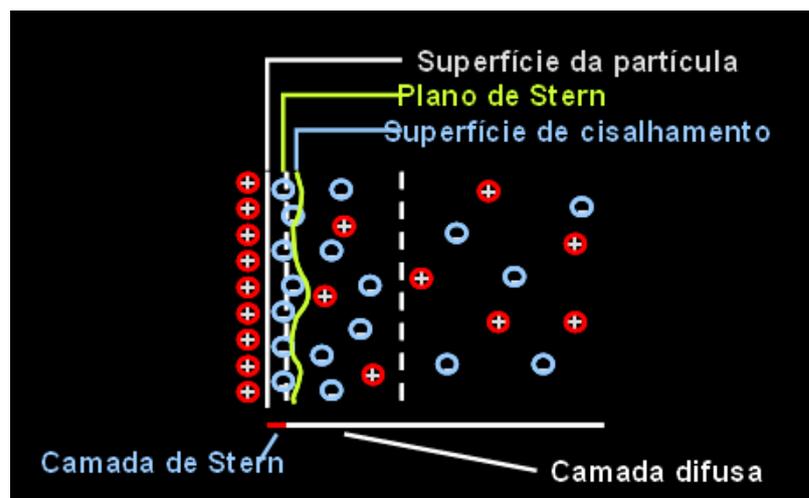


FIGURA 3.5 – Esquema da dupla camada elétrica que envolve a superfície da partícula.
 Fonte: Pontificia Universidad Católica de Chile (2007).

3.7. Coagulação e floculação

A coagulação e a floculação são de grande importância no tratamento de água para abastecimento e no tratamento de efluentes, porque delas depende a eficiência das unidades subsequentes. No tratamento de águas, as etapas de coagulação e floculação, são principalmente utilizadas para promover a posterior remoção de cor e turbidez de águas naturais. No tratamento de efluentes sanitários, a coagulação e floculação atuam na remoção de diversos parâmetros, destacando a necessidade de remoção de fósforo, assim como no incremento da eficiência de remoção de turbidez, DQO e sólidos (Santos, 2001).

Para Adin & Osano (1998) citado por Santos (2001), o tratamento (físico-químico) de efluente difere do tratamento de água em diversos aspectos: muito maior concentração de partículas; tamanho médio de partículas é maior; as partículas contêm maior proporção de matéria orgânica, a superfície das partículas é mais hidrofílica e reagem com o coagulante de modo diferente.

Devido à potencialidade de processos físico-químicos no tratamento de efluentes, principalmente quando associados a processos biológicos, tem sido difundido o uso de coagulantes e alguns polieletrólitos no tratamento de águas residuárias. Nesse sentido, a coagulação e floculação de efluentes, seguidas de sedimentação ou flotação, podem ser utilizadas em diversos pontos da estação de tratamento de efluente (Santos, 2001).

3.7.1. Mecanismos de coagulação

A coagulação é uma técnica baseada na adição de produtos que precipitem os colóides e as substâncias solúveis que causam a contaminação das águas (Adzet *et al.*, 1986).

Para que a coagulação seja possível, é preciso entender o seguinte: em torno de cada partícula forma-se um duplo filme elétrico, com a parte positiva em contato com a solução. Com isso, as cargas contrárias se repelem e as partículas são impedidas de se unirem impedindo a formação de partículas maiores, destruindo o duplo filme, as forças de repulsão não serão atuantes. Para que isso ocorra, deve-se adicionar maiores quantidades de eletrólito à solução (Vogel, 1981). A Figura 3.4 que mostra a desestabilização de partículas em suspensão por rompimento da dupla camada e, conseqüentemente, a diminuição do potencial zeta.

Os íons do eletrólito, quando em grandes concentrações, interferem na formação do duplo filme elétrico que circunda a partícula, assim sendo, a partícula pode coagular. Durante a coagulação de um colóide por um eletrólito, o íon de carga oposta à do colóide é adsorvido em grau variável sobre a superfície, dependendo da valência do íon (Vogel, 1981).

A coagulação é realizada através da adição de produtos químicos ao efluente a ser clarificado. É a operação que visa a formação de flocos; capazes de serem retidos através da floculação. A Tabela 3.6 mostra alguns produtos químicos comumente empregados na precipitação química (Claas & Maia, 1994).

Dos produtos químicos citados na Tabela 3.6, no tratamento físico-químico de efluente de indústrias curtidoras de peles bovinas são mais usados o Sulfato de Alumínio e o Cloreto Férrico, como coagulantes, e a cal para ajuste de pH, quando necessário.

TABELA 3.6 – Produtos químicos comumente empregados na precipitação química.

Produtos químicos	Fórmula molecular	Peso molecular
Sulfato de Alumínio	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	666,7
Sulfato Ferroso	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	278,0
Hidróxido de Sódio	NaOH	40,0
Cal Virgem	CaO	56,0
Cloreto Férrico	$FeCl_3$	162,1
Sulfato Férrico	$Fe_2(SO_4)_3$	400,0

Fonte: Claas & Maia (1994).

Compressão da camada difusa

O aumento da densidade de cargas na camada difusa com a adição de um eletrólito irá ocasionar a diminuição da esfera de influência das partículas, ocorrendo a coagulação por compressão da camada difusa.

Desse modo, as forças de Van der Waals resultam dominantes, eliminando a estabilização eletrostática (Di Bernardo *et al.*, 2002).

Os principais aspectos relacionados ao fenômeno da compressão da dupla camada são (Di Bernardo & Dantas, 2005):

- A quantidade de eletrólitos necessários para conseguir a coagulação é praticamente independente da concentração dos colóides na água;
- Não é possível causar a reversão de carga dos colóides (reestabilização), que passa a ser positiva, independentemente da quantidade de eletrólitos adicionada.

Adsorção e neutralização de cargas

As partículas coloidais são capazes de adsorver algumas espécies, sendo que essas espécies são de carga contrária à da superfície dos colóides, ocorrendo à desestabilização da partícula. Para que ocorra essa desestabilização é necessário o uso de coagulante em dosagens bem menores às do mecanismo da dupla camada (Mendes, 1988 citado por Pavanelli, 2001). A Figura 3.6 mostra o modelo de adsorção-neutralização de cargas.

São três as principais diferenças existentes entre os mecanismos de compressão da dupla camada difusa e adsorção-neutralização de carga (Di Bernardo *et al.*, 2002):

- Dosagens de eletrólitos muito inferiores às necessárias para a compressão da camada difusa;
- A relação existente entre a concentração dos colóides e a quantidade necessária de espécies desestabilizantes por adsorção segue relação estequiométrica;
- A dosagem excessiva de espécies adsorvíveis pode ocasionar a reversão da carga superficial das partículas coloidais.

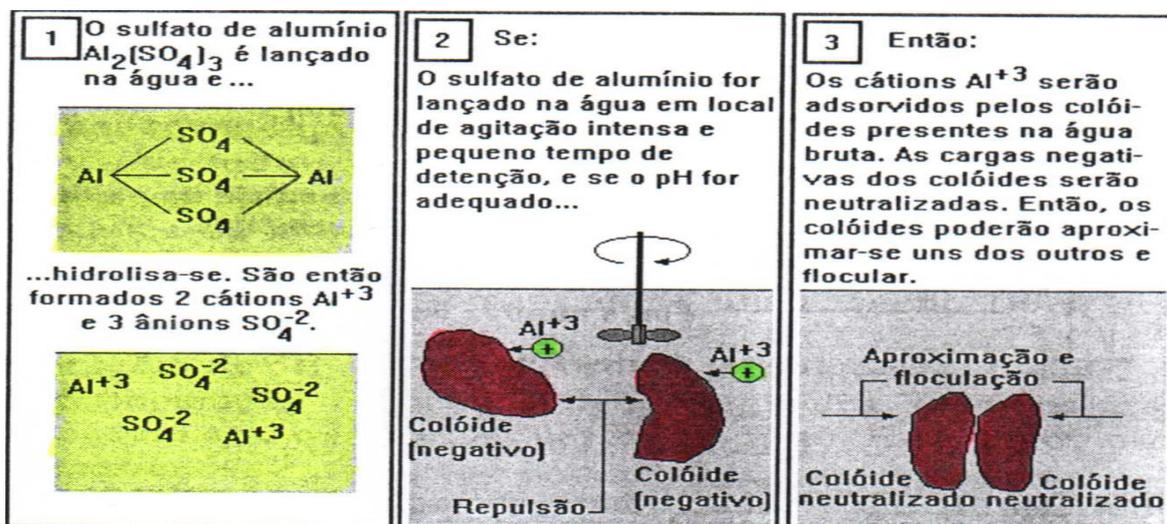


FIGURA 3.6 – Coagulação através da adsorção - neutralização de cargas.

Fonte: Ribeiro (2004).

Varredura

Os flocos resultantes do mecanismo de varredura são maiores e apresentam velocidades de sedimentação relativamente maiores do que os flocos do mecanismo de adsorção-neutralização. Em função principalmente da dosagem de coagulante, do pH da mistura e da concentração de alguns tipos de íons na água, poderá ocorrer a formação de precipitados como $\text{Al}(\text{OH})_3$ quando se utiliza sais de alumínio, e $\text{Fe}(\text{OH})_3$ quando se utiliza

sais de ferro, que removem ou “varrem” por sedimentação as partículas coloidais (Di Bernardo & Dantas, 2005). A Figura 3.7 mostra o esquema do mecanismo de varredura, resultante do uso do Sulfato de Alumínio.

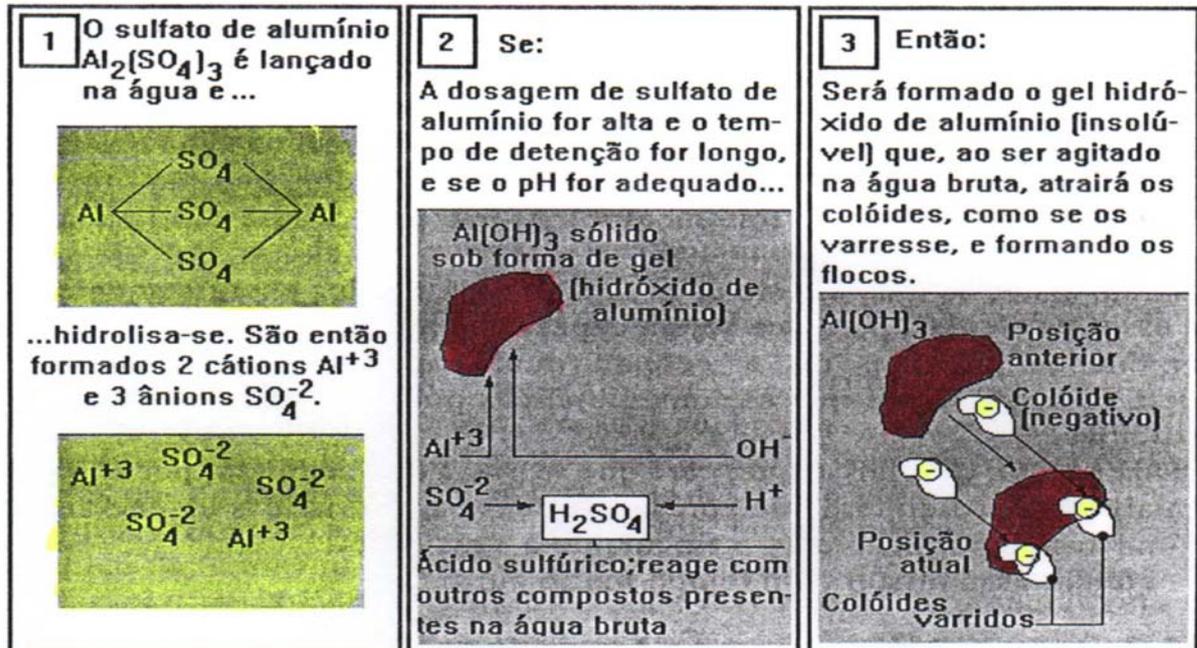


FIGURA 3.7 – Coagulação por varredura.
Fonte: Ribeiro (2004).

Adsorção e formação de pontes

Compostos orgânicos conhecidos, como polímeros de origem sintética ou natural, podem ser utilizados como coagulantes. Esses compostos apresentam sítios de ligação ionizáveis ao longo de suas cadeias, sendo classificados como catiônicos, aniônicos ou anfóteros (Mendes, 1998 citado por Pavanelli, 2001).

A teoria desenvolvida para explicar o comportamento dos polímeros como coagulantes é baseada na adsorção dos mesmos à superfície das partículas coloidais, seguida ou pela redução da carga ou pelo “entreteçamento” das partículas pelos polímeros (Mendes, 1998 citado por Di Bernardo *et al.*, 2002).

Estudos do comportamento desses compostos têm mostrado que é possível a desestabilização de colóides carregados negativamente por ambos os tipos de polímero – catiônicos e aniônicos (Di Bernardo *et al.*, 2002).

3.7.2. Diagrama de Coagulação – Amirthajah e Mills

O diagrama da Figura 3.8, desenvolvido por Amirtharajan e Mills, em 1982, mostra as condições da coagulação no tratamento de diferentes tipos de águas naturais e sintéticas, com turbidez relativamente alta se comparada à cor verdadeira, com base na solubilidade do alumínio, na dosagem de coagulante – $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14,3\text{H}_2\text{O}$ – e no pH da mistura. Evidentemente, esse diagrama, corresponde a uma situação particular que ilustra o uso do diagrama de solubilidade do alumínio, pois as linhas que delimitam as diferentes regiões se alteram com as características da água (Di Bernardo & Dantas, 2005).

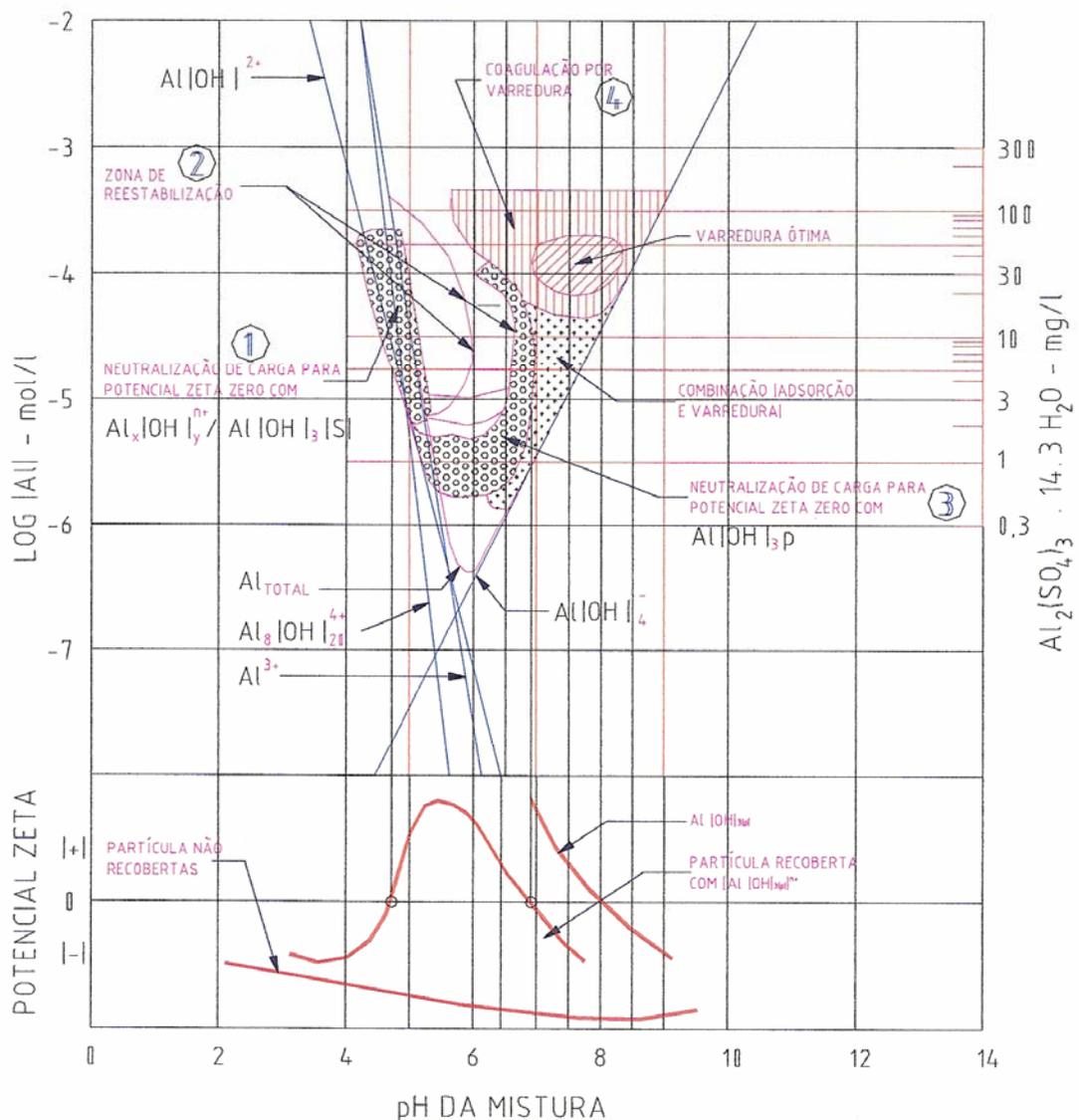


FIGURA 3.8 – Diagrama de coagulação do Sulfato de Alumínio.
Fonte: Santos (2001).

Nota-se a existência de quatro regiões distintas na Figura 3.8, caracterizadas pelo par de valores – dosagem de coagulante e pH da mistura e mostra também a variação do potencial zeta resultante da interação entre os colóides da dispersão com as espécies hidrolisadas (Di Bernardo & Dantas, 2005):

- REGIÃO 1: nesta região as espécies hidrolisadas de alumínio, positivas, são adsorvidas na superfície dos colóides, ocorrendo a neutralização de cargas das partículas coloidais. O potencial zeta (PZ) negativo se aproxima de zero, em valor de pH da ordem de 4,8;
- REGIÃO 2: o PZ é positivo e os colóides também se tornam positivos caracterizando o fenômeno de reestabilização. Há o aparecimento de linhas que delimitam a parte inferior da zona de reestabilização, e a partir da delimitação superior surge a zona de desestabilização, que tem sido creditada à presença de íons SO_4^{2-} e ao aprisionamento dos colóides restabilizados em complexos de sulfato do tipo $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})\text{SO}_4^+$;
- REGIÃO 3: essa região é conhecida por “corona”. O PZ atinge o ponto isoelétrico novamente em um valor de pH em torno de 6,8 e a dosagem de coagulante é igual a 10mg.L^{-1} para o caso em estudo. O mecanismo de coagulação se dá devido à neutralização de carga pelo hidróxido de alumínio positivo.
- REGIÃO 4: nesta região os valores de pH se encontram entre 6 e 8, com dosagens do coagulante superiores a um valor próximo de 30mg.L^{-1} para o caso em estudo. Ocorre o que se denomina o mecanismo de varredura – há formação excessiva dos precipitados de hidróxido de alumínio, onde as partículas coloidais são aprisionadas de varridas. A coagulação realizada nesse mecanismo é a recomendada quando se tem tratamento completo – coagulação, floculação e sedimentação.

3.7.3. Unidade de mistura rápida

A mistura rápida é a operação destinada a dispersar produtos químicos na água a ser tratada e a floculação é a agregação de partículas coagulantes na mistura (Di Bernardo, 1993).

Nas unidades de mistura rápida, a coagulação é realizada por meio de mecanismos hidráulicos ou mecanizados. Como exemplo, os dispositivos nos quais se têm formações de

ressalto hidráulico (vertedor Parshall), injetores (tubos providos de orifícios) em tubulações forçadas ou em canais de água bruta, câmaras providas de agitadores mecanizados com diferentes tipos de rotores (Di Bernardo *et al.*, 2002).

3.7.4. Floculação

A floculação é uma técnica baseada na adição de produtos que facilitam, juntamente com o processo de agitação, a aglomeração dos colóides desestabilizados previamente por um coagulante (Adzet *et al.*, 1986).

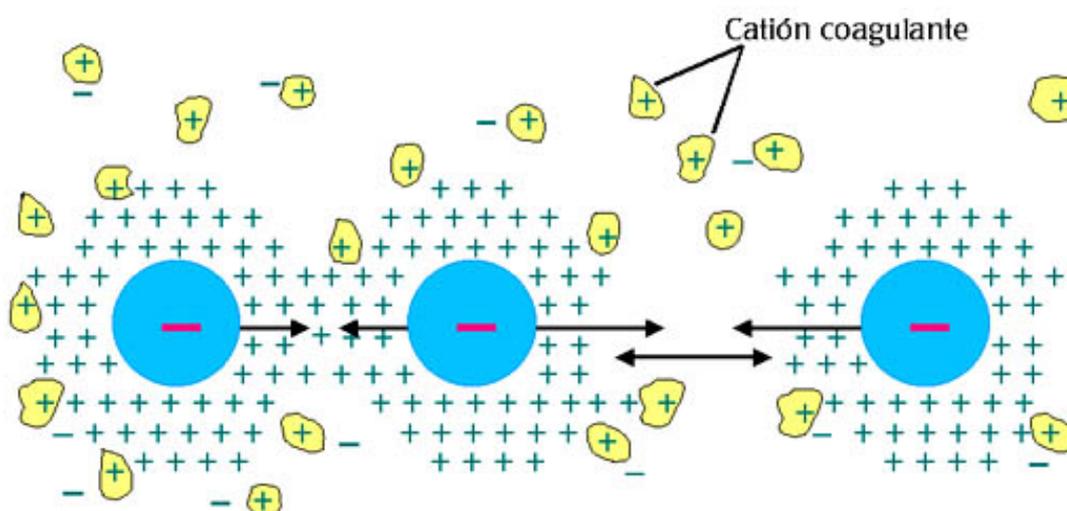


FIGURA 3.9 – Esquema de agregação coloidal por floculação.
Fonte: Pontificia Universidad Católica de Chile (2007).

Para Claas & Maia (1994), a floculação é a operação complementar da coagulação que visa a agregar as partículas coloidais neutralizadas, tornando-as de maior peso.

A eficiência da unidade de floculação depende do desempenho da unidade de mistura rápida, a qual é influenciada por fatores como tipo de coagulante, pH de coagulação, temperatura da água, concentração e tempo de preparo da solução de coagulante, tempo e gradiente de velocidade, tipo e geometria do equipamento de floculação e qualidade da água bruta (Di Bernardo *et al.*, 2002).

Segundo Viehl (1949) citado por Imhoff (1996) também é possível conseguir a floculação das suspensões coloidais dos efluentes por meio da atividade biológica de protozoários.

Unidades de floculação

A operação de floculação é realizada, normalmente, em tanques de mistura lenta, para não romper os flocos formados, mas com velocidade suficientemente para adensamento dos flocos e que não permita a sedimentação dos flocos no fundo do tanque (Claas & Maia, 1994).

A floculação pode ser realizada em unidades hidráulicas como: chicanas com escoamento vertical ou horizontal, meio granular fixo ou expandido, malhas localizadas em canais e outras. Pode ser realizada em unidades mecanizadas como: agitadores de eixo vertical ou horizontal e os rotores de paletas paralelas ou perpendiculares, ou ainda do tipo turbina (Di Bernardo *et al.*, 2002).

Para Claas & Maia (1994), é conveniente manter para a floculação um gradiente de velocidade compreendido entre 20 e 50s^{-1} , para efluentes de curtume. O tempo de retenção hidráulico do tanque de floculação deve ser entre 15 e 30 minutos, permitindo um tempo de contato suficiente entre o polieletrólito e o efluente. Para Di Bernardo *et al.* (2002), o valor do gradiente de floculação, G_f , varia de 10 a 65s^{-1} , enquanto que o tempo de floculação, T_f , pode resultar entre 10 e 40 minutos.

3.8. Sedimentação

Na sedimentação as partículas suspensas apresentam movimento descendente em meio líquido de menor massa específica, devido à ação da gravidade. O resultado da operação de sedimentação é a separação das fases sólida e líquida (Di Bernardo *et al.*, 2002).

Para Claas & Maia (2004), as partículas sólidas que caracterizam um determinado efluente líquido, dividem-se basicamente em dois tipos: os materiais decantáveis - que sedimentam livremente com velocidade de queda constante e diretamente proporcional ao seu peso específico; e as partículas floculadas; produto da coagulação do material coloidal e sólidos suspensos formados naturalmente ou mediante a adição de produtos químicos.

Para Jordão & Pessôa (1995), de acordo com a forma como ocorre a sedimentação, esta costuma ser classificada em três tipos:

- Sedimentação discreta - as partículas são ditas individuais, isto é, não floculam nem se aglomeram umas às outras;
- Sedimentação floculenta - as partículas são floculentas em pequenas concentração, e a velocidade de sedimentação cresce com o tempo;

- Sedimentação em massa – as partículas são coesivas, em suspensão em alta concentração e decantam com uma massa única. À medida que se processa a sedimentação ocorrer também uma compactação do lodo decantado.

Há diversos fatores que reduzem a eficiência da sedimentação, independente do tipo de unidade de decantação empregado. Devido a esses fatores adversos à sedimentação das partículas nos decantadores, deve-se relacionar a velocidade de sedimentação (V_s) no ensaio de jarteste. Em geral, o valor de V_s usado no equipamento de laboratório deve ser maior que aquele observado nas unidades em escala real (Di Bernardo *et al.*, 2002).

3.8.1 Unidades de sedimentação

Decantadores ou sedimentadores são equipamentos utilizados em estações de tratamento de efluentes, com a finalidade de separar sólidos/líquidos, removendo lodos tanto do tratamento primário como secundário. Podem ser tipo *Dortmund*, equipamentos cilíndricos ou retangulares, de construção metálica ou de concreto, cujo ângulo deve ser no mínimo 60°, que através de um efeito de dispersão radial que acelera a precipitação das partículas sólidas em suspensão, separa sólidos e líquidos. E do tipo Periféricos com Braço Raspador ou ponte giratória, equipamentos cujo arranjo mais comumente adotado é aquele em que o efluente, através da tubulação de entrada, passa sob o decantador ou sedimentador e se eleva pela coluna central descarregando o mesmo dentro de um anel defletor (Claas & Maia, 1994).

Para Hazen (1904) citado por Di Bernardo (1993), a modelação matemática para o projeto de decantadores, considera que a sedimentação ocorre sem quaisquer interferências externas ao fenômeno; o escoamento é contínuo; as partículas são discretas (com mesma velocidade de sedimentação); não há interferência da sedimentação de uma partícula na sedimentação de outra e não ressuspensão das partículas depositadas no fundo do tanque. A contribuição dos estudos de Hazen foi muito importante, mas coube a Camp em 1946, a proposição de uma metodologia racional para análise das características de sedimentabilidade das partículas. Mostrando a presença de partículas floculentas (podem aglomerar-se durante a sedimentação), resultando em uma velocidade maior e que a área superficial e a taxa de escoamento superficial são parâmetros mais importantes que a profundidade e o tempo de detenção. (Di Bernardo, 1993).

Os decantadores convencionais, geralmente, são projetados a partir do valor teórico de V_s definido em jarreste, para taxas de escoamento superficial compreendidas entre 15 e 60 metros por dia, com tempos médios de detenção de 2 a 4 horas. Os decantadores de alta taxa também são projetados a partir do valor teórico obtido em jarreste e da trajetória percorrida pela partícula crítica no tipo de duto a ser usado (Di Bernardo *et al.*, 2002).

Para Claas & Maia (1994), um ponto de grande importância é a inclinação mínima das paredes cônicas do sedimentador, devido às características do lodo gerado em um tratamento físico-químico de efluentes líquidos de curtume. E, geralmente, adota-se um tempo de detenção de efluente no sedimentador que varia, mais ou menos, de 2 a 3 horas, nos casos em que a alimentação ocorre de maneira contínua.

Para Jordão & Pessoa (1995), para determinação em modelo reduzido utiliza-se uma coluna cilíndrica formada por um tubo de diâmetro igual ou superior a 150mm, de altura igual ou superior a que se deseja para o decantador. E em intervalos iguais, se instala um registro para coleta da amostra, de forma a se poder, a intervalos de tempos regulares, coletar e determinar o teor de matéria em suspensão da amostra.

3.9. Coagulantes

A adição de eletrólitos em um meio reduz o potencial zeta e, conseqüentemente, a estabilidade dos colóides, especialmente dos colóides hidrofóbicos. O aumentando da força iônica do meio disperso implica na redução da dupla camada elétrica dos colóides. Quando os íons de cargas opostas são adsorvidos por um colóide há redução da carga do próprio colóide. (Casey, 1993).

3.9.1 Sulfato de Alumínio

O alumínio é um metal branco, dúctil e maleável, em forma de pó assume a cor cinza, e se funde à 659°C (Vogel, 1981).

O Sulfato de Alumínio, como espécie química, tem por fórmula química $Al_2(SO_4)_3.nH_2O$, onde “n” pode assumir valores de 14 a 18 moléculas de água de cristalização (Pavanelli, 2001).

O coagulante mais utilizado em tratamento de água potável é o Sulfato de Alumínio, tendo a formulação típica de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$. É um sólido não higroscópico, prontamente solúvel. Quando o Sulfato de Alumínio é adicionado à água, na presença da alcalinidade, a reação total é dada na eq. (3.1) (Casey, 1993):



A alcalinidade das águas pode ser de origem natural ou adicionada, e favorece a formação de hidróxidos insolúveis (Claas & Maia, 1994).

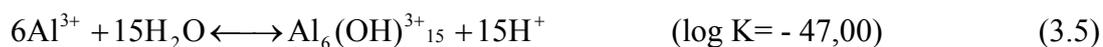
Em termos estequiométricos 1mg.L^{-1} de alumínio remove $0,45\text{mg.L}^{-1}$ de alcalinidade na forma de CaCO_3 e há liberação de $0,4\text{mg.L}^{-1}$ de CO_2 . A presença da alcalinidade tem efeito tampão, impedindo que o pH abaixe bruscamente. O precipitado de alumínio, dado na eq. (3.2), pode ser mais corretamente chamado de um precipitado hidratado do óxido de alumínio (Casey, 1993).



Em efluentes de indústrias curtidoras de peles bovinas, o Sulfato de Alumínio tem apresentado bons resultados na clarificação, enquanto que os coagulantes a base de ferro apresenta alguns inconvenientes. Essa limitação dos íons ferro é que formam com o sulfeto, um precipitado de cor preta, que não sedimenta com facilidade, promovendo no efluente uma coloração escura de difícil remoção (Claas & Maia, 1994).

Solubilidade do Sulfato de Alumínio

Nas eq. (3.3) a (3.9), são apresentadas as reações de hidrólise do alumínio a uma temperatura de 25°C e força iônica igual a zero. Dessas reações resulta a formação de hidroxocomplexos (Di Bernardo, 2005).





Para cada espécie de alumínio em equilíbrio com o precipitado, é possível obter a equação que relaciona sua concentração molar com o pH, conforme apresentado nas eq. (3.10) a (3.14).

Espécie $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$



$$K = \frac{[\text{Al}(\text{OH})^{2+}][\text{OH}^-]^2}{[\text{Al}(\text{OH})_3(\text{p})]} \quad (3.14)$$

Do sistema de três equações de hidrólise, resultam as eq. (3.15) a (3.17).

$$10^{-5,02} = \frac{[\text{Al}(\text{OH})^{2+}][\text{H}^+]}{[\text{Al}^{3+}]} \quad (3.15)$$

$$10^{-32,34} = \frac{[\text{Al}^{3+}][\text{OH}^-]^3}{[\text{Al}(\text{OH})_3(\text{p})]} \quad (3.16)$$

$$10^{-14} = \frac{[\text{H}^+][\text{OH}^-]}{[\text{H}_2\text{O}]} \quad (3.17)$$

Assumindo que a atividade do precipitado $[\text{Al}(\text{OH})_3(\text{p})]$ seja igual à unidade, para que a constante de equilíbrio seja expressa em termos da espécie solúvel de Al^{3+} e H^+ e, tomando-se o logaritmo de ambos os lados da eq. (3.14), obtém-se a eq. (3.18).

$$\log K = \log [\text{Al}(\text{OH})^{2+}] + 2 \log [\text{OH}^-] \quad (3.18)$$

Aplicando-se o mesmo procedimento às eq. (3.15), (3.16) e (3.17), obtém-se as eq. (3.19), (3.20) e (3.21).

$$-5,02 = \log [\text{Al}(\text{OH})^{2+}] + \log [\text{H}^+] - \log [\text{Al}^{3+}] \quad (3.19)$$

$$-32,34 = \log[\text{Al}^{3+}] + 3\log[\text{OH}^-] \quad (3.20)$$

$$-14,00 = \log[\text{H}^+] + \log[\text{OH}^-] \quad (3.21)$$

$$-23,36 = \log[\text{Al}(\text{OH})^{2+}] + 2\log[\text{OH}^-] \quad (3.22)$$

Aplicando-se a somatória das eq. (3.19), (3.20) e (3.21) resulta a eq. (3.22).

Como $\log[\text{H}^+] + \log[\text{OH}^-] = -14 \rightarrow \log[\text{H}^+] = -14 - \log[\text{OH}^-]$ e $\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$, tem-se a eq. (3.23):

$$-23,36 = \log[\text{Al}(\text{OH})^{2+}] + 2 \times (-14 - \log[\text{H}^+])$$

$$-23,36 = \log[\text{Al}(\text{OH})^{2+}] - 28 - 2 \times \log[\text{H}^+] \text{ ou}$$

$$\log[\text{Al}(\text{OH})^{2+}] = 4,64 - 2 \times \text{pH} \quad (3.23)$$

Utilizando-se o mesmo procedimento para as demais espécies, resultam nas eq. (3.24) a (3.29). A partir delas, é possível construir o diagrama das espécies hidrolisadas do alumínio em função do pH, como apresentado na Figura 3.8, anteriormente.

$$\text{Al}^{3+} \quad \log[\text{Al}^{3+}] \quad = 9,66 - 3 \times \text{pH} \quad (3.24)$$

$$\text{Al}_2(\text{OH})_4^{2+} \quad \log[\text{Al}_2(\text{OH})_4^{2+}] \quad = 13,05 - \text{pH} \quad (3.25)$$

$$\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+} \quad \log[\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}] \quad = 10,96 - 3 \times \text{pH} \quad (3.26)$$

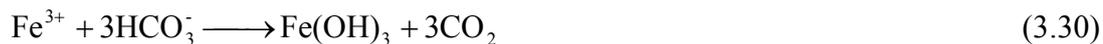
$$\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+} \quad \log[\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}] \quad = 8,58 - 4 \times \text{pH} \quad (3.27)$$

$$\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+} \quad \log[\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}] \quad = 28,19 - 5 \times \text{pH} \quad (3.28)$$

$$\text{Al}(\text{OH})_4^- \quad \log[\text{Al}(\text{OH})_4^-] \quad = \text{pH} - 13,91 \quad (3.29)$$

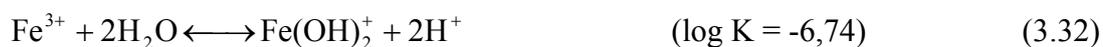
3.9.2 Cloreto Férrico

Os sais férricos (sulfatos e cloretos) são, também, usados amplamente como coagulantes no tratamento da água e no tratamento de efluentes. Suas reações na água que contém alcalinidade são similares às aquelas citadas anteriormente para o alumínio, como pode ser observado na eq. (3.30).

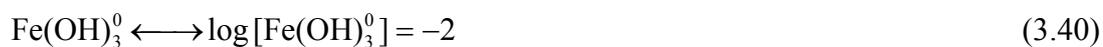
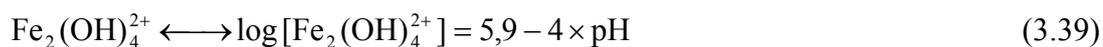
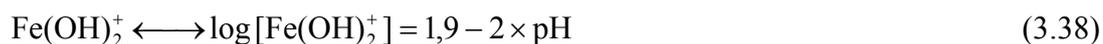
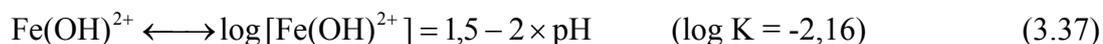


Solubilidade do ferro III

Considerando o equilíbrio referente ao comportamento do íon Fe^{3+} em água isenta de impurezas a 25°C, têm-se as reações de hidrólise conforme as eq. (3.31) a (3.36) (Di Bernardo, 1993).



Para cada espécie de ferro é possível obter a equação que relaciona sua concentração molar com o pH.



A partir das eq. (3.37) a (3.42), é possível construir o diagrama de solubilidade do ferro III: das espécies hidrolisadas do ferro em função do pH.

3.9.3 Hidroxicloreto de Alumínio

O Hidroxicloreto de alumínio HCA é um coagulante inorgânico catiônico pré-polymerizado à base de cloretos de polialumínio, também conhecido como PAC. A fórmula química geral é do tipo $Al_x (H_2O)_{(6x-2y)}(OH)_yCl_{(3x-y)}$ ou $Al_n(OH)_mCl_{3n-m}$ (para $0 < m < 3n$).

A basicidade, parâmetro importante do HCA, se refere ao número médio de íons hidroxila por átomo de alumínio, na molécula do produto varia de 0 a 3,0, embora o valor zero não defina um produto como HCA. Na Tabela 3.7 são apresentados as fórmulas específicas do HCA, a acidez total, o teor de Al_2O_3 e as massas específicas das soluções fornecidas pelo fabricante (Di Bernardo & Dantas, 2005).

TABELA 3.7 – Fórmulas específicas do HCA, a acidez total, o teor de Al_2O_3 e as massas específicas das soluções fornecidas pelo fabricante.

Fórmula Química	Acidez total (%HCl, massa/massa)	Al_2O_3 total (% massa/massa)	Massa específica (Kg/L a 18°C)
Al_2Cl_6	22,84	9,06	1,270
$Al_2(OH)_1Cl_5$	21,49	10,2	1,280
$Al_2(OH)_2Cl_4$	19,45	11,3	1,290
$Al_2(OH)_3Cl_3$	17,85	16,4	1,300
$Al_2(OH)_4Cl_2$	14,14	20,3	1,315
$Al_2(OH)_{4,5}Cl_{1,5}$	12,00	22,6	1,325

Os produtos comerciais geralmente apresentam uma porcentagem de basicidade entre 10% e 83%. O produto comercial líquido é adquirido em bombonas, com massa específica da solução de 1,25 a 1,40 kg/L. O HCA em pó é adquirido em sacos plásticos, com teor de Al_2O_3 entre 10% e 18% e massa específica aparente e aproximadamente 900 kg/m³ (Di Bernardo & Dantas, 2005).

3.10. Auxiliares de coagulação / floculação

Tanto polímeros sintéticos, como naturais têm sido usados como auxiliares de floculação e filtração. Os polímeros sintéticos aumentam a velocidade de sedimentação dos flocos, a resistência dos mesmos as força de cisalhamento que podem ocorrer na veiculação da água floculada e a diminuição da dosagem de coagulante primário (Di Bernardo, 1993).

O termo polieletrólito é usado para denominar os polímeros de peso molecular elevado, apresentando ou não regiões ionizáveis ao longo de sua cadeia. A quantidade e o tipo de monômeros que compõem a cadeia dos polímeros são extremamente variáveis, de modo que pode ser obtida uma grande variedade de polieletrólitos de peso molecular diferentes (Campos, 1980 citado por Santos, 2001).

Os polieletrólitos podem ser classificados como aniônicos, catiônicos, anfotéricos e não-iônicos, dependendo da carga e do grupo funcional que apresentam (Di Bernardo *et al.*, 2002).

Os polímeros, de peso molecular alto e cadeias muito longas, são capazes de estabelecer ligações entre as partículas dispersas na água. Para que isso ocorra, são fundamentais a carga, o peso molecular e o grupo funcional do polímero. A carga do polímero serve para neutralizar as cargas da matéria em suspensão na água. O grupo funcional facilita a adsorção das partículas ao polímero e o peso molecular estabelece a sedimentação (Claas e Maia, 1994).

Para Santos (2001), o uso de polieletrólitos associados com coagulantes em estações de tratamento de efluentes, apresenta algumas vantagens em comparação com o uso exclusivo de coagulantes primários:

- Melhoria na qualidade do efluente tratado;
- Redução do consumo de coagulante primário;
- Redução do volume de lodo, o que reduz os problemas com disposição final do lodo;
- Possível redução nos gastos com produtos químicos (em relação ao uso exclusivo de coagulantes metálicos);
- Possibilidade de aumento da vazão tratada (ou como solução de emergência em sobrecargas).

3.11. O curtume e o meio ambiente

Estudos mostram que a otimização do processo de curtimento, na busca de um alto e melhor esgotamento, diminui a carga poluidora dos efluentes e o custo da produção, sem comprometer a qualidade final do couro (Prados *et al.*, 2002b).

Estudos realizados por Teixeira & Bergmamm (2001) mostram que o aproveitamento de serragem de couros curtidos ao cromo, nas massas para a fabricação de tijolos, resulta em duas vantagens ambientais: a reciclagem e a inertização dos resíduos freqüentemente poluentes e de difícil eliminação; e na economia de matérias primas argilosas.

Oliveira *et al.* (2007), verificou através dos resíduos obtidos para as propriedades físicas, a possibilidade da incorporação do lodo de ciclo de cromo na massa cerâmica para fabricação de artefatos para construção civil.

O desenvolvimento de trabalhos e técnicas para diminuir a carga poluente nos banhos residuais dos processos de curtimento, é um objetivo prioritário dentro do âmbito da tecnologia do curtimento de peles bovinas (Palop, 2004).

Klein (2002), desenvolveu um projeto que estuda através da incineração de resíduos do couro, a possibilidade do uso do cromo das cinzas em reaproveitamento na indústria química e também o uso da energia gerada no processo de incineração. O objetivo do projeto é a geração de energia e eliminar um passivo ambiental.

É possível a realização de uma desengalagem eficaz, ausente de sais amoniacais, proporcionando uma diminuição significativa do teor de nitrogênio lançado no efluente, minimizando, assim, a carga poluidora, em decorrência da eficiência do processo desenvolvido (Prados *et al.*, 2002b).

Para Freitas (2007), o processo de curtimento de peles bovinas com reciclagem direta de banho de curtimento, consome menor volume de água, mantendo-se a qualidade do produto final. O volume de efluente gerado no processo convencional de curtimento de peles bovinas é em média 205,96 litros por couro produzido, e com a utilização do banho reciclado de cromo esse volume é em média 179,64 litros por couro produzido.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os equipamentos, materiais utilizados e a metodologia adotada. Todo o processo foi desenvolvido no laboratório LAQUA/UFMS e no laboratório de controle de qualidade interno do curtume onde foi realizada a pesquisa.

4.1. Apresentação da indústria

O curtume, do qual foram coletadas as amostras de efluente bruto para os experimentos, transforma 2.000 peles bovinas em couro *wet-blue* (couro azul molhado) diariamente, o que corresponde a 54.000 kg de couro produzido diariamente.

A indústria encontra-se instalada no município de Campo Grande, no Estado de Mato Grosso do Sul. Utiliza no seu processo químico de industrialização do couro, a segregação e reciclagem dos banhos de enalagem/depilação e do banho de curtimento. Gasta um volume de 4.600 litros de água para cada tonelada de couro produzido, e um volume de efluente de 3.700 litros por cada tonelada de couro produzido.

4.1.1. Descrição da estação de tratamento de efluentes do curtume

A atividade e o processo industrial empregados caracterizam os despejos industriais. Os sistemas de tratamento dividem-se em operações e processos unitários, que são os métodos de tratamento.

Existem diversos processos de tratamento, os quais são implantados de acordo com a composição do efluente e as concentrações que se deseja alcançar no efluente final. O sistema da estação de tratamento do curtume, onde foi realizada esta pesquisa, é dividido nas seguintes etapas:

- Tratamento Preliminar: onde há remoção de sólidos grosseiros e areia;
- Tratamento Primário: ocorre sedimentação de sólidos, digestão e secagem de lodo;
- Tratamento Secundário: ocorre remoção de matéria orgânica, sedimentação do lodo.

A estação de tratamento de efluentes do curtume é dimensionada para tratar $30\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ de águas residuais. Com a água, vem todo o material orgânico e inorgânico residual do curtume. Aqui, neste trabalho, foi dada ênfase à etapa do tratamento primário, onde foram realizados testes do processo de coagulação/floculação, seguido da sedimentação.

A Figura 4.1 apresenta o fluxograma da estação de tratamento de efluentes da indústria curtidora constituída de um tratamento preliminar, um tratamento primário e um tratamento secundário.

Para se ter uma idéia melhor do processo de tratamento de efluentes, serão descritas mais detalhadamente as etapas percorridas pelo efluente, desde a saída da indústria, até a etapa final da estação de tratamento.

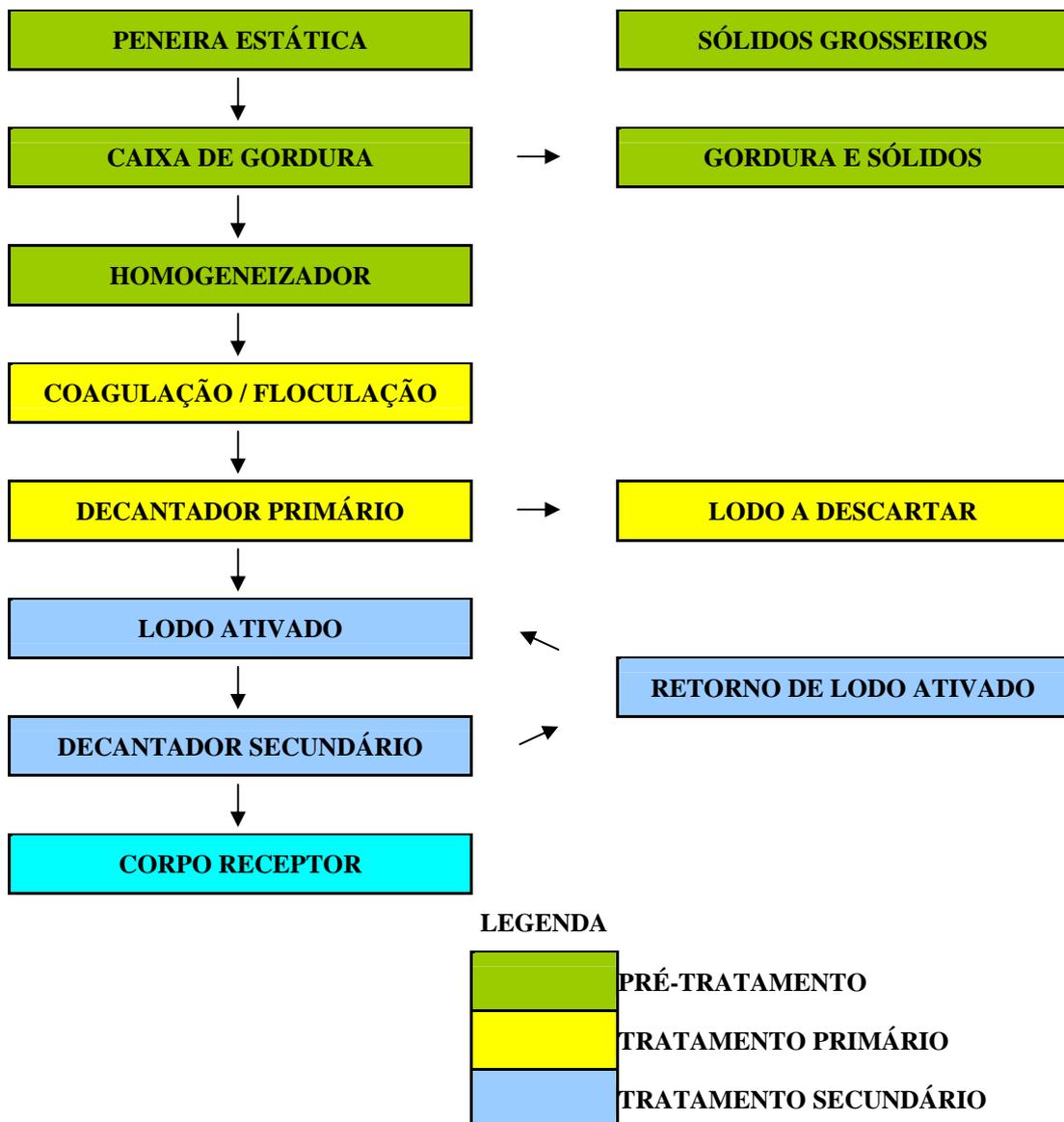


FIGURA 4.1 – Fluxograma da estação de tratamento de efluentes.

Peneira estática

A estação de tratamento de efluentes possui duas peneiras - uma peneira mecanizada, parabólica, e uma peneira estática. As peneiras estáticas são equipamentos de construção simples, para onde o efluente contendo sólidos aflui pela parte superior, tomando sentido ascendente até o topo, vertendo pela superfície da tela ou chapa perfurada, ficando retido na superfície os sólidos grosseiros. As peneiras mecanizadas parabólicas automáticas, também são separadores de sólido-líquido, só que de limpeza automática, onde o sólido é arrastado por escovas de cerdas de *nylon*. A figura 4.2 mostra a peneira estática utilizada no reciclo do calceiro.



FIGURA 4.2 – Peneira estática.

Caixa de gordura

As caixas de gorduras, no caso de efluentes de curtumes, consistem na separação de líquido-líquido – no caso de óleos, e na separação de sólido-líquido – no caso das graxas. É um tanque de alvenaria com paredes totalmente lisas, para evitar incrustações de gordura na parte interna. Suas dimensões são as seguintes:

Profundidade útil:	$h_u = 1,50\text{m}$
Comprimento:	$C = 5,00\text{m}$
Largura:	$L = 3,00\text{m}$
Volume útil:	$V = 22,50\text{m}^3$

Homogeneizador

O tanque de homogeneização é fundamental para a realização do tratamento físico-químico ou primário. Recebe todos os banhos gerados no processo produtivo de

industrialização do couro, com exceção dos banhos que são reciclados. A Figura 4.3 mostra o tanque de homogeneização do curtume.

Como se trata de banhos com faixa de pH variáveis, pH 2,0 (oriundo do banho de píquel), até pH 11,0 (proveniente do banho da depilação/encalagem), normalmente é necessário fazer a correção de pH com um produto alcalino – é utilizada soda caustica ou cal hidratada.



FIGURA 4.3 – Homogeneizador.

As medidas do tanque de homogeneização são para conter 80% do volume produzido em um dia de trabalho. Atualmente, o tanque de homogeneização está com um tempo de retenção de 3 dias. Suas dimensões são as seguintes:

Profundidade útil: $h_u = 2,50\text{m}$

Comprimento: $C = 18,00\text{m}$

Largura: $L = 8,00\text{m}$

Volume útil: $V = 360,50\text{m}^3$

A potência total do sistema de injeção de ar no homogeneizador é de 100 CV, distribuídas em quatro aeradores de superfície de 25CV cada.

Decantador primário

São utilizados três decantadores cilíndricos em polietileno revestido de fibra de vidro (PRFV), com dispositivos especiais de Hidroflux orientador de fluxo, calhas vertedoras, dispositivos de coleta de lodo, conforme mostra a Figura 4.4.

Os decantadores têm a finalidade de separar a parte sólida da parte líquida do efluente bruto. Suas dimensões são as seguintes:

Diâmetro: $2,80\text{m}$

Altura do Cone:	2,30m
Altura do Cilindro:	2,90m
Inclinação do Cone:	60°
Altura Total:	5,20m
Volume Total:	25 m ³



FIGURA 4.4 – Decantadores primários.

Reator de lodo ativado

Neste tanque, ocorre a depuração biológica dos resíduos líquidos por via aeróbia. Possui tempo de detenção de 5 dias, com um volume de 720m³ por dia.

A potência total requerida dos aeradores para oxidação da matéria orgânica é de 96,48CV, distribuídos entre quatro aeradores de superfície de 25CV, cada. A Figura 4.5 mostra o reator de lodo ativado.



FIGURA 4.5 – Reator lodo ativado.

Decantador secundário

É um tanque retangular que possui uma ponte raspadora de lodo com o mesmo formato do tanque, com poço especial de obra de lodo de fundo. Suas dimensões são as seguintes:

Profundidade:	$h = 3,00\text{m}$
Comprimento:	$C = 9,50\text{m}$
Largura:	$L = 4,60\text{m}$
Altura útil:	$h_u = 3,50\text{m}$
Volume:	$V = 151,11\text{m}^3$

4.2. Equipamentos utilizados para realização dos testes

Todos os ensaios de jarteste foram desenvolvidos no Laboratório de Controle de Qualidade do curtume onde a pesquisa foi realizada. A Figura 4.6 mostra a estrutura física do laboratório. Os controles analíticos, parte foram realizados no Laboratório de Controle de Qualidade do Curtume e parte no Laboratório de Qualidade Ambiental LAQUA/DHT/CCET, da UFMS.



FIGURA 4.6 – Laboratório da ETE do Curtume.

Os equipamentos utilizados nos testes foram: coluna de sedimentação, equipamento de reatores estáticos de seis jarros - jarteste, pHmetro, cronômetro digital, turbidímetro, balança analítica.

4.2.1. Coluna de sedimentação

A coluna foi construída e instalada ao lado dos decantadores da ETE. O nível de efluente colocado na coluna foi o mesmo nível do efluente nos decantadores, conforme mostra a Figura 4.7. A Figura 4.8 mostra em detalhes as torneiras da coluna de sedimentação.

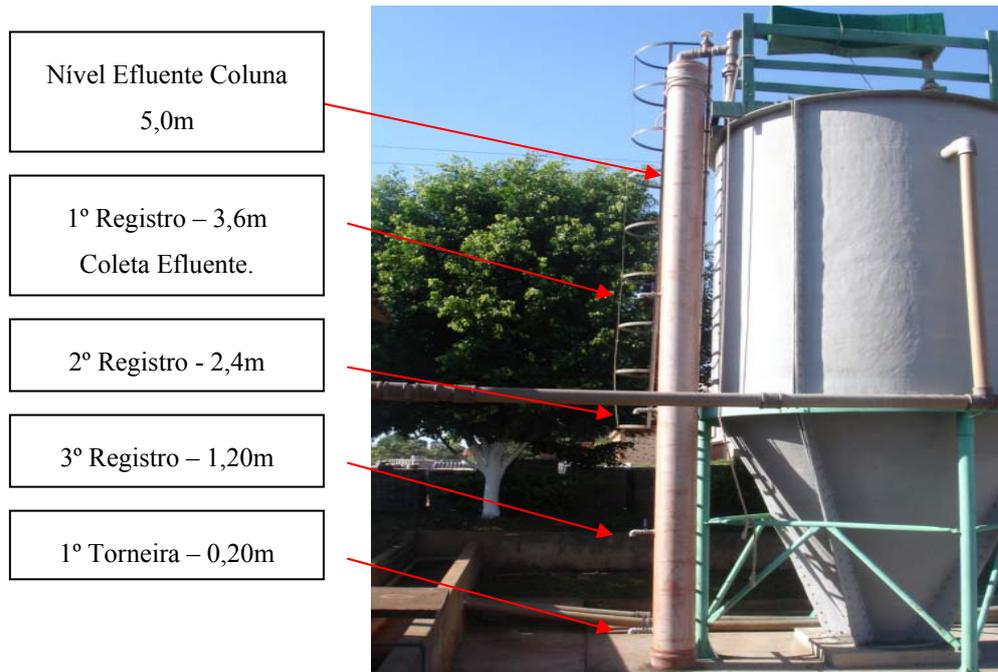


FIGURA 4.7 – Coluna de sedimentação.

A coluna de sedimentação possui 6m de altura, 30cm de diâmetro, com capacidade total de 424 litros, mas o volume utilizado foi de 353 litros, obedecendo ao mesmo nível de efluente nos decantadores, o que corresponde à altura de 5,0m na coluna.

Os registros para coleta das amostras foram instalados em intervalos iguais, 1,20m. Partindo-se da base da coluna o primeiro registro a 20cm, o segundo a 1,20m, o terceiro a 2,40m e o quarto a 3,60m da base da coluna.



FIGURA 4.8 – Detalhes dos registros da coluna de sedimentação.

4.2.2. Equipamento de reatores estáticos – Jarteste

O equipamento de reatores estático, jarteste, é constituído de 6 ou 3 jarros e fornece gradiente de velocidade entre 10 e 200s^{-1} . Os jarros são em acrílico transparente e possuem dimensões de $(115 \times 115)\text{mm}^2$, volume de 2 litros e um agitador com paletas de $(25 \times 75)\text{mm}^2$. O equipamento utilizado nos ensaios foi de 6 jarros.

Os ensaios de coagulação-floculação foram realizados posteriormente à caracterização do efluente bruto. A caracterização é importante para o conhecimento do efluente que está se trabalhando e para determinar a eficiência obtida após o ensaio.

4.2.3. pHmetro, cronômetro digital, balança analítica

Foi utilizado um pHmetro com medidor de temperatura acoplado e um cronômetro digital, para controle dos tempos de gradiente de mistura e tempo de sedimentação. Uma balança analítica para diluição do Sulfato de Alumínio, do Hidróxido de Cálcio e do Ácido Sulfúrico utilizados nos ensaios.

4.3. Produtos utilizados

Foram utilizados coagulantes, auxiliares de floculação, produtos para ajuste de pH e reagentes diversos para preservação e realização das análises durante os experimentos.

4.3.1. Produtos químicos

Os coagulantes estudados foram os seguintes:

- Cloreto Férrico – Kemwater S.A.;
- Sulfato de Alumínio – Suall Ind. Com. LTDA.;
- Hidroxicloreto de Alumínio – Pan-Americana S.A. Indústrias Químicas.

Além dos coagulantes, os seguintes produtos foram usados: ácido clorídrico a 5%, hidróxido de cálcio a 15% e polímero aniônico a 2%.

Sulfato de Alumínio

O Sulfato de Alumínio utilizado nos testes foi em pó e isento de ferro. A Tabela 4.1 mostra a especificação físico-química do produto e a Tabela 4.2 apresenta sua impureza.

TABELA 4.1 – Especificação físico-química Sulfato de Alumínio, isento de ferro.

ESPECIFICAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA	
Especificação	Sulfato de Alumínio
%Al ₂ O ₃	Mín. 16,50
%Fe ₂ O ₃	Max. 0,010
% Acidez Livre	Max. 0,50
Estado Físico	Sólido granulado
Granulometria	Até 1mm
Cor	Branco
Ferro	Isento
Produzido com ácido sulfúrico 98,5% (não residual)	

Fonte: Suall Ind. Com. Ltda (2007).

TABELA 4.2 – Impurezas do Sulfato de Alumínio.

IMPUREZAS	
Arsênio	máx. 33mg/kg
Cádmio	máx. 3,3mg/kg
Cromo	máx. 33mg/kg
Chumbo	máx. 33mg/kg.
Mercúrio	máx. 0,7mg/kg
Selênio	máx. 33mg/kg
Prata	máx. 33mg/kg
Fenol	Ausente
Detergente	Ausente

Fonte: Suall Ind. Com. Ltda (2007).

Hidroxícloreto de Alumínio

As formas tecnicamente corretas de identificação de tal produto são: Hidroxícloreto de Alumínio, Cloreto de Polialumínio ou até mesmo Poli Alumínio Clorado. Mas, ficou conhecido popularmente como Hidroxícloreto de Alumínio, o que é errado, pois são os íons de alumínio hidratados, que através de reações de polimerização são conduzidos a certos íons poliatômicos complexos. Sendo tais espécies poliméricas catiônicas, exibem uma alta concentração de cargas elétricas positivas, o que determina a eficácia superior em relação aos tradicionais sais inorgânicos não pré-polimerizados. A fórmula bruta de um coagulante inorgânico pré-polimerizado à base de Cloreto de Alumínio pode ser representada como: $Al_n(OH)_mCl^{3n-m}$. A carga catiônica destas espécies poliatômicas complexas pode ser calculada a partir da expressão: Carga: $Al_n(OH)_m^{(3n-m)+}$ (PAN-AMERICANA, 2005).

O grau de polimerização “n” depende de vários fatores no processo de fabricação, em geral da concentração de íons hidroxilas (OH^-) na molécula. Os grupos hidroxilas, através de ligações de coordenação com os átomos de alumínio formam compostos polinucleres (PAN-AMERICANA, 2005).

A Tabela 4.3, que mostra as características e especificações do produto PANFLOC TE (coagulante inorgânico prepolimerizado de baixa salinidade) da Pan-Americana S.A. Indústrias Químicas, que foi utilizado nos experimentos deste trabalho.

Em função de sua “basicidade” o PANFLOC TE libera durante a hidrólise, em igualdade de dosagem em íons metálicos uma quantidade de ácido consideravelmente menor do que a liberada pelos coagulantes tradicionais, o que provoca uma menor variação do pH do meio tratado.

TABELA 4.3 – Características e especificações do Hidroxícloreto de Alumínio.

CARACTERÍSTICAS E ESPECIFICAÇÕES	
Fórmula Química	$Al_n(OH)_mCl^{3n-m}$
Aspecto	Líquido viscoso
Cor	Castanha
Odor	Inodoro
Al_2O_3 %	16,0 – 18,5
Densidade a 25°C (g/cm ³)	1,30 – 1,40
pH (sol 1% H ₂ O)	3,5 - 4,5

Fonte: Pan-Americana (2007).

Cloreto Férrico

O Cloreto Férrico utilizado foi em forma líquida. A Tabela 4.4 apresenta a especificação físico-química do produto fornecida pelo fabricante.

TABELA 4.4 – Especificação físico-química do Cloreto Férrico.

ESPECIFICAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA	
Propriedades	Especificação
Concentração FeCl ₃	mín. 21%
Material Insolúvel	< 1,0%
Densidade	1,400 ± 0,02
Acidez livre (% em HCl)	< 1,0%

Fonte: Kemwater do Brasil S.A..

4.3.2. Auxiliar de floculação

O polieletrólito utilizado é fortemente aniônico, de aspecto líquido branco leitoso. Possui pH 7, completa solubilidade em água, densidade (25°C) de 1,00 a 1,10 e viscosidade (25°C) de 1.700 cps.

4.4. Procedimentos

4.4.1. Coleta de amostras para os ensaios de Jarteste

As coletas das amostras do efluente bruto para realização dos ensaios de jarteste foram realizadas em duas etapas.

Inicialmente as amostras foram coletadas diretamente no homogeneizador e transferidas para um balde de polietileno com capacidade de 60 litros.

Os ensaios no jarteste foram realizados logo após a coleta, mas não foi possível a conclusão dos mesmos, em decorrência do grande volume de lodo gerado nos jarros, inviabilizando a coleta do clarificado para monitoramento dos parâmetros pré-determinados. Por dias seguidos tentou-se fazer os testes, mas o volume de lodo no cone Imhoff em 1 (uma) hora chegou a 80% do volume do total do efluente. A grande quantidade de sólidos dificultou até mesmo o processo de sedimentação, depois da coagulação/floculação os sólidos demoravam a sedimentar.

A Figura 4.9 mostra o operador da ETE efetuando a coleta da amostra do efluente bruto no homogeneizador. As Figuras 4.10 e 4.11 mostram a grande quantidade de sólidos sedimentáveis das primeiras amostras do efluente bruto coletadas, diretamente no

homogeneizador; e as Figuras 4.12 e 4.13 mostram o volume de lodo gerado no ensaio do jarteste do efluente bruto coletado, diretamente no homogeneizador.



FIGURA 4.9 – Procedimento de coleta.



FIGURA 4.10 – Análise de sólidos sedimentáveis do efluente bruto.



FIGURA 4.11 – Grande quantidade de sólidos sedimentáveis no efluente bruto.



FIGURA 4.12 – Grande quantidade de lodo gerado no jarteste.



FIGURA 4.13 – Detalhe do volume de lodo gerado no jarteste.

Em uma segunda etapa, foi instalada uma coluna de sedimentação com 6 metros de altura. E as amostras foram coletadas obedecendo sequencialmente o tempo de 15', 30' e 45' após o enchimento da coluna. Mas, para os ensaios, utilizou-se o efluente das amostras coletadas após 45 minutos de sedimentação na coluna. A Figura 4.14 mostra no cone Imhoff a diferença de sólidos no efluente coletado no momento de abastecimento da coluna, após 15 minutos, 30 minutos e 45 minutos de sedimentação na coluna.

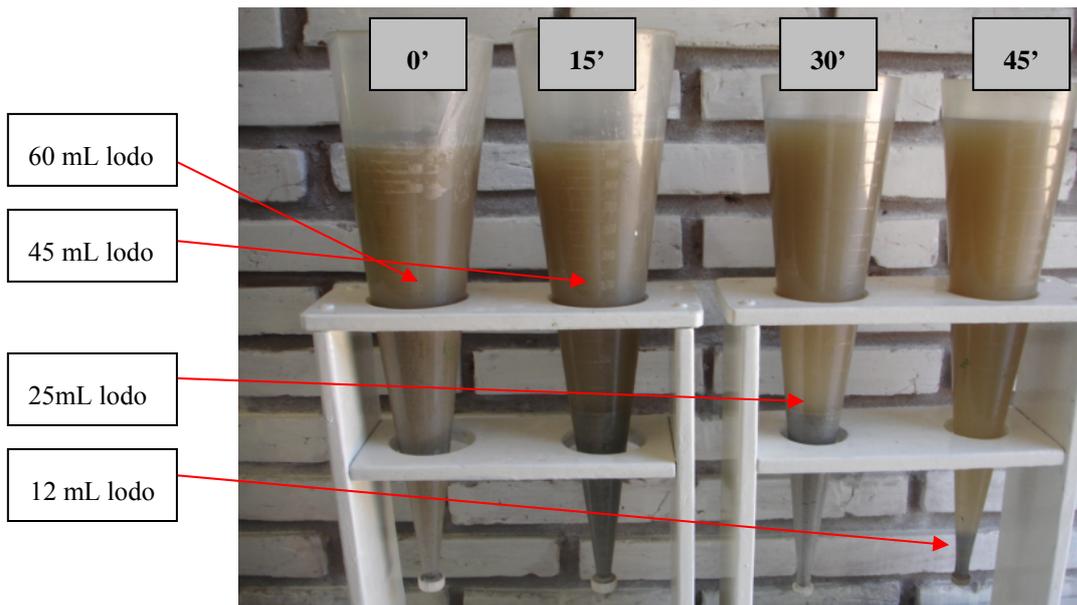


FIGURA 4.14 – Volume de lodo em diferentes tempos de coleta.

Inicialmente, a coluna de sedimentação foi abastecida através de um registro de 3 polegadas, o qual foi instalado na base superior da coluna. Através de um tubo de 50mm de diâmetro, acoplado ao tubo que abastece os decantadores através de uma bomba com vazão de 45m^3 por hora, direcionava o efluente do homogeneizador direto para coluna. Com abertura total do registro e uma vazão de 176,5 litros por minuto, a coluna foi abastecida com o efluente bruto em 2 minutos. A partir desse momento, o cronômetro foi acionado e de 15 em 15 minutos foi realizada uma coleta até completar os 45 minutos. Cada torneira de coleta de 1 polegada instalada na coluna de sedimentação tinha uma vazão de 50 litros por minuto. Completando-se os 45 minutos após o abastecimento da coluna com o efluente bruto; foi realizada a coleta das amostras na torneira com altura de 3,5m a partir da base da coluna, ou seja, a primeira torneira depois do nível de efluente na coluna de sedimentação. O volume de amostra coletado na coluna foi de 60 litros, suficiente para realizar as 3 bateladas de jarteste do dia. Do volume de 60 litros de amostra coletado na coluna foi retirada uma quantidade para caracterização do efluente bruto e para ver os sólidos sedimentáveis no cone Imhoff. Sendo

assim possível realizar somente uma caracterização do efluente bruto para todos os ensaios do dia.

Com o uso a coluna de sedimentação foi possível realizar os testes no jarteste e efetuar a coleta do clarificado, conforme procedimento especificado mais adiante. Pois, grande parte dos sólidos sedimentáveis decantavam naturalmente sem adição de produtos químicos.

4.4.2. Parâmetros operacionais adotados para os ensaios de coagulação-floculação-sedimentação (jarteste)

Os parâmetros operacionais adotados para simulação da etapa de coagulação foram determinados pela operação de mistura rápida do coagulante no efluente, caracterizada principalmente pelo tempo de mistura rápida (T_m) e gradiente de mistura rápida (G_m). O tempo de mistura rápida adotado foi de 30 segundos, e o gradiente de mistura rápida adotado foi de 100 rpm.

As condições de floculação, por sua vez, são determinadas pelo tempo de floculação (T_f) e pelo gradiente de floculação (G_f). O tempo de floculação adotado foi de 15 minutos, sendo que os 5 primeiros minutos com um gradiente de 40 rpm e os 10 minutos restantes com um gradiente de 35 rpm. Para a etapa de sedimentação, o principal parâmetro operacional é a velocidade de sedimentação (V_s), para coleta do clarificado usou-se o tempo de 15 minutos após o término do processo de coagulação-floculação. A Tabela 4.5 mostra os parâmetros físicos adotados para os ensaios de jarteste.

TABELA 4.5 – Parâmetros físicos da pesquisa.

DISCRIMINAÇÃO	EFLUENTE BRUTO
MISTURA RÁPIDA	
T_{mr} (s)	30
G_{mr} (s^{-1})	1000
FLOCULAÇÃO	
1° T_f (min)	5
1° G_f (s^{-1})	25
2° T_f (min)	10
2° G_f (s^{-1})	15
TEMPO DE SEDIMENTAÇÃO	
T_s (min)	15

Legenda: T_{mr} = tempo de mistura rápida; G_{mr} = gradiente de mistura rápida; T_f = tempo de floculação; G_f = gradiente de floculação; T_s = tempo de sedimentação.

4.4.3. Ensaio de coagulação-floculação-sedimentação (jarteste)

Os ensaios no equipamento de reatores estático (jarteste) foram utilizados para tentar simular as condições físicas de coagulação, floculação e sedimentação. Os ensaios com melhores resultados poderão servir de ponto de partida para utilização em linha de produção. Na realização dos ensaios no equipamento jarteste foram seguidos os seguintes procedimentos:

- Limpou-se os jarros com água corrente;
- Preparou-se as soluções utilizadas durante os ensaios, hidróxido de cálcio 15%, de ácido sulfúrico 10%, de Sulfato de Alumínio 50% e do polímero aniônico com a mesma concentração utilizada em linha de produção de 2%;
- Distribuiu-se porções do efluente bruto, coletado depois de 45 minutos na coluna de sedimentação e bem homogeneizado, em cada um dos jarros até a obtenção de 2 litros;
- No primeiro dia de testes, dia 10/05/2007, foram realizadas 3 bateladas de ensaios no jarteste: uma com o Sulfato de Alumínio, outra com Hidroxicloreto de Alumínio e outra com o Cloreto Férrico. Colocou-se, primeiramente, os volumes correspondentes às dosagens dos coagulantes nos recipientes apropriados do jarteste, primeiras cubetas, para determinar a dosagem com melhor eficiência de remoção dos parâmetros que serão monitorados;
- Nos testes realizados, dia 14/05/2007, foram realizadas mais 3 bateladas de ensaios no jarteste. Aplicou-se as dosagens pré-estabelecidas dos coagulantes Cloreto Férrico, Sulfato de Alumínio e do Hidroxicloreto de Alumínio em todos os recipientes apropriados do jarteste, primeiras cubetas, e antes de dosar nos jarros variou-se o pH, para determinar a melhor faixa de atuação do produto;
- Nas 3 últimas bateladas, realizadas dia 16/05/2007, manteve-se o pH e a colocou-se nas primeiras cubetas do jarteste as dosagens dos coagulantes pré-estabelecidos anteriormente, e logo depois colocou-se diferentes dosagens da solução de polímero nos recipientes apropriados, segundas cubetas, do jarteste;
- Posicionou-se os recipientes de descarte e coleta de amostra de água decantada nas respectivas posições apropriadas do equipamento;
- Ligou-se o equipamento de agitação e acertou-se a rotação para o gradiente de mistura rápida, 100 rpm durante 30s;

- Adicionou-se aos jarros do jarteste o volume pré-estabelecido de coagulante contido nas cubetas do suporte frontal;
- Após o tempo de contato, acertou-se a rotação correspondente ao gradiente de velocidade de floculação desejado, 40 rpm durante 5 minutos, e depois para 35 rpm nos 10 minutos restantes;
- Desligou-se o equipamento após o tempo de floculação;
- Coletou-se as amostras de água decantada após o tempo de sedimentação desejado, 15 minutos;
- Mediu-se o volume de lodo gerado em cada jarro do jarteste no cone Imhoff;
- Preservou-se as amostras para análise dos parâmetros de sólidos totais, cloretos, sulfetos, NTK, amônia, alumínio, ferro, cromo e fosfato e encaminhamento para os devidos laboratórios;
- Avaliou-se pH, turbidez e DQO, logo depois da coleta do clarificado.

4.4.4. Realização dos testes

Os testes foram realizados em escala de bancada, em um equipamento de reatores estáticos de 6 jarros. As amostras de clarificado avaliadas foram coletadas em três dias de trabalho, dia 10/05/2007, 14/05/2007 e 16/05/2007.

Em cada dia de trabalho foram realizadas 3 bateladas de ensaios, e cada batelada com 6 jarros trabalhava-se com um tipo de coagulante. Os testes foram realizados da seguinte forma: primeiro determinou-se a melhor dosagem do coagulante, depois determinou-se a melhor faixa de pH de atuação do coagulante e por último determinou-se a melhor dosagem do auxiliar de floculação, polímero.

Com intuito de não variar muito o tempo de coleta de um dia de ensaio para outro diminuindo, assim, o risco de mudanças bruscas no efluente bruto, não foi possível aguardar o resultado de todos os parâmetros monitorados. Avaliou-se o volume de lodo, a turbidez e a DQO, para que fosse possível passar para a próxima etapa dos testes.

Determinação da melhor dosagem do coagulante

No primeiro dia de ensaio, dia 10/05/07, foram realizadas 3 bateladas de ensaios com 6 jarros cada. Uma, utilizando o Cloreto Férrico, outra utilizando o Sulfato de Alumínio e a última utilizando o Hidroxicloreto de Alumínio.

A primeira batelada foi com o Cloreto Férrico, variando sua dosagem de 0,3g a 1,8g para cada 2 litros de efluente em cada jarro, utilizando-se o produto tal qual, 21,5%, sem diluição. A segunda batelada foi com Sulfato de Alumínio em pó 17%, diluído a 50%, variando sua dosagem de 0,3g a 1,8g para cada 2 litros de efluente em cada jarro. E a terceira batelada foi com o Hidroxicloreto de Alumínio 18%, utilizado tal qual, com dosagens variando também de 0,3g a 1,8g para cada jarro de 2 litros cada.

Depois de homogeneizado no balde de 60 litros, a amostra foi distribuída nos jarros e logo depois adicionado o coagulante variando as dosagens conforme mencionado anteriormente. Logo depois de concluído os testes, eram coletadas as amostras do clarificado e determinado o volume de lodo gerado em cada jarro.

As amostras do clarificado foram coletadas obedecendo as normas de preservação, sendo que no mesmo dia as amostras foram encaminhadas aos laboratórios. A leitura da turbidez foi realizada logo depois da coleta do clarificado.

Depois de concluída as análises dos parâmetros monitorados, volume de lodo, turbidez e DQO, avaliou-se a melhor dosagem de cada coagulante.

Determinação do melhor pH de atuação de cada coagulante

Com a melhor dosagem de cada coagulante determinada, em uma segunda etapa, verificou-se o melhor pH do efluente bruto para uma maior eficiência de atuação de cada coagulante.

Sendo assim, foram realizadas, em um segundo dia de ensaios, mais três bateladas no jarreste, sendo que cada batelada correspondiam aos testes com um tipo de coagulante, mantendo-se a melhor dosagem pré-determinada, e alterando-se o pH de 0,5 em 0,5, obedecendo a uma mesma faixa de pH, para os três coagulantes. Ou seja, variando o pH em uma faixa em que os três coagulantes testados conseguissem atuar bem.

No primeiro jarro foi mantido o pH do efluente bruto, e a partir do segundo jarro foi alterado o pH com solução de hidróxido de cálcio e com solução de ácido sulfúrico. Isso foi repetido para as três bateladas, alterando somente o coagulante em cada batelada, e mantendo-se a dosagem do coagulante para todos os jarros, conforme melhor dosagem pré-determinada.

Depois de concluídas as análises dos parâmetros monitorados, avaliou-se o melhor pH de atuação de cada coagulante. A Tabela 4.6 mostra as dosagens de acidificante, ácido sulfúrico, e as dosagens do alcalinizante, hidróxido de cálcio, utilizadas para ajuste do pH do efluente bruto.

TABELA 4.6 – Dosagens dos produtos para ajuste de pH.

Produto	Dosagem	Varição pH (para mais ou menos)
Ácido Sulfúrico	2,0 mL	<1,5
Ácido Sulfúrico	1,6 mL	<1,0
Ácido Sulfúrico	0,5 mL	<0,5
Hidróxido de Cálcio (pó)	7,5 g	>0,5
Hidróxido de Cálcio (pó)	15 g	>1,0

Conforme mostra a Tabela 4.6, para diminuir o pH em 1,5, utilizou-se 2 mL de ácido sulfúrico, para diminuir em 1,0 foi necessário 1,6 mL de ácido sulfúrico e 0,5 mL de ácido sulfúrico para diminuir o pH do efluente bruto em 0,5. Para aumentar o pH em 0,5 utilizou-se 7,5 g de hidróxido de cálcio e 15 g para aumentar o pH do efluente bruto em 1,0.

Determinação da melhor dosagem do auxiliar de floculação - polímero

Depois de determinar a melhor dosagem dos coagulantes e o melhor pH de atuação de cada um deles, foi determinada a melhor dosagem do auxiliar de floculação, que nesse caso era um polímero aniônico de alto peso molecular.

O produto utilizado e a diluição foram os mesmos usados no tratamento do efluente em linha de produção, com variação nas dosagens de 0,02g, partindo de 0,02g no primeiro jarro até 0,12g no sexto jarro.

Depois de finalizada as análises dos parâmetros monitorados, foi avaliado as vantagens e desvantagens do uso de cada coagulante, levando-se em consideração a relação custo/benefício, o melhor coagulante para aplicar em linha de produção.

4.4.5. Caracterização do efluente bruto e parâmetros monitorados

A Tabela 4.7 apresenta os parâmetros utilizados para a caracterização do efluente bruto e para o monitoramento do clarificado.

TABELA 4.7 – Parâmetros usados para caracterização do efluente bruto e para monitoramento do clarificado.

Parâmetro	Determinação melhor dosagem coagulante – 1º dia de ensaios	Determinação melhor pH de atuação coagulante – 2º dia de ensaios	Determinação melhor dosagem auxiliar de floculação – 3º dia de ensaios
pH	X X	X X	X X
Alcalinidade	X	X	X
DQO	X X	X X	X X
Turbidez	X X	X X	X X
Ferro		X X	X X
Alumino		X X	X X
Cromo		X X	X X
Fosfato		X X	X X
Sulfeto		X X	X X
Amônia		X X	X X
NTK		X X	X X
Cloretos		X X	X X
Sólidos Totais		X X	X X

Legenda: X = caracterização do efluente bruto; X = parâmetros monitorados.

4.4.6. Coleta e preservação de amostras para os testes analíticos

As amostras foram coletadas a 7cm de altura em relação à superfície do líquido na cuba do ensaio de jarteste, na abertura do jarro, própria para coleta.

O volume de amostra coletada foi o equivalente, a aproximadamente, ao tempo de 20s de coleta. Os parâmetros pH, turbidez e DQO foram realizados logo após a coleta; enquanto que os parâmetros sólidos totais, fosfato, cloretos, sulfeto, Cromo total, Alumínio, Ferro, NTK e nitrogênio em forma de amônia foram preservados para posterior análise, conforme as técnicas e métodos de amostragem e preservação preconizadas pelo Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2005).

4.4.7. Técnicas analíticas utilizadas

As técnicas analíticas adotadas na presente pesquisa também foram preconizadas pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005). A Tabela 4.8 apresenta as técnicas analíticas que foram utilizadas para os parâmetros monitorados.

TABELA 4.8 – Técnicas analíticas e unidades utilizadas.

Parâmetros	Unidades	Técnica analítica
Alcalinidade total	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	Método 2320B
Cloretos	mgCl ⁻ .L ⁻¹	Método 4500 – Cl ⁻ B
Alumínio	mgAl.L ⁻¹	Método 3500 –AL B
Ferro	mgFe.L ⁻¹	Método 3500 – FeB
Fosfato	mgPO ₄ ³⁻ .L ⁻¹	Método 4500 – P D
Cromo Total	mgCr.L ⁻¹	Método 3500 – Cr A
DQO	mg.L ⁻¹	Método 5220 C
Nitrogênio amoniacal	mgNH ₃ -N.L ⁻¹	Método 4500 – NH ₃ B
Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK)	mgNH ₃ -N.L ⁻¹	Método 4500-N _{org} B
pH	-	Método 4500 – H ⁺ B
Sólidos sedimentáveis	mL.L ⁻¹	Método 2540 F
Sólidos totais	mgST.L ⁻¹	Método 2540 B
Sulfeto total	mgS ²⁻ .L ⁻¹	Método 4500 – S ²⁻ F
Turbidez	UNT	Método 2130 B

Fonte: APHA (2005).

4.4.8. Controle do volume de lodo a ser produzido

Nos ensaios utilizando o equipamento estático jarteste foi monitorado, também, a quantidade de lodo obtido em cada ensaio. A produção de lodo é função do teor de sólidos decantáveis que caracteriza o efluente bruto, do tipo de coagulação e floculação empregado, da dosagem de produtos químicos utilizados e do tipo de clarificação empregado, nesse caso a sedimentação.

A avaliação da quantidade de lodo produzido é expressa por uma relação empírica, onde para cada kg de pele bovina processada gera-se de 0,10 a 0,15kg de matéria seca, levando-se em consideração as condições mencionadas anteriormente. O grau de hidratação do lodo depende do tipo de processo utilizado na clarificação do efluente primário, pois há diferença entre o processo de sedimentação e flotação, dificilmente produzem lodos com graus de hidratação idênticos.

A composição exata do lodo é muito variável, o teor de umidade pode oscilar em torno de 96% e o teor de matéria orgânica fica compreendido em uma faixa que varia de 70 a 90%, de acordo com a agregação de uma menor ou maior quantidade de lodo biológico. No caso dos testes que foram realizados, neste trabalho, não houve agregação de lodo biológico.

Esse lodo é estocado em um tanque, de onde é retirado por caminhões pipas terceirizados; cada caminhão tem capacidade para transportar 7.200kg de resíduo, atualmente

é gerado 40.000kg lodo por dia, o corresponde a 200kg lodo por m³ efluente bruto. O que gera em média 5,5 viagens do caminhão de lodo por dia.

Os ensaios considerados com melhores resultados, em relação ao volume de lodo produzido, foram levados em consideração para avaliar o custo/benefício da utilização de cada coagulante e auxiliar de floculação.

4.4.9. Construção da curva de sedimentação

O ensaio foi iniciado a partir do momento em que toda a suspensão encontrava-se uniforme na coluna e a temperatura do efluente constante. A coleta de amostras, em função do tempo (15 minutos), prosseguiu até se verificar que não houve alteração da turbidez e do teor de sólidos sedimentáveis, no ponto de amostragem considerado, registro de 3,60m, primeiro após o nível de efluente da coluna.

A velocidade de sedimentação, correspondente a cada amostra coletada, foi aproximadamente igual a $\frac{h}{t}$, sendo h a profundidade do ponto de amostragem e t, o tempo desde o início do ensaio.

Alguns cuidados foram obedecidos para a realização do ensaio na coluna de sedimentação:

- A área da coluna, de forma que as coletas não influenciaram significativamente na diminuição do nível do efluente;
- A profundidade do ponto de amostragem foi o mesmo do decantador utilizado em linha de produção;
- A temperatura foi praticamente constante em toda a profundidade da coluna;
- O enchimento da coluna foi realizado de forma a garantir certo grau de uniformidade da suspensão, no início do ensaio;
- O ponto de coleta foi no registro mais alto, 3,60m, para reduzir o efeito de deslocamento da suspensão para baixo, pois a altura do nível da água diminuiu.

Da mistura homogênea, a intervalos regulares de tempo, 15 minutos em 15 minutos, retirou-se uma amostra, determinando-se, para essas amostras, o teor de sólidos sedimentáveis e a turbidez. Com os dados calculou-se a porcentagem de sólidos sedimentáveis e turbidez removida nessa profundidade ao longo do tempo:

$$\% \text{ removida} = \frac{\text{concentração inicial} - \text{concentração presente}}{\text{concentração inicial}} \times 100$$

4.4.10. Método de avaliação do custo/benefício do processo de sedimentação

Foram avaliados os gastos com coagulantes, auxiliar de floculação e com o volume de lodo gerado, nos os ensaios considerados melhores; verificando a quantidade utilizada e a eficiência de cada coagulante, a quantidade do polieletrólito, as vantagens e desvantagens operacionais e técnicas na utilização do sistema sedimentação e a quantidade de lodo gerado.

Os melhores ensaios serão determinados, considerando a capacidade de depuração biológica do sistema secundário, que no caso do curtume é constituído de lodos ativados, cuja capacidade de depuração é de $720\text{kgDBO}\cdot\text{dia}^{-1}$. Um efluente de aparência cristalina, mas com um fator de biodegradabilidade baixo, nem sempre é o melhor resultado para o tratamento biológico, pois prejudica a eficiência de depuração biológica. Dosagens excessivas de coagulantes, além de implicar em custos elevados no tratamento, conferem um aumento indesejável da relação DQO/DBO.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As três amostras de efluentes brutos que foram trabalhadas durante os três dias em que foram realizados os testes, apresentaram como característica comum a grande quantidade de sólidos sedimentáveis, que impediu inicialmente a realização dos testes, em jarteste, como mencionado anteriormente.

Além da grande quantidade de sólidos sedimentáveis presentes no efluente bruto estudado, observou-se, como era esperado, uma grande concentração de poluentes, decorrentes dos resíduos orgânicos oriundos das peles e dos produtos químicos utilizados nas etapas durante o processo de curtimento. Esses resíduos orgânicos e químicos provenientes do processo de industrialização de peles bovinas torna esse tipo de efluente difícil de tratar.

Para permitir uma comparação entre os resultados dos três tipos de coagulantes, todos os ensaios do efluente foram realizados com os parâmetros citados na Tabela 4.5. Estes parâmetros são: para mistura rápida, $T_{mr} = 30s$, e $G_{mr} = 100 \text{ rpm}$; para floculação, $T_f = 5 \text{ min}$ e $G_f = 40 \text{ rpm}$, e $T_f = 10 \text{ min}$ e $G_f = 35 \text{ rpm}$ e tempo de observação de sedimentação dos flocos de 15 minutos.

5.1. Determinação da melhor dosagem dos coagulantes

5.1.1. Caracterização do efluente bruto

O efluente bruto que foi estudado no dia em que se determinou a melhor dosagem dos coagulantes apresentou as características apresentadas na Tabela 5.1.

TABELA 5.1 – Caracterização do efluente bruto utilizado nos ensaios para determinar melhor dosagem de coagulante.

Amostra	T	pH	AL	DQO	TU	Lodo
Bruto	35,5	7,69	3.214	18.115	1.680	250
Bruto 45'	35,0	7,74	1.290	5.644	526	12
Eficiência Remoção (%)	-	-	60	69	69	95

Observação: O efluente para realização dos testes foi coletado na coluna de sedimentação, após 45 minutos de sedimentação.

Legenda: T = temperatura ($^{\circ}C$); AL = alcalinidade ($\text{mgCaCO}_3.L^{-1}$); DQO (mg.L^{-1}); TU = turbidez., Lodo = lodo do cone Imhoff (mL.L^{-1}).

Na Tabela 5.1, verifica-se uma grande remoção em todos os parâmetros analisados após 45 minutos de sedimentação na coluna, chegando a 95% de remoção de sólidos sedimentáveis, em uma hora em cone Imhoff, o que mostra a importância de um sistema de sedimentação antes do processo de coagulação/floculação.

5.1.2. Monitoramento dos clarificados obtidos

As dosagens dos coagulantes, Cloreto Férrico, Sulfato de Alumínio e Hidroxicloreto de Alumínio, determinadas como melhores resultados, considerando a remoção de DQO, turbidez e o volume de lodo gerado, podem ser observadas na Tabela 5.2.

TABELA 5.2 – Resultados dos clarificados obtidos em jarreste, para dosagem de coagulante escolhida.

Coag.	Dos.	pH final	DQO	TU	Vol. lodo
(1)	1,5	7,19	2.590	114	150
(2)	1,5	7,18	2.648	63	185
(3)	0,9	7,60	2.445	76	115

Observação: A formação de flocos e a sedimentação ocorreram de forma bem parecida para os três coagulantes testados.

Legenda: Coag. = coagulante utilizado; (1) = Cloreto Férrico; (2) = Sulfato de Alumínio; (3) = Hidroxicloreto de Alumínio; Dos. = dosagem do coagulante ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$); DQO ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); TU = turbidez (UNT); Vol. Lodo = Volume do lodo gerado (mL).

Avaliando os resultados apresentados na Tabela 5.2, verifica-se que as dosagens dos coagulantes com melhor eficiência de remoção de DQO e turbidez nos ensaios em jarreste, levando-se em conta a relação custo/benefício, foram iguais para o Cloreto Férrico e para o Sulfato de Alumínio, $1,5 \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; e para o Hidroxicloreto de Alumínio foi de $0,9 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, dosagem bem menor do que a dosagem dos dois primeiros coagulantes. O coagulante que mais influenciou no pH do efluente foi o Sulfato de alumínio, abaixando o pH de 7,74 para 7,18, seguido pelo Cloreto Férrico, que abaixou o pH para 7,19, e por último o Hidroxicloreto de Alumínio que abaixou o pH para 7,6.

O Hidroxicloreto de Alumínio apresentou uma maior remoção de DQO, com 57% de eficiência, seguido pelo Cloreto Férrico com uma eficiência de 54%, e por último o Sulfato de Alumínio com 53% de eficiência de remoção de DQO.

Quanto a turbidez, os coagulantes que apresentaram melhor eficiência foram o Sulfato de Alumínio, seguido pelo Hidroxicloreto de Alumínio e pelo Cloreto Férrico, com uma eficiência de remoção de turbidez de 88%, 85% e 78%, respectivamente.

Houve uma diferença significativa no volume de lodo gerado nos ensaios de jarteste, com o uso do Sulfato de Alumínio, em relação aos outros dois coagulantes utilizados. Sendo que o Cloreto Férrico apresentou um menor volume de lodo gerado, 150mL para cada 2 litros de efluente no jarro. O Hidroxicloreto de Alumino gerou 155mL de lodo para cada 2 litros de efluente no jarro e Sulfato de Alumínio 185mL de lodo, para as mesmas condições.

A maior turbidez obtida com o Cloreto Férrico, 114 UNT, pode ser observada no término dos testes, pois o clarificado ficou bem escuro, devido à reação do sulfeto presente no efluente com o Cloreto Férrico. O lodo também apresentou uma cor bem escura, quase preta. O lodo do Sulfato de Alumínio demorou mais a sedimentar e ficou mais espesso do que o lodo gerado com os outros dois coagulantes. As Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 mostram os ensaios no jarteste, com cada um dos coagulantes.



FIGURA 5.1 – Jarteste com Cloreto Férrico.

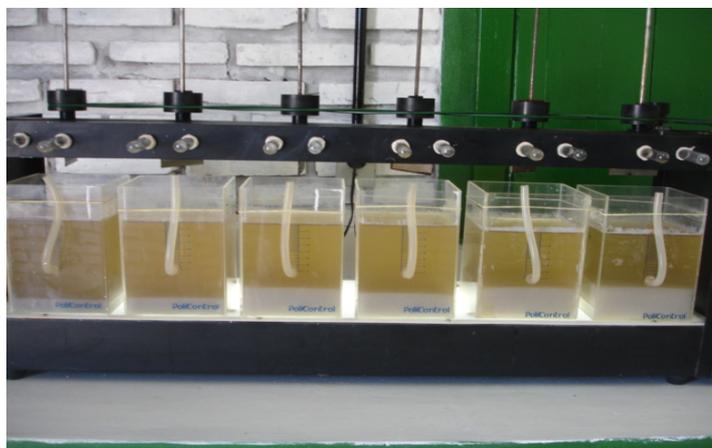


FIGURA 5.2 – Jarteste com Sulfato de Alumínio.



FIGURA 5.3 – Jarreste com Hidroxicloreto de Alumínio.

Nas Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 pode-se observar, além do aspecto escuro do efluente com o uso do Cloreto Férrico, a formação de lodo nos jarros. O Sulfato de Alumínio apresenta um lodo com aspecto mais denso.

Os dados resultantes de todos os ensaios para determinação da melhor dosagem do coagulante encontram-se no Apêndice A, desse trabalho.

5.2. Determinação do melhor pH de atuação dos coagulantes

5.2.1. Caracterização do efluente bruto

Nessa segunda etapa dos ensaios, onde se determinou o melhor pH de atuação de cada coagulante, foram monitorados além dos parâmetros dos ensaios anteriores, os parâmetros de Ferro, Alumínio, Cromo, Fosfato, Sulfeto, Amônia, NTK, Cloretos e Sólidos totais. O efluente bruto que foi estudado no dia em que se determinou o melhor pH de atuação de cada coagulante apresentou as características conforme mostra a Tabela 5.3.

No segundo dia de testes, fazendo-se a coleta do efluente através da coluna de sedimentação, pode-se confirmar a importância de um sistema de sedimentação antes do processo de coagulação/floculação, com uma redução de 99,9% de remoção de sólidos sedimentáveis.

TABELA 5.3 – Caracterização do efluente bruto utilizado nos ensaios para determinar a melhor faixa de pH.

Amostra	T	pH	AL	DQO	TU	Fe	Al	Cr	PO ₄ ³⁻	SO ₃ ²⁻	NH ₃	NTK	Cl ⁻	ST	Lodo
Bruto	40,5	8,34	5.297	24.476	19.700	12,03	20,73	405,26	171,4	55,9	2.744	4.117	4.699	39.274	650
Bruto 45'	39,5	8,30	1.766	3.274	1.465	1,57	4,54	21,54	52,4	47,0	2.604	2.900	4.425	25.278	0,5
Eficiência Remoção (%)	-	-	67	87	93	87	78	95	69	16	5	30	6	36	99,9

Observação: O efluente apresentava grande quantidade de sólidos sedimentáveis, mas de fácil sedimentação.

Legenda: T = temperatura (°C), AL = alcalinidade (mgCaCO₃.L⁻¹); DQO (mg.L⁻¹); TU = turbidez (UNT), Fe (mg.L⁻¹); Al (mg.L⁻¹); Cr (mg.L⁻¹); PO₄³⁻ (mg.L⁻¹); SO₃²⁻ (mg.L⁻¹); NH₃ (mg.L⁻¹); NTK (mg.L⁻¹); Cl⁻ (mg.L⁻¹); ST = sólidos totais (mg.L⁻¹); Lodo = lodo do cone Imhoff (mL.L⁻¹).

Com exceção dos parâmetros amônia e cloretos, com 5% e 6% de eficiência de remoção, respectivamente, todos os outros parâmetros tiveram uma boa eficiência de remoção, destacando-se a turbidez e o cromo, com 93% e 95% de eficiência de remoção, respectivamente.

A eficiência de remoção obtida com a coleta do efluente após 45 minutos de sedimentação na coluna, foi de grande importância para a realização do jarteste, pois a coleta do efluente diretamente no homogeneizador, impossibilitava a realização dos testes em jarros, devido ao grande volume de sólidos sedimentáveis, dificultando a coleta do clarificado. E, também, para o processo de coagulação/floculação em linha de produção, pois os três decantadores existentes estão trabalhando com tempo de retenção reduzido, devido o excesso de lodo que começa a flotar.

5.2.2. Monitoramento dos clarificados obtidos

Determinadas previamente as dosagens com melhor eficiência de remoção, aplicou-se essas dosagens pré-determinadas de cada coagulante variando-se o pH.

Avaliando-se os resultados obtidos da atuação dos coagulantes com diferentes pHs, optou-se por trabalhar com o pH do efluente bruto, não havendo necessidade de correção de pH, facilitando muito a parte operacional e os gastos em linha de produção. Pois, como o curtume trabalha com ciclos de cromo e caleiro, não há variação brusca de pH, ficando em torno de 8,0, que atende a faixa de atuação dos três coagulantes testados.

Pode-se observar que o clarificado do Sulfato de Alumínio é o que apresenta o pH mais baixo, seguido do Cloreto Férrico e por último o Hidroxicloreto de Alumínio, situação observada também na etapa dos primeiros ensaios. A Tabela 5.4 mostra os resultados obtidos em jarreste, sem correção do pH do efluente bruto e a Figura 5.4 apresenta os resultados obtidos para determinação do melhor pH.

TABELA 5.4 – Resultados dos clarificados obtidos em jarreste para o pH escolhido.

Coag.	Dos.	Ajuste de pH	pH inicial/final	DQO	TU	Fe	Al	Cr	PO ₄ ³⁻	SO ₃ ²⁻	NH ₃	NTK	Cl ⁻	ST	Vol. lodo
(1)	1,5	-	8,30/ 8,12	2.509	1.116	1,51	0,39	1,18	45,2	10,3	2.464	2.729	3.259	19.372	123
(2)	1,5	-	8,30/ 8,04	2350	780	0,41	1,66	1,12	40,8	7,96	2.462	2.590	3.636	20.004	198
(3)	0,9	-	8,30/ 8,17	1.437	770	0,45	1,23	1,08	45,2	9,51	2.477	2.666	3.773	20.550	187

Legenda: Coag. = coagulante utilizado; (1) = Cloreto Férrico; (2) = Sulfato de Alumínio; (3) = Hidroxicloreto de Alumínio; Dos. = dosagem do coagulante (g.2L⁻¹); DQO (mg.L⁻¹); TU = turbidez (UNT); Fe (mg.L⁻¹); Al (mg.L⁻¹); Cr (mg.L⁻¹); PO₄³⁻ (mg.L⁻¹); SO₃²⁻ (mg.L⁻¹); NH₃ (mg.L⁻¹); NTK (mg.L⁻¹); Cl⁻ (mg.L⁻¹); ST = sólidos totais (mg.L⁻¹); Vol. lodo = volume do lodo do jarro (mL).

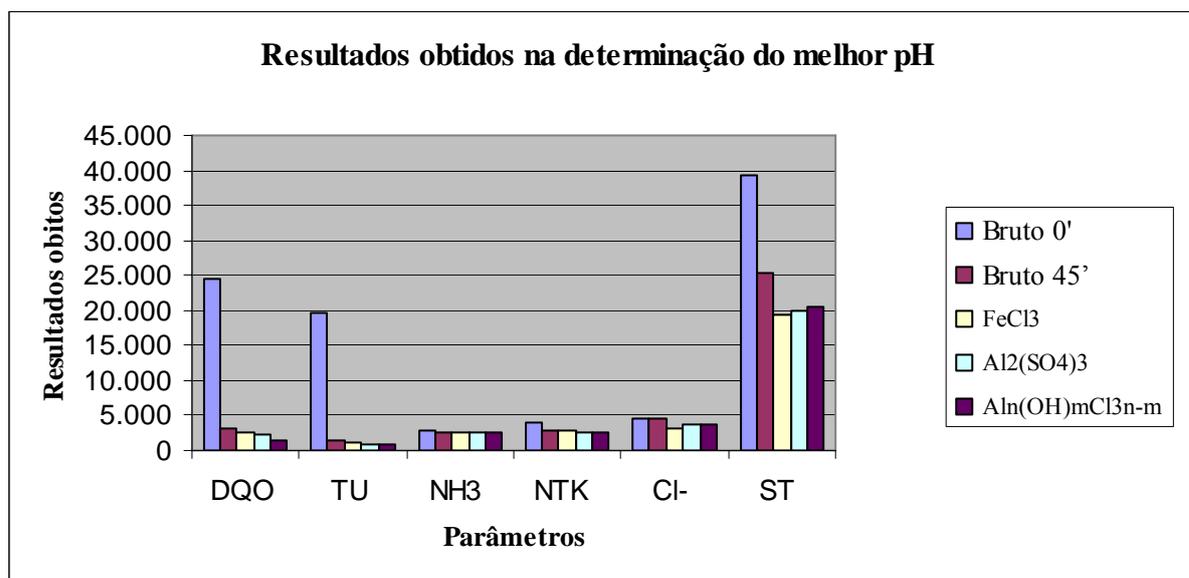


FIGURA 5.4 – Comparação dos resultados obtidos para o pH escolhido.

Quanto a remoção de DQO, o coagulante que apresentou melhor eficiência de remoção foi o Hidroxicloreto de Alumínio, seguido do Sulfato de Alumínio e do Cloreto Férrico, com 56%, 28,2% e 23,4%, respectivamente.

A turbidez também obedeceu a mesma seqüência de eficiência da DQO; o coagulante que apresentou melhor resultado foi o Hidroxicloreto de Alumínio (770 UNT), seguido do Sulfato de Alumínio (780 UNT) e do Cloreto Férrico (1.116 UNT).

O volume de lodo gerado nos jarros para cada 2 litros de efluente bruto, foi maior para o Sulfato de Alumínio – 198mL, seguido pelo Hidroxicloreto de Alumínio – 187mL e pelo Cloreto Férrico – 123mL, situação encontrada nos testes anteriores, quando se determinou a melhor dosagem dos coagulantes.

O Cloreto Férrico, como era de se esperar, apresentou a maior concentração de Ferro – 1,51mg.L⁻¹, e o Sulfato de Alumínio e Hidroxicloreto de Alumínio maior concentração de Alumínio, com 1,66mg.L⁻¹ e 1,23mg.L⁻¹, respectivamente, o que também era de se esperar tratando-se de coagulantes a base de Alumínio.

Os dados resultantes de todos os ensaios para determinação de cada coagulante em diferentes faixas de pH, encontram-se no Apêndice B desse trabalho.

5.3. Determinação da melhor dosagem do auxiliar de floculação

5.3.1. Caracterização do efluente bruto

Depois de determinada a melhor dosagem de cada coagulante, e o pH de melhor atuação dos mesmos, testou-se a eficiência de remoção dos mesmos parâmetros monitorados anteriormente, com um auxiliar de floculação, um polímero aniônico de alto peso molecular. Manteve-se as dosagens pré-determinadas dos coagulantes e o pH do efluente bruto, e variou-se as dosagens do polímero, repetindo as dosagens para os três coagulantes. A Tabela 5.5 apresenta a caracterização do efluente bruto usado nos ensaios.

TABELA 5.5 – Caracterização do efluente bruto.

Amostra	T	pH	AL	DQO	TU	Fe	Al	Cr	PO ₄ ³⁻	SO ₃ ²⁻	NH ₃	NTK	Cl ⁻	ST	Lodo
Bruto	39,0	8,18	4.211	14.466	14.100	8,09	8,03	380,2	180,3	25,9	2.852	3.573	7.204	33.486	300
Bruto 45°	38,0	8,16	1.585	5.053	1.766	1,13	2,28	23,69	26,3	10,3	2.552	2.642	3.545	19782	35
Eficiência Remoção (%)	-	-	62	65	88	86	72	94	85	60	10	26	50	41	88

Observação: Efluente com menor volume de sólidos sedimentáveis, comparando com os efluentes brutos trabalhados nos ensaios anteriores.

Legenda: T = temperatura (°C), AL = alcalinidade (mgCaCO₃.L⁻¹); DQO (mg.L⁻¹); TU = turbidez (UNT), Fe (mg.L⁻¹); Al (mg.L⁻¹); Cr (mg.L⁻¹); PO₄³⁻ (mg.L⁻¹); SO₃²⁻ (mg.L⁻¹); NH₃ (mg.L⁻¹); NTK (mg.L⁻¹); Cl⁻ (mg.L⁻¹); ST = sólidos totais (mg.L⁻¹); Lodo = lodo do cone Imhoff (mL.L⁻¹).

Observando a Tabela 5.5, e comparando-se com a Tabela 5.3, verifica-se que com exceção de fosfato, amônia e cloretos, todos os outros parâmetros apresentaram uma concentração menor do que o efluente bruto estudado anteriormente, sem tempo de sedimentação na coluna. E que mesmo com um efluente bruto mais concentrado, a maioria dos parâmetros tiveram uma maior redução, depois de 45 minutos de sedimentação na coluna, no efluente dos ensaios anteriores. Verificou-se, também, uma quantidade de lodo, no cone Imhoff, bem menor do que no efluente estudado anteriormente.

Mais uma vez, a eficiência de remoção com o uso da coluna de sedimentação apresentou resultados muito positivos, sendo que todos os parâmetros tiveram uma redução considerável, chamando a atenção para a eficiência de remoção de amônia e cloretos, 10% e 51% de eficiência, respectivamente. Os trabalhos da segunda etapa dos testes apresentaram remoção bem menor, 5% e 6% respectivamente.

As diferenças de concentração encontradas nos parâmetros monitorados dos três efluentes brutos estudados, é devido aos fluxos constantes de banhos da produção que seguem para Estação de Tratamento de Efluentes, com concentrações e volumes diferentes. Pois o principio do processo de produção é sempre o mesmo, mas pode mudar o número de peles processadas e concentrações de alguns produtos químicos utilizados, ou algum imprevisto que exija o esgotamento de algum banho de reciclo para o tratamento.

A maior concentração de cromo e sulfeto do efluente bruto realizados no segundo dia de ensaio, deve-se ao descarte de parte do banho do reciclo de cromo 2 (dois) fulões, e parte do banho do reciclo de caleiro, 1 (um) fulão, para a estação de tratamento que, conseqüentemente, influenciou diretamente no aumento de outros parâmetros como DQO, por exemplo.

5.3.2. Monitoramento dos clarificados obtidos

A Tabela 5.6 mostra os resultados obtidos com o jarteste para determinação da melhor dosagem do auxiliar de floculação.

Observando-se os resultados apresentados na Tabela 5.6, verifica-se que cada coagulante apresentou uma eficiência de remoção melhor em diferentes parâmetros:

- Cloreto Férrico – DQO, Alumínio e Sulfeto, e apresentou um menor volume de lodo, 153 mL para cada 2 litros de efluente tratado;
- Sulfato de Alumínio – fósforo, cloretos e sólidos totais, e apresentou maior volume de lodo, 172 mL para cada 2 litros de efluente bruto;
- Hidroxicloreto de Alumínio - Turbidez, ferro, Alumínio, cromo, amônia, NTK e o segundo menor volume de lodo, 160 mL para cada 2 litros de efluente bruto.

TABELA 5.6 – Resultado dos clarificados obtidos no jarreste.

Coag.	Dos.	pH final	Dos. P.	DQO	TU	Fe	Al	Cr	PO ₄ ³⁻	SO ₃ ²⁻	NH ₃	NTK	Cl ⁻	ST	Vol. lodo
(1)	1,5	8,09	0,02	3.964	409	27,16	0,33	1,56	15,56	2,49	2.372	2.612	3.773	27.640	153
(2)	1,5	8,05	0,02	4.083	401	0,56	1,11	1,11	15,55	9,51	2.462	2.672	3.018	26.058	172
(3)	0,9	8,10	0,02	4.048	312	0,41	1,06	1,03	16,35	11,08	2.217	2.567	3.807	27.628	160

Legenda: Coag. = coagulante utilizado; (1) = Cloreto Férrico; (2) = Sulfato de Alumínio; (3) = Hidroxicloreto de Alumínio; Dos. = dosagem do coagulante (g.2L⁻¹); Dos. P. = dosagem do polímero (g.2L⁻¹); DQO (mg.L⁻¹); TU = turbidez (UNT); Fe (mg.L⁻¹); Al (mg.L⁻¹); Cr (mg.L⁻¹); PO₄³⁻ (mg.L⁻¹); SO₃²⁻ (mg.L⁻¹); NH₃ (mg.L⁻¹); NTK (mg.L⁻¹); Cl⁻ (mg.L⁻¹); ST = sólidos totais (mg.L⁻¹); Vol. lodo = volume do lodo do jarro (mL).

A Tabela 5.7, mostra a eficiência de remoção obtida com cada coagulante nos parâmetros monitorados.

TABELA 5.7 – Eficiência de remoção dos coagulantes.

Coag.	EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO EM %										
	DQO	TU	Fe	Al	Cr	PO ₄ ³⁻	S ²⁻	NH ₃	NTK	Cl ⁻	ST
(1)	21	77	-	85	93	41	76	7	2	-	-
(2)	19	77	57	51	95	40	8	4	-	15	-
(3)	20	82	64	53	96	38	-	13	3	>7	-

Legenda: Coag. = coagulante utilizado; (1) = Cloreto Férrico; (2) = Sulfato de Alumínio; (3) = Hidroxicloreto de Alumínio; DQO (mg.L⁻¹); TU = turbidez (UNT); Fe (mg.L⁻¹); Al (mg.L⁻¹); Cr (mg.L⁻¹); PO₄³⁻ (mg.L⁻¹); SO₃²⁻ (mg.L⁻¹); NH₃ (mg.L⁻¹); NTK (mg.L⁻¹); Cl⁻ (mg.L⁻¹); ST = sólidos totais (mg.L⁻¹).

Verifica-se, na Tabela 5.7, que houve aumento de concentração em alguns parâmetros depois do processo de coagulação/floculação, como foi o caso de sólidos totais; que aumentou sua concentração com o uso dos três coagulantes, Cloreto Férrico e Hidroxicloreto de Alumínio aumentou em 28% a concentração, e com o Sulfato de Alumínio aumentou em 24%. O ferro aumentou em 95% com o uso do coagulante Cloreto Férrico; os cloretos aumentaram em 6% e 7% com o uso do Cloreto Férrico e hidroxicloreto de alumínio, respectivamente. O sulfeto aumentou em 7%, com o uso do hidroxicloreto de alumínio.

O parâmetro que teve uma maior remoção foi o cromo, sendo que com o uso do Hidroxicloreto de Alumínio obteve-se a remoção maior. A eficiência de remoção desse parâmetro foi de 93%, 95% e 96% com o uso do Cloreto Férrico, sulfato e alumínio e Hidroxicloreto de Alumínio, respectivamente. Os parâmetros que apresentaram menor remoção de concentração foram NTK e amônia seguido de cloretos, sendo que em alguns casos houve um acréscimo nas concentrações.

Os dados resultantes de todos os ensaios, para determinar o melhor coagulante com o auxiliar de floculação, para o efluente bruto do curtume INDUSPAN encontram-se no Apêndice C desse trabalho.

5.3.3. Curva de sedimentação

Com as amostras coletadas na coluna de sedimentação para a última batelada de ensaios com intervalos de tempo de 15 minutos em 15 minutos; no primeiro registro 1,4m abaixo do nível de efluente na coluna, foram realizados o monitoramento de sólidos sedimentáveis e de turbidez dessas amostras. A Tabela 5.8 mostra o sólidos sedimentáveis e a turbidez presentes e a porcentagem removida, e a velocidade de sedimentação das partículas para os tempo de 15, 30 e 45 minutos.

TABELA 5.8 – Dados obtidos com a coluna de sedimentação.

Profundidade	h1 = 1,40m Sólidos Sedimentáveis		h1 = 1,40m Turbidez		Velocidade de Sedimentação V = h/t (cm/s ⁻¹)
	Presente mL.L ⁻¹	Removida %	Presente UNT	Removida %	
t ₀ = 0 min	300	X ₀ = 0	14100	Y ₀ = 0	0
t ₁ = 15 min	100	X ₁₁ = 66	5740	Y ₁₁ = 59	0,15
t ₂ = 30 min	85	X ₂₁ = 72	4730	Y ₂₁ = 66	0,08
t ₃ = 45 min	35	X ₃₁ = 88	1766	Y ₃₁ = 87	0,05

Utilizando-se os dados da tabela 5.8, foi construída a Figura 5.4 para os controles de sólidos sedimentáveis e turbidez. A partir do valores da tabela 5.8, marca-se no par de eixos profundidade (m) x tempo (min) as porcentagens de sólidos sedimentáveis e turbidez removidas correspondentes. Para sólidos sedimentáveis - x₁₁ para t₁ e h₁; x₂₁ para t₂ e h₁ e x₃₁ para t₃ e h₁; para turbidez - y₁₁ para t₁ e h₁; y₂₁ para t₂ e h₁ e y₃₁ para t₃ e h₁. A altura

considerada é a mesma para todos os tempos, pois a coleta foi realizada somente na primeira altura, h_1 .

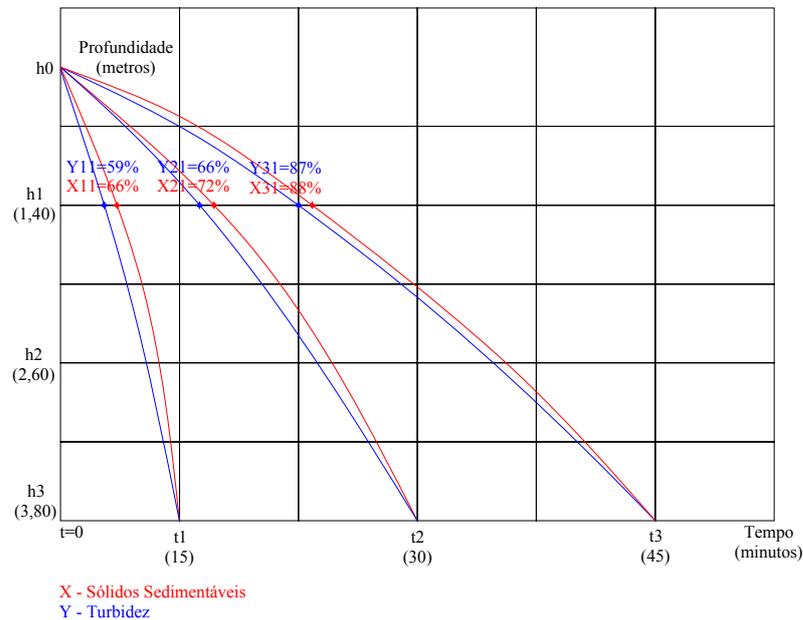


FIGURA 5.5 – Curva característica da remoção de sólidos sedimentáveis e turbidez.

Verifica-se na Figura 5.5 que na profundidade de 1,40m (tanto para a remoção de sólidos sedimentáveis quanto para remoção da turbidez), 66%, 72% e 88% dos sólidos sedimentáveis são removidos para os tempos de 15, 30 e 45 minutos respectivamente. E 59%, 66% e 87% da turbidez é removida para os tempos de 15, 30 e 45 minutos, respectivamente. Assim, para a profundidade fixada, sólidos com velocidade de sedimentação igual ou maior que $0,05 \text{ cm.s}^{-1}$ são 88% removidos. E que com essa mesma velocidade de sedimentação 87% da turbidez é removida.

5.4. Custos

Os custos dos coagulantes e do auxiliar de floculação da Tabela 5.9, foram fornecidos pelo setor de compras do curtume onde foram realizados os testes, e o custo por viagem de caminhão de lodo cobrado pela empresa que retira o lodo, para dispor como adubo orgânico, está na Tabela 5.10.

Além do custo dos produtos utilizados no processo de coagulação/floculação, deve-se considerar o custo de cada viagem do caminhão de lodo, para dispor esse resíduo como biossólido nas propriedades rurais próximas da indústria, que é de R\$55,00 por viagem.

TABELA 5.9 – Preços dos coagulantes e do auxiliar de floculação.

Descrição do Produto Posto Campo Grande/MS	Preço por Tonelada Mês ref. Setembro/2007	
	Reais – R\$	Dólar – US (*)
Cloreto Férrico	730	390
Sulfato de Alumínio	680	360
Hidroxiclureto de Alumínio	920	490
Polímero aniônico	13.160	7.000

Legenda: (*) Valor considerado para o dólar do dia 21/09/07 – R\$ 1,88

TABELA 5.10 – Terceirização de retirada de lodo.

Prestação Serviço	Quantidade/Viagem (kg)	Custo/Viagem (R\$)
Viagem Caminhão Lodo	7.200 kg	55,00

5.4.1. Avaliação de custos dos testes

A Tabela 5.11 mostra com base na dosagem do coagulante, do auxiliar de floculação e no volume de lodo gerado em cada um dos ensaios com essas dosagens, o custo em reais e em dólares, para tratar o volume de efluente de um dia produção.

TABELA 5.11 – Composição de custos para efluente bruto com turbidez de 1.766UNT e DQO de 5.053mg.L⁻¹.

Coagulante	Dosagem Coagulante (kg/dia)	Dosagem Polímero (kg/dia)	Número Viagem caminhão de Lodo	Custo total para 200 m ³ (Volume de um dia)	
				Reais – R\$	Dólar – US (*)
Cloreto Férrico	300 kg	4 kg	2,3	398,14	211,8
Sulfato alumínio	300 kg	4 kg	2,6	399,64	212,6
Hidróxicloreto de alumínio	180 kg	4 kg	2,4	350,24	186,3

Legenda: (*) Valor considerado para o dólar do dia 21/09/07 – R\$ 1,88

5.5. Análise dos custos

Avaliando-se os valores em reais com o uso dos três coagulantes, verifica-se que o Hidroxiclureto de Alumínio é o coagulante que apresenta menor custo, pois além de uma dosagem menor de coagulante, apresentou a segunda menor quantidade de lodo gerado, bem próximo do coagulante que obteve volume menor, que foi o Cloreto Férrico. O seu uso apresenta um valor de 12% mais barato do que com o uso dos outros dois coagulantes;

Cloreto Férrico e Sulfato de Alumínio, devido ao custo do Cloreto Férrico e do Sulfato de Alumínio ter sido bem próximo.

Atualmente, o curtume onde foi realizada essa pesquisa utiliza-se o Hidroxicloreto de Alumínio como coagulante, com uma dosagem 28% maior do que a dosagem considerada melhor nos testes desse trabalho. A quantidade de polímero utilizada em linha de produção é a mesma obtida nos ensaios. A eficiência de remoção de DQO e turbidez, 20% e 25% menores, respectivamente, do que com a eficiência considerada melhor nos ensaios em jarreste.

O volume de lodo produzido é 65% maior, mas deve-se considerar que nos ensaios foi utilizado o efluente após sedimentação na coluna de sedimentação, o que diminuiu muito a concentração de sólidos sedimentáveis no efluente bruto trabalhado. Também, existe uma dificuldade no processo de físico-químico, pois a quantidade de sólidos é muito grande e o tempo de retenção dos decantadores está insuficiente para decantação do volume de lodo produzido.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1. Conclusões

Neste trabalho de dissertação, chegou-se às seguintes conclusões:

- Em equipamento estático pode-se determinar, para um efluente qualquer, valores de pH e dosagem de coagulante e auxiliar de floculação, visando a otimização destes parâmetros;
- Pode-se conseguir uma grande economia no consumo de produtos químicos para o tratamento de efluente bruto, quando se estuda, com os coagulantes disponíveis, os intervalos de pH e a eficiência de remoção dos parâmetros desejados;
- Não há necessidade de correção de pH do efluente bruto estudado para o processo de coagulação e floculação;
- Com o uso da coluna de sedimentação, verificou-se a importância de um sistema de sedimentação de sólidos grosseiros antes do processo de coagulação/floculação, tanto para uma melhor eficiência do sistema, quanto para economia de consumo de produtos químicos;
- O Hidroxicloreto de Alumínio é o coagulante mais indicado para o tratamento físico-químico desse efluente, considerando-se a relação custo/benefício;
- A melhor dosagem do auxiliar de floculação é a mesma para todos os coagulantes utilizados, considerando-se a relação custo/benefício;
- Comparando os resultados obtidos dos coagulantes estudados verificou-se:
 - Nem sempre grandes dosagens proporcionarão uma grande remoção de poluentes;
 - Os parâmetros DQO e cromo, tiveram eficiência de remoção bem próximas para os três coagulantes, sendo que o parâmetro cromo foi o que teve maior remoção depois do processo coagulação/floculação para os três coagulantes;
 - O coagulante Cloreto Férrico é muito eficiente na remoção de sulfeto, mas aumenta a concentração de ferro no efluente;
 - A concentração de cloretos e sólidos totais aumentaram depois do processo de coagulação/floculação. Com exceção dos cloretos, que com o uso do Sulfato de Alumínio apresentou uma pequena eficiência de remoção.

6.2. Recomendações

No decorrer da pesquisa ocorreram dificuldades. Para apoio a futuros estudos que tenham alguma afinidade com este trabalho, seguem algumas recomendações a fim de evitar tais dificuldades:

- a) Na preparação das amostras deve-se atentar para o volume preparado, trabalhando com uma margem de segurança, para que posteriormente não haja falta de efluente de estudo impossibilitando, assim, a execução dos ensaios finais ou a necessidade de caracterização de mais de um efluente bruto por dia;
- b) Para comprovação dos dados otimizados obtidos em bancada, deve-se fazer uma reprodução dos mesmos em linha de produção, utilizando as mesmas dosagens, a fim de comprovar os resultados.

Para finalizar este trabalho, seguem alguns comentários:

- c) Cada ETE e cada efluente bruto possuem características ímpares, portanto, o melhor coagulante será aquele que atender as necessidades econômicas e de eficiência;
- d) O coagulante adquirido em forma de líquido fornece melhores condições de operação, simplificam o armazenamento, a diluição, e elimina alguns problemas de insalubridade para aquelas pessoas que manuseiam o produto, devendo, no entanto, ser considerada a distância do transporte que tem sua influência no custo do produto;
- e) Não corrigir o pH do efluente bruto facilita em muito a parte operacional e a segurança dos operadores, pois muitas vezes é necessário dosar algum tipo de ácido, e diminui consideravelmente os custos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADZET ADZET, J. M.; BALLESTER, B. J.; BUDO, S. J.M.; BUNYOL, N.X.; CLOTA, F. P.; GASSO, S. R.; GILI, B. X.; GRATACOS, M. E.; PALOMAS, S. J. M.; RODELLINO, E. L.; ROMERA, P. E.; SERRA, C. E.; SOLER, S. J. **Química-técnica de teneria**. Barcelona, Espanha: Romanya/valls, 1986.

ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de efluentes: tratamento e disposição final**. 6. ed. Belo Horizonte: DESA – UFMG, 2001.

APHA; AWWA; WPCF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22th ed. Washington: American Public Health Association, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10520**: Informação e documentação. Apresentação de citações em documentos. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12209**: Projeto de Estação de Tratamento de Efluente Sanitário. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12216**: Projeto de Estação de Tratamento de Água para Abastecimento Público. Rio de Janeiro, 1992.

BERNARDES, D.; ORDAKOWSKI, S. **Determinação de cromo hexavalente em couros**. Revista do Couro, Estância Velha – RS, n.174, p.80-81, ano XXX, dez. 2005.

CASEY, T. J. **Unit treatment processes in water and wastewater engineering**. 2. ed. Ireland: University College Dublin, 1993.

CENTURIONE, P. L.; DI BERNARDO, L. **Procedimento para execução de ensaios de flotação/filtração em equipamento de bancada**. Engenharia Sanitária e Ambiental. v.08, n.01, p. 39-44, jan/mar 2003 e n.02, abr/jun 2003.

CLAAS, I. C; MAIA, R. A. M. **Manual básico de resíduos industriais de curtume**. 1. ed. Porto Alegre: SENAI/RS, 1994.

DI BERNARDO, L. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. v.1. Rio de Janeiro: ABES, 1993.

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

DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO, A.; CENTURIONE FILHO, P. L. **Ensaio de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: RIMA, 2002.

FREITAS, E. A. **Estudo comparativo das características do couro e efluente bruto de processo de curtimento convencional versus processo com reciclagem direta de banho de curtimento**. Campo Grande. 2007. 48f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

FREITAS, T. C. M.; MELNIKOV, P. **O uso e os impactos da reciclagem de cromo em indústrias de curtume em Mato Grosso do Sul, Brasil.** Engenharia Sanitária e Ambiental. v.11, n.04, out/dez 2006, p. 305-310.

GERHARD, J. **Possibles fallas em el cuero y en su producion.** Trad. Sagrario y Gerd John. 1. ed. Hembsbach, Alemanha: Partner Rübelmann Gmbh, 1998.

GOMES, M. R.; IDE, C. N.; RIBEIRO, M. L.; BEAL, L. L.; FREITAS, E. A. **Avaliação da eficiência do sistema de tratamento de efluentes de ribeira por lodos ativados.** In: 24º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2007, Belo Horizonte. **Anais...**Belo Horizonte: ABES, 2007. p.

GONÇALVES, E.; TEIXEIRA, R. C.; **Principais tendências na tecnologia de processamento do couro.** Revista do Couro, Estância Velha – RS, n.185, p.70, ano XXXI, ago/set. 2006.

GUTTERRES, M.; OSÓRIO, T. S. **Métodos analíticos especiais aplicados ao couro.** Revista do Couro, Estância Velha – RS, n. 173, p. 84, ano XXX, dez. 2004.

HOINACKI, E. **Peles e couros.** 2. ed. Porto Alegre: SENAI RS, 1989.

IMHOFF, K. K. R. **Manual de tratamento de águas residuárias.** 4. ed. São Paulo - Edgard Blücher, 1996.

INDUSPAN, Indústria e Comércio de Couros do Pantanal LTDA. Laboratório de controle de qualidade interno (2003).

INSTITUTO FNP. Anualpec 2006: Anuário da pecuária brasileira. São Paulo - SP, 2006.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de efluentes domésticos.** 3. ed. Rio de Janeiro: ABES, 1995. 720 p

KLEIN, A. **Curtume – ecológico por natureza.** Revista do Couro, Estância Velha – RS, n.152, p.30, ano. XXIV, nov/dez. 2001.

KLEIN, A. **Projeto de incineração de resíduos de couro.** Revista do Couro, Estância Velha – RS, n.159, p.41, ano XXV, dez. 2002.

MACÊDO, J. A. B. Métodos laboratoriais de análises físico-químicas e microbiológicas. 2. ed. Belo Horizonte – MG. CRQ-MG, 2003.

MEDEIROS, O. M.; LADCHUMANANANDASIVAM, R.; MARINHO, G.; ESTRELA, G. Q. **O caminho dos descaminhos do resíduo industrial.** Revista do Couro, Estância Velha, n.174, p.70-72, ano XXX, jan/fev. 2005.

METCALF & EDDY. Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse/Metcalf & Eddy, Inc. – 3rd ed./revised by George Tchobanoglous, Frank Burton, 1979.

MOTA, S. **Introdução à engenharia ambiental**. 3. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2003.

OLIVEIRA, L. T.; SILVA, J. B.; DO VAL, L. A. A.; SALVETTI, A. R.; IDE, C. N. **Características físico-mecânicas de corpos de prova cerâmicos moldados com adição de lodo de reciclo de cromo**. In: 24º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2007, Belo Horizonte. **Anais...**Belo Horizonte: ABES, 2007.

PAGE, C. **Understanding clean technology**. *Leather International*, v.207, n.4753, p.17-23, march. 2005.

PALOP, R. **Redução da salinidade nos processos de piqué e curtimento**. *Revista do Couro, Estância Velha – RS*, n.167, p.50-61, ano XXIX, mar/abr. 2004.

PAN-AMERICANA S.A. INDÚSTRIAS QUÍMICAS. **Apostila técnica de produtos químicos**. Rio de Janeiro, 2005.

PAVANELLI, G. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada**. São Carlos. 2001. 108f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade do Estado de São Paulo, São Carlos.

PFEIFER, R; SILVA, J.P; LEIHS, P. **Processo de ribeira alternativo de baixo impacto ambiental para couros hidrofugados**. *Revista do Couro, Estância Velha – RS*, n.152, p.44-46, ano XXIV, nov/dez. 2001.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE. **Química del agua: Potabilización de aguas naturales**. 1ª Enseñanza media (notas de aula). Disponível em <http://www.puc.cl/quimica/agua/potabiliz.htm> Acesso em: 16 de outubro de 2007.

PRADOS, N. L.; LUCCA R. M. D.; RESENDE, S. E. **Eficiência na produção de couros com tecnologia limpas**. *Revista do Couro, Estância Velha – RS*, n.156, p. 46-50, ano XXV, jun/jul. 2002a.

PRADOS, N. L.; LUCCA R. M. D.; RESENDE, S. E. **Eficiência na produção com tecnologia limpa**. *Revista do Couro, Estância Velha – RS*, n.155, p.50-57, ano XXV, mai. 2002b.

RIBEIRO, M. L.; IDE, C. N.; DE LUCA, S. J.; DE LUCA, M. A. **Potencialidades dos Processos de separação por membranas no tratamento de efluentes aquosos da indústria de couro**. 2002.

SANTOS, H. R. **Aplicação de coagulantes no afluente de reator anaeróbio de leito expandido alimentado com efluente sanitário**. São Carlos. 2001. 76f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade do Estado de São Paulo, São Carlos.

SHELTON, T.B. **Interpreting drinking water quality analysis what do the numbers mean? Rutgers Cooperative Extension**. 5. ed. 1996.

SINDICOUROS. Sindicato das indústrias de Curtumes do Estado de Mato Grosso do Sul, 2005.

SOARES, D.; HERMANN, E.; MARTINS, T. **PROTECH – tecnologia do processo de cromo**. Revista do Couro, Estância Velha – RS, n.165, p.60-63, ano XXVI, out/nov. 2003.

TANQUÍMICA IND. & COM. LTDA. **Tecnologia em couro – estudo sobre o processo de caleiro**. Revista do Couro, Estância Velha – RS, n.167, p.62-70, ano XXIX, mar/abr. 2004.

TEIXEIRA, R. C.; BERGMANN, C. P. **Estudo sobre o aproveitamento de serragem de couros curtidos ao cromo na indústria cerâmica**. Revista do Couro, Estância Velha – RS, n.149, p.52-55, ano XXIV, jun/jul. 2001.

VOGEL, A. I. **Química analítica qualitativa**. 5. ed. São Paulo: Mestre Jou, 1981.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2. ed. Belo Horizonte: DESA – UFMG, 1996.

VON SPERLING, M. **Princípios básicos do tratamento de esgotos**. v. 2. 1. ed. Belo Horizonte: DESA – UFMG, 1996.

APÊNDICE A

Ensaio Jarreste – data: 10/05/07.

TABELA A.1 – Caracterização do efluente bruto.

Amostra	T	pH	AL	DQO	TU	Lodo
Bruto	35,5	7,69	3214	18115	1.680	250
Bruto 15'	-	-	-	-	834	-
Bruto 30'	-	-	-	-	569	-
Bruto 45'	35,0	7,74	1290	5644	526	12

Legenda: T = temperatura (°C); AL = alcalinidade (mgCaCO₃.L⁻¹); DQO (mg.L⁻¹); TU = turbidez (UNT); Lodo = lodo do cone Imhoff (mL.L⁻¹).

TABELA A.2 – Resultados do teste com coagulante Cloreto Férrico 21%.

Amostra	Dos.	pH final	DQO	TU	Vol. lodo
Jarro 1	0,3	7,65	3715	150	14
Jarro 2	0,6	7,46	3019	134	57
Jarro 3	0,9	7,35	3483	123	86
Jarro 4	1,2	7,27	4412	108	115
Jarro 5	1,5	7,19	2590	114	150
Jarro 6	1,8	7,07	3251	102	230

Legenda: Dos. = dosagem do coagulante (g.2L⁻¹); DQO (mg.L⁻¹); TU = turbidez (UNT); Vol. lodo = volume do lodo do jarro (mL).

TABELA A.3 – Resultados do teste com coagulante Sulfato de Alumínio 18%.

Amostra	Dos.	pH final	DQO	TU	Vol. lodo
Jarro 1	0,3	7,56	3715	123	16
Jarro 2	0,6	7,48	3251	91,3	100
Jarro 3	0,9	7,39	3015	79	143
Jarro 4	1,2	7,29	3483	64,7	175
Jarro 5	1,5	7,18	2648	63	185
Jarro 6	1,8	7,13	4644	44,6	240

Legenda: Dos. = dosagem do coagulante (g.2L⁻¹); DQO (mg.L⁻¹); TU = turbidez (UNT); Vol. lodo = volume do lodo do jarro (mL).

TABELA A.4 – Resultados do teste com coagulante Hidroxicloreto de Alumínio 18%.

Amostra	Dos.	pH final	DQO	TU	Vol. lodo
Jarro 1	0,3	7,68	3851	180	43
Jarro 2	0,6	7,65	3386	85	115
Jarro 3	0,9	7,6	2445	76	155
Jarro 4	1,2	7,5	3569	76	187
Jarro 5	1,5	7,47	2990	72	201
Jarro 6	1,8	7,42	4345	82	215

Legenda: Dos. = dosagem do coagulante (g.2L⁻¹); DQO (mg.L⁻¹); TU = turbidez (UNT); Vol. lodo = volume do lodo do jarro (mL).

APÊNDICE B

Ensaio Jarreste – data: 14/05/07.

TABELA B.1 – Caracterização do efluente bruto.

Amostra	T	pH	AL	DQO	TU	Fe	Al	Cr	PO ₄ ³⁻	SO ₃ ²⁻	NH ₃	NTK	Cl ⁻	ST	Lodo
Bruto	40,5	8,34	5297	24476	19700	12,03	20,73	405,26	171,4	55,9	2744	4117	4699	39274	650
Bruto 15'	-	8,34	2105	10528	4590	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bruto 30'	-	8,3	1720	5852	2925	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bruto 45'	39,5	8,3	1766	3274	1465	1,57	4,54	21,54	52,4	47,0	2604	2900	4425	25278	<0,5

Legenda: T = temperatura (°C); AL = alcalinidade (mgCaCO₃.L⁻¹); DQO (mg.L⁻¹); TU = turbidez (UNT); Fe (mg.L⁻¹); Al (mg.L⁻¹); Cr (mg.L⁻¹); PO₄³⁻ (mg.L⁻¹); SO₃²⁻ (mg.L⁻¹); NH₃ (mg.L⁻¹); NTK (mg.L⁻¹); Cl⁻ (mg.L⁻¹); ST = sólidos totais (mg.L⁻¹); Lodo do cone Imhoff (mL.L⁻¹).

TABELA B.2 – Resultados do teste com coagulante Cloreto Férrico 21% e ajuste de pH (cal/ácido).

Amostra	Dos.	Ajuste pH	pH inicial/ pH final	DQO	TU	Fe	Al	Cr	PO ₄ ³⁻	SO ₃ ²⁻	NH ₃	NTK	Cl ⁻	Vol. lodo	ST
Jarro 1	1,5		8,30/8,12	2509	1116	1,51	0,39	1,18	45,2	10,3	2464	2729	3259	123	19372
Jarro 2	1,5	2 mL ácido	7,0/6,95	2516	840	3,26	0,42	1,22	37,7	7,67	2463	2651	3293	158	21082
Jarro 3	1,5	1,6 mL ácido	7,5/7,23	2903	848	2,18	0,39	1,15	24,5	5,81	2432	2729	3361	158	23962
Jarro 4	1,5	0,5 mL ácido	8,0/7,88	3096	966	1,31	0,41	1,35	39,55	5,6	2479	2744	3464	115	21088
Jarro 5	1,5	7,5 g de cal	9,0/8,83	2322	857	0,66	0,46	0,83	28,75	10,3	2177	2292	3327	172	22268
Jarro 6	1,5	15 g de cal	9,5/9,3	3677	860	0,5	0,44	0,67	17,2	7,96	2282	2432	3396	187	19976

Legenda: Dos. = dosagem do coagulante (g.2L⁻¹); DQO (mg.L⁻¹); TU = turbidez (UNT); Fe (mg.L⁻¹); Al (mg.L⁻¹); Cr (mg.L⁻¹); PO₄³⁻ (mg.L⁻¹); SO₃²⁻ (mg.L⁻¹); NH₃ (mg.L⁻¹); NTK (mg.L⁻¹); Cl⁻ (mg.L⁻¹); Vol. lodo = volume do lodo do jarro (mL); ST = sólidos totais (mg.L⁻¹).

TABELA B.3 – Resultados do teste com coagulante Sulfato de Alumínio 18% e ajuste de pH (cal/ácido).

Amostra	Dos.	Ajuste pH	pH inicial/ pH final	DQO	TU	Fe	Al	Cr	PO ₄ ³⁻	SO ₃ ²⁻	NH ₃	NTK	Cl ⁻	Vol. lodo	ST
Jarro 1	1,5		8,30/8,04	2350	780	0,41	1,66	1,12	40,8	7,96	2462	2550	3636	198	20004
Jarro 2	1,5	2 mL ácido	7,0/7,03	2422	785	0,49	0,95	1,25	20,3	8,73	2417	2698	3499	330	17098
Jarro 3	1,5	1,6 mL ácido	7,49/7,32	2322	525	0,59	1,79	1,15	27,8	8,74	2432	2682	3567	258	22048
Jarro 4	1,5	0,5 mL ácido	8,0/7,85	2440	604	0,63	1,63	1,27	44,8	8,76	2462	2582	3602	215	21754
Jarro 5	1,5	7,5 g de cal	9,0/8,7	2180	1186	0,31	8,06	0,57	39,2	9,52	2221	2464	3773	160	21946
Jarro 6	1,5	15 g de cal	9,52/9,5	2165	1195	0,4	8,73	0,99	35,1	8,74	2327	2597	3739	172	22074

Legenda: Dos. = dosagem do coagulante (g.2L⁻¹); DQO (mg.L⁻¹); TU = turbidez (UNT); Fe (mg.L⁻¹); Al (mg.L⁻¹); Cr (mg.L⁻¹); PO₄³⁻ (mg.L⁻¹); SO₃²⁻ (mg.L⁻¹); NH₃ (mg.L⁻¹); NTK (mg.L⁻¹); Cl⁻ (mg.L⁻¹); Vol. lodo = volume do lodo do jarro (mL); ST = sólidos totais (mg.L⁻¹).

TABELA B.4 – Resultados do teste com coagulante Hidroxicloreto de Alumínio 18% e ajuste de pH (cal/ácido).

Amostra	Dos.	Ajuste pH	pH inicial/ pH final	DQO	TU	Fe	Al	Cr	PO ₄ ³⁻	SO ₃ ²⁻	NH ₃	NTK	Cl ⁻	Vol. lodo	ST
Jarro 1	0,9		8,30/8,17	1437	770	0,45	1,23	1,08	45,2	7,98	2477	2666	3773	187	20550
Jarro 2	0,9	2 mL ácido	7,0/6,98	1307	780	0,47	1,19	1,01	37,7	7,96	2387	2588	3670	290	21700
Jarro 3	0,9	1,6 mL ácido	7,5/7,30	1362	956	0,47	1,01	1,01	24,5	7,17	2462	2682	3602	293	21230
Jarro 4	0,9	0,5 mL ácido	8,0/7,79	1447	958	0,48	1,82	1,2	39,55	6,4	2537	2713	3567	280	21268
Jarro 5	0,9	7,5 g de cal	9,0/8,9	1265	1508	0,49	9,65	1,19	28,75	9,51	2492	2612	3704	160	19272
Jarro 6	0,9	15 g de cal	9,5/9,47	1165	1174	0,34	17,32	0,77	17,2	9,55	2447	2642	3739	165	17982

Legenda: Dos. = dosagem do coagulante (g.2L⁻¹); DQO (mg.L⁻¹); TU = turbidez (UNT); Fe (mg.L⁻¹); Al (mg.L⁻¹); Cr (mg.L⁻¹); PO₄³⁻ (mg.L⁻¹); SO₃²⁻ (mg.L⁻¹); NH₃ (mg.L⁻¹); NTK (mg.L⁻¹); Cl⁻ (mg.L⁻¹); Vol. lodo = volume do lodo do jarro (mL); ST = sólidos totais (mg.L⁻¹).

APÊNDICE C

Ensaio Jarreste – data: 16/05/07.

TABELA C.1 – Caracterização do efluente bruto.

Amostra	T	pH	AL	DQO	TU	Fe	Al	Cr	PO ₄ ³⁻	SO ₃ ²⁻	NH ₃	NTK	Cl ⁻	ST	Lodo
Bruto	39°C	8,18	4211	14466	14100	8,09	8,03	380,82	180,3	25,9	2852	3573	7204	33486	300
Bruto 15'	39°C	8,17	1472	6995	5740	4,69	5,74	256,94	69,9	20,7	2672	3122	3979	22480	100
Bruto 30'	38,5°C	8,16	2151	6682	4730	3,68	5,02	197,08	33,1	9,7	2582	2792	3876	21983	85
Bruto 45'	38,0°C	8,16	1585	5053	1766	1,13	2,28	23,69	26,3	10,3	2552	2642	3545	19782	35

Legenda: T = temperatura (°C); AL = alcalinidade (mgCaCO₃.L⁻¹); DQO (mg.L⁻¹); TU = turbidez (UNT); Fe (mg.L⁻¹); Al (mg.L⁻¹); Cr (mg.L⁻¹); PO₄³⁻ (mg.L⁻¹); SO₃²⁻ (mg.L⁻¹); NH₃ (mg.L⁻¹); NTK (mg.L⁻¹); Cl⁻ (mg.L⁻¹); ST = sólidos totais (mg.L⁻¹); Lodo do cone Imhoff (mL.L⁻¹).

TABELA C.2 – Resultados do teste com coagulante Cloreto Férrico 21%, com auxiliar de floculação.

Amostra	Dos.	pH inicial/ pH final	Dos. P	DQO	TU	Fe	Al	Cr	PO ₄ ³⁻	SO ₃ ²⁻	NH ₃	NTK	Cl ⁻	ST	Vol. lodo
Jarro 1	1,5	8,16\8,09	0,02	3964	409	27,16	0,33	1,56	15,56	2,49	2372	2612	3773	27640	153
Jarro 2	1,5	8,16\8,08	0,04	4331	426	28,3	0,23	1,66	18,07	3,27	2432	2627	3842	18968	100
Jarro 3	1,5	8,16\8,07	0,06	4249	411	26,86	0,22	1,59	17,48	4,06	2417	2597	3704	21522	86
Jarro 4	1,5	8,16\8,07	0,08	4390	409	26,96	0,21	1,56	17,22	3,27	2432	2612	3739	19512	71
Jarro 5	1,5	8,16\8,07	0,10	4264	426	26,63	0,28	1,82	16,35	4,83	2402	2597	3704	18170	86
Jarro 6	1,5	8,16\8,08	0,12	4100	449	25,15	0,2	1,64	16,07	2,5	2417	2582	3670	19956	86

Legenda: Dos. = dosagem do coagulante (g.2L⁻¹); Dos. P. = dosagem do polímero (g.2L⁻¹); DQO (mg.L⁻¹); TU = turbidez (UNT); Fe (mg.L⁻¹); Al (mg.L⁻¹); Cr (mg.L⁻¹); PO₄³⁻ (mg.L⁻¹); SO₃²⁻ (mg.L⁻¹); NH₃ (mg.L⁻¹); NTK (mg.L⁻¹); Cl⁻ (mg.L⁻¹); ST = sólidos totais (mg.L⁻¹); Vol. lodo = volume do lodo do jarro (mL).

TABELA C.3 – Resultados do teste com coagulante Sulfato de Alumínio 18%, com auxiliar de floculação.

Amostra	Dos.	pH inicial/ pH final	Dos. P	DQO	TU	Fe	Al	Cr	PO ₄ ³⁻	SO ₃ ²⁻	NH ₃	NTK	Cl ⁻	ST	Vol. lodo
Jarro 1	1,5	8,16/8,05	0,02	4083	401	0,56	1,11	1,11	15,55	9,51	2462	2672	3018	26058	172
Jarro 2	1,5	8,16/8,00	0,04	4561	404	0,48	1,11	0,95	19,75	12,04	2432	2612	2710	26206	187
Jarro 3	1,5	8,16/8,04	0,06	4338	408	0,24	1,05	0,89	17,15	11,86	2447	2597	3293	23484	187
Jarro 4	1,5	8,16/8,05	0,08	4245	431	0,54	1,32	0,99	16,85	11,08	2447	2627	3362	28404	172
Jarro 5	1,5	8,16/8,01	0,10	4160	416	0,6	1,09	1,06	11,2	10,3	2432	2627	3156	23960	172
Jarro 6	1,5	8,16/8,00	0,12	4362	387	0,48	1,12	1,05	17,0	13,7	2417	2612	3190	28288	172

Legenda: Dos. = dosagem do coagulante (g.2L⁻¹); Dos. P. = dosagem do polímero (g.2L⁻¹); DQO (mg.L⁻¹); TU = turbidez (UNT); Fe (mg.L⁻¹); Al (mg.L⁻¹); Cr (mg.L⁻¹); PO₄³⁻ (mg.L⁻¹); SO₃²⁻ (mg.L⁻¹); NH₃ (mg.L⁻¹); NTK (mg.L⁻¹); Cl⁻ (mg.L⁻¹); ST = sólidos totais (mg.L⁻¹); Vol. lodo = volume do lodo do jarro (mL).

TABELA C.4 – Resultados do teste com coagulante Hidroxicloreto de Alumínio 18%, com auxiliar de floculação.

Amostra	Dos.	pH	Dos. P	DQO	TU	Fe	Al	Cr	PO ₄ ³⁻	SO ₃ ²⁻	NH ₃	NTK	Cl ⁻	ST	Vol. lodo
Jarro 1	0,9	8,16/7,92	0,02	4048	312	0,41	1,06	1,03	16,35	11,08	2217	2567	3807	27628	160
Jarro 2	0,9	8,16/7,99	0,04	4230	335	0,37	1,07	1,15	18,7	11,86	2231	2582	3739	26110	175
Jarro 3	0,9	8,16/7,99	0,06	4029	343	0,41	0,91	1,03	12,5	11,86	2189	2597	3773	27040	180
Jarro 4	0,9	8,16/8,00	0,08	4183	325	0,51	0,89	1,01	18,4	11,86	2274	2552	3739	27128	180
Jarro 5	0,9	8,16/8,01	0,10	4137	355	0,47	0,92	0,91	15,1	11,86	2007	2582	3704	22702	185
Jarro 6	0,9	8,16/8,01	0,12	3990	363	0,53	0,91	1,04	12,05	11,08	2274	2642	3670	22432	185

Legenda: Dos. = dosagem do coagulante (g.2L⁻¹); Dos. P. = dosagem do polímero (g.2L⁻¹); DQO (mg.L⁻¹); TU = turbidez (UNT); Fe (mg.L⁻¹); Al (mg.L⁻¹); Cr (mg.L⁻¹); PO₄³⁻ (mg.L⁻¹); SO₃²⁻ (mg.L⁻¹); NH₃ (mg.L⁻¹); NTK (mg.L⁻¹); Cl⁻ (mg.L⁻¹); ST = sólidos totais (mg.L⁻¹); Vol. lodo = volume do lodo do jarro (mL).