



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



Desempenho de coagulantes combinados para tratamento de efluentes de curtume

Autor: Fredy Zimpel

Orientador: Mariliz Gutterres Soares

Porto Alegre, julho de 13

Sumário

Sumário	ii
Agradecimentos	iii
Resumo	iv
Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vi
Lista de Símbolos	vii
Lista de Abreviaturas e Siglas	viii
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	3
2.1 Característica do efluente bruto	3
2.2 Tratamento físico-químico de efluentes	4
2.3 Análise dos Efluentes Líquidos	5
2.3.1 Demanda Química de Oxigênio (DQO)	5
2.3.2 Turbidez	6
2.3.3 Cor	6
2.3.4 Potencial Hidrogeniônico (pH)	7
2.4 Tratamento de Efluentes Líquidos por Coagulação e Floculação	7
2.4.1 Mecanismos de coagulação	8
2.5 Coagulantes e Floculantes	10
2.5.1 Sulfato de alumínio	10
2.5.2 Cloreto Férrico	11
2.5.3 Policloreto de alumínio	11
2.5.4 Coagulante orgânico	12
2.5.5 Tanino vegetal	13
2.5.6 Coagulante inorgânico combinado com orgânico	13
2.5.7 Floculantes	14
2.6 Teste de jarro	15
3 Materiais e Métodos	16
3.1 Descrição da estação de tratamento de efluentes da empresa	16
3.2 Reagentes utilizados	18
3.3 Ensaio de coagulação e floculação	19
3.3.1 Metodologia	19
4 Resultados	21
4.1 Ensaio de coagulação e floculação	21
5 Conclusões	31
6 Referências	33
7 Anexo A	35

Agradecimentos

Aos meus pais, Vilson e Maria do Horto, e meu irmão, Igor, pelo incentivo durante a realização do trabalho e todo curso de Engenharia Química.

À minha namorada, Ana Carolina, que esteve comigo durante praticamente todo o período do curso.

À minha professora orientadora, Mariliz, pela paciência e compreensão durante a realização desse trabalho.

À empresa FAXON QUÍMICA de Novo Hamburgo que me abriu as portas para a realização desse trabalho e profissionalmente.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo ensino gratuito e de ótima qualidade.

Ao departamento de Engenharia Química, professores, funcionários, colegas e amigos de outros cursos da universidade.

Resumo

A atividade de tratamento de efluentes é uma atividade obrigatória para indústrias que utilizam água em seu processo, de acordo com a legislação federal e estadual. As tecnologias envolvidas devem estar atualizadas para minimizar os impactos ambientais. No presente trabalho foram estudados o desempenho de coagulantes combinados, mistura de sais inorgânicos com polímeros orgânicos e comparado com o desempenho de um coagulante inorgânico bastante comum, o policloreto de alumínio. Foi realizado um estudo de caso em efluente de um curtume do Rio Grande do Sul que realiza as etapas de recurtimento e acabamento do couro. Foram ensaiadas amostras em testes de jarros, simulando a coagulação química de efluentes, os resultados foram analisados analiticamente pelos parâmetros DQO, cor, turbidez e pH, além do aspecto visual. O desempenho do coagulante combinado 1 foi bastante satisfatório uma vez que atingiu remoções de 64,39% de DQO, 99,33% de cor e 99,88% de turbidez com uma dosagem de 3250 mg.L⁻¹, enquanto com o coagulante inorgânico atingiu remoções de 59,64% de DQO, 98,91% de cor e 99,84% de turbidez com uma dosagem de 3500 mg.L⁻¹.

Palavras-chave: coagulantes combinados, efluentes, curtume e coagulação.

Lista de Figuras

Figura 2.1: Distribuição de tamanhos de partículas na água (Di Bernardo, 1993).	6
Figura 2.2: Configuração esquemática da dupla camada de íons (Pavanelli,2001).....	8
Figura 2.3: Reação de formação do poliDADMAC.....	13
Epicloridrina Dimetilamina Poliamina	13
Figura 2.4: Reação de formação da poliamina.....	13
Figura 2.5: Reação de formação do polieletrólito aniônico.....	14
Figura 3.1: Decantador do tratamento primário.	17
Figura 3.2: Lagoa biológica, tratamento secundário.....	17
Figura 3.3: Floculação no tanque do tratamento terciário.....	18
Figura 3.4: Decantador do tratamento terciário.....	18
Figura 4.1: Ensaios de coagulação e floculação com cal hidratada, CC1 e polieletrólito. ..	21
Figura 4.2: Ensaios de coagulação e floculação com cal hidratada, CC2 e polieletrólito. ..	22
Figura 4.3: Ensaios de coagulação e floculação com soda cáustica líquida, coagulante CC1 e polieletrólito.	23
Figura 4.4: Ensaios de coagulação e floculação com soda cáustica líquida, CC2 e polieletrólito.	24
Figura 4.5: Aspecto visual dos ensaios com o coagulante CC1 e o efluente bruto.....	28
Figura 4.6: Aspecto visual dos ensaios com o coagulante PAC.....	29

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Caracterização das águas residuárias de processo de curtume.....	4
Fonte: Gutterres <i>et al.</i> (2005) e Passos (2007).....	4
Tabela 2.3: Dissociação do sulfato de alumínio em água (Di Bernardo & Dantas, 2005). .	11
Tabela 2.4: Hidróxido de alumínio e fórmulas químicas específicas	12
Fonte: Di Bernado e Dantas, 2005.....	12
Tabela 4.1: Características analíticas do efluente bruto na segunda fase de testes.	22
Tabela 4.2: Dosagens dos produtos dos experimentos da segunda fase de testes.	23
Tabela 4.3: Análise de parâmetros da coagulação com o coagulante combinado 1.....	24
Tabela 4.4: Análise de parâmetros da coagulação com o coagulante combinado 2.....	25
Tabela 4.5: Análise de remoção de parâmetros para os ensaios de coagulação CC1 e CC2.	25
Tabela 4.6: Características analíticas do efluente bruto na segunda fase de testes.	26
Tabela 4.7: Dosagens dos produtos dos experimentos da terceira fase de testes.	27
Tabela 4.8: Análise de parâmetros de coagulação e floculação com o coagulante combinado 1.	28
Tabela 4.9: Análise de parâmetros de coagulação e floculação com o coagulante PAC....	29
Tabela 4.10: Análise de remoção de parâmetros para os ensaios de coagulação CC1 e PAC.....	30

Lista de Símbolos

cm – centímetro

g.L⁻¹ - grama por litro

kg – quilograma

kg.L⁻¹ - quilograma por litro

L – litro

mg.L⁻¹ – miligrama por litro

mg O₂.L⁻¹ – miligrama de oxigênio por litro

mS/cm – miliSiemens por centímetro

NTU – Unidades Nefelométricas de Turbidez

p.v⁻¹ - peso por volume

ppm – parte por milhão

uH – Unidades Hazen

Lista de Abreviaturas e Siglas

DQO – Demanda Química de Oxigênio

DBO – Demanda Biológica de Oxigênio

ETE – Estação de Tratamento de Efluentes

RPM – Rotações Por Minuto

DADMAC – Dialildimetilamônio

HCA – Hidróxicloreto de Alumínio

PAC – Policloreto de Alumínio

pH – Potencial Hidrogeniônico

1 Introdução

O setor de processamento de peles é de grande importância para o Brasil e o estado do Rio Grande do Sul. Em 2009, foram produzidos aproximadamente 320 milhões de couros, sendo que no Brasil foram produzidos mais de 39 milhões de couros, ou seja, o Brasil é responsável por 12,18% da produção mundial. O estado do Rio Grande do Sul possui aproximadamente 110 curtumes cadastrados, sendo que a maioria deles recebe o couro *wet-blue* (ABQTIC, 2013).

Segundo a ABQTIC (2011), no ano de 2009, o setor coureiro-calçadista tinha 773 empresas de processamento de peles, gerando aproximadamente 37 mil postos de trabalho. O Rio Grande do Sul contribuiu com a maior parcela de estabelecimentos de curtimento, 211, superando 13 mil empregos no Estado.

O processo em curtumes consiste em transformar a pele salgada, ou verde, em couro. As etapas de processamento da pele podem ser agrupadas em operações de ribeira, curtimento, recurtimento e acabamento. A tecnologia da fabricação requer diversas etapas, como adições sequenciais de produtos químicos, intercaladas por lavagens e processos mecânicos.

O setor coureiro vem sofrendo mudanças significativas nos últimos anos; com a entrada no mercado de países expoentes com grande poder aquisitivo, como a China, a concorrência ficou bastante competitiva. A partir dessas exigências e da preocupação ambiental, causada pela maior fiscalização de órgãos ambientais, as empresas tiveram de pesquisar novas técnicas de curtimento, equipamentos e novos produtos químicos. Técnicas como o reuso das águas de processo e a divisão dos efluentes por tipo de contaminantes tornou-se uma prática comum.

Os efluentes provenientes de curtumes possuem elevada carga orgânica, principalmente efluentes da etapa de operações de ribeira, decorrente da elevada quantidade de proteínas degradadas liberadas pela pele. Essas águas de processo podem ter composições variadas; uma vez que não há um padrão entre os curtumes, pode haver variação devido ao tipo de animal utilizado, decorrente do produto químico adicionado e do processo de conservação da pele.

As estações de tratamento de efluentes de empresas de processamento de peles descontaminam seus líquidos a partir do tratamento convencional: pré-tratamento, para a separação de sólidos de maior granulometria, tratamento primário (coagulação química, floculação, seguida de sedimentação, ou flotação), tratamento secundário (degradação da matéria orgânica com bactérias de decomposição), tratamento terciário (etapa de polimento do efluente, com a adição de químicos para a cloração ou diminuição da carga, a partir de parâmetros definidos por órgãos de fiscalização).

O presente trabalho tem como objetivo apresentar uma nova tendência no mercado de tratamento de efluentes, mais especificamente para a etapa de tratamento primário, na coagulação química. Grande parte das empresas desse setor utiliza sais de alumínio para desestabilizar os colóides presentes na água. O maior problema de utilizar compostos inorgânicos é que não são biodegradáveis, esses metais permanecem na sua forma iônica ou estrutural, seja no lodo segregado ou no líquido tratado.

Diversos produtos orgânicos estão sendo testados para substituir os coagulante tradicionais, como taninos e polímeros catiônicos, que, devido as suas estruturas, com grandes cadeias e elevado peso molecular, realizam a desestabilização dos contaminantes por outros mecanismos de coagulação e não possuem os mesmos resultados dos sais metálicos.

A partir dessas informações as empresas fornecedoras de produtos químicos para o tratamento de efluentes estão desenvolvendo novos produtos, coagulantes combinados, que misturam sais inorgânicos com compostos orgânicos sintéticos, polímeros catiônicos. Alguns curtumes do Rio Grande do Sul já utilizam esses produtos que, além de ser uma mistura de coagulantes, realizam a coagulação química a partir de dois mecanismos.

Assim, o objetivo deste trabalho é realizar um estudo de caso a partir de uma amostra de efluente coletada de um curtume do estado do Rio Grande do Sul, que processa couro de *wet-blue* e *wet-white* até couro acabado. Foram realizados em laboratório os testes de jarros comparando os coagulantes combinados com coagulantes inorgânicos.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são apresentados fundamentos teóricos mais relevantes para a compreensão do trabalho.

2.1 Característica do efluente bruto

As peles são submetidas a diversos tratamentos químicos e mecânicos a fim de se obter o produto com as características desejadas. As operações químicas são realizadas em meios aquosos, onde são adicionados, dependendo de cada fase do tratamento, ácidos, bases, sais, curtentes, tensoativos, engraxantes, corantes, recurtentes, agentes auxiliares e outros produtos (GUTTERRES, 2008).

Os efluentes gerados no processamento de couro possuem as seguintes características: nas etapas iniciais os efluentes de ribeira possuem elevada carga orgânica carbonácea e nitrogenosa devido à presença de poluentes como o sangue e substâncias removidas da limpeza da pele. Nas etapas intermediárias, durante o curtimento propriamente dito, os efluentes caracterizam-se pela presença de metais, como o cromo trivalente e alta DBO em caso de emprego de taninos vegetais. Já nas etapas finais, apesar da carga orgânica ser relativamente reduzida, os efluentes caracterizam-se pela quantidade de substâncias solúveis e em emulsão, como óleos, corantes, tenso-ativos e recurtentes sintéticos.

A indústria do couro emprega cerca de 30-40 m³ de água por tonelada de pele processada. Consumos maiores de água, de 50 m³ água / tonelada de pele processada, podem ocorrer devido ao uso ineficiente da água (GUTTERRES *et al.*, 2005).

Os seguintes principais parâmetros são analisados nas águas residuais de curtumes: cloretos, sulfetos, cromo, sólidos totais, NTK (nitrogênio total de Kjeldahl), DBO5 (demanda bioquímica de oxigênio) e DQO (demanda química de oxigênio). Além da elevada DBO nos banhos de processo, o banho de remolho tem elevadas concentrações de cloreto de sódio, o de depilação/caleiro, de sulfeto de sódio e cálcio, e o de curtimento, de cromo.

Gutterres *et al.* (2005) e Passos (2007) analisaram efluentes de um curtume, a partir de amostras coletadas após término de cada etapa de processamento. A amostragem e conservação dos banhos residuais e os ensaios analíticos usados, para análise de cloreto de sódio, cromo total e cálcio foram feitos seguindo métodos específicos para banhos residuais de curtume. Outros parâmetros seguiram métodos de análises de efluentes em geral. As análises das Tabelas 2.1 e 2.2 foram escolhidas pelos autores conforme sua importância para cada etapa do processo.

Tabela 2.1: Caracterização das águas residuárias de processo de curtume.Fonte: Gutterres *et al.* (2005) e Passos (2007)

Etapa de processamento do couro	Condutividade (mS/cm)	pH	Turbidez (NTU)	DQO (mg.L ⁻¹)	Sólidos Totais (g.L ⁻¹)	NTK (g.L ⁻¹)	DBO ₅ (mg.L ⁻¹)
Pré-remolho	78	7,74	87	1264	132	1,69	5533
Remolho	65	9,10	306	10146	69	1,48	
Caleiro/ Depilação	36	12,33	>1000	57182	80	7,37	2515
Desencalagem	53	8,9	102	8608	47	10,82	1459
Purga	9	8,9	59	1087	4	6,10	
Píquel	44	3,16	82	1201	70	4,57	800
Curtimento	42	4,01	26	6649	94	1,02	
Neutralização 1	14	5,05	2	2935	16	0,75	800
Neutralização 2	15	6,55		4403	14		600
Recurtimento	4	3,39	36	7028	2	0,50	400
Tingimento	13	3,98	-	9264	19	-	873
Engraxe	6	3,44	-	10392	7	-	1020

Tabela 2.2: Concentração dos principais elementos em águas residuais de processo de curtume. Fonte: Guterres *et al.* (2005) Passos (2007).

Etapa de processamento do couro	Cromo (g.L ⁻¹)	Cloretos (g.L ⁻¹)	Cálcio (g.L ⁻¹)
Pré-remolho	-	152,779	-
Remolho	-	78,681	-
Caleiro/ Depilação	-	<0,200	1,955
Desencalagem	-	-	0,465
Píquel	-	49,300	-
Curtimento	1,297	-	-
Neutralização 1	0,939	-	-
Recurtimento final	0,033	-	-

2.2 Tratamento físico-químico de efluentes

O tratamento físico-químico convencional de efluentes de curtume, consistem de pré-tratamento, coagulação, floculação, sedimentação e manipulação de lodo. Além da coagulação química são necessários tratamentos secundários e terciários, como filtros biológicos, lodos ativados, entre outros (Muruganathan *et al.*, 2004 a).

Devido as partículas coloidais apresentarem baixa velocidade de sedimentação, torna-se imprescindível a coagulação química nas estações de tratamento de água, tendo em vista a redução da quantidade de material suspenso e dissolvido antes da filtração rápida (Di Bernardo e Dantas, 2005).

A caracterização das impurezas do efluente é necessária para realizar uma boa coagulação. Segundo Winter (2011), os efluentes provenientes de curtumes possuem elevada carga orgânica, especialmente efluentes de operações de ribeira, devido aos conteúdos de proteínas degradadas liberados pela pele. Esses banhos residuais podem ter composições variadas de seus constituintes, uma vez que não há um padrão entre os curtumes. Há variáveis que influem no processo e nos efluentes gerados, como o perfil do animal (raça, idade), conservação da pele, processo (etapas e formulação) e sistemas de tratamento dos efluentes. De acordo com Gutterres (2008), existe uma grande diversidade nas características almejadas e propriedades finais exigidas dos couros produzidos. Com base nisto, são selecionados os insumos químicos a utilizar nos processos.

2.3 Análise dos Efluentes Líquidos

A contaminação dos efluentes líquidos está associada às suas principais características físicas, químicas e biológicas, assim agrupadas por Gutterres et al. (2005):

Características físicas: sólidos totais (sólidos em suspensão x sólidos dissolvidos; sólidos voláteis e sólidos fixos, sólidos sedimentáveis e não sedimentáveis), temperatura, cor, odor, turbidez e condutividade elétrica.

Características químicas: matéria orgânica, medida por demanda bioquímica de oxigênio, demanda química de oxigênio, demanda total de oxigênio, demanda teórica de oxigênio e quantidade de sólidos totais voláteis, e matéria inorgânica, caracterizada por análise de pH, alcalinidade, dureza, acidez (gás carbônico livre), concentração de Ferro, Manganês, Sílica, cloretos, sulfatos, nitratos, substâncias tóxicas, gases diversos e sólidos totais fixos.

Características biológicas: organismos encontrados na água: algas, protozoários, rotíferos, crustáceos, vermes, larvas de insetos, bactérias e fungos. A caracterização comum é feita por contagem do número mais provável de coliformes (coliformes totais e fecais).

Os parâmetros analíticos que foram utilizados no desenvolvimento deste trabalho são destacados a seguir:

2.3.1 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A quantidade de compostos orgânicos dissolvidos em uma amostra pode ser determinado pela demanda de oxigênio necessária para sua oxidação. No entanto deve-se fazer distinção entre demanda química de oxigênio (DQO) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO). A DQO expressa a medida de oxigênio equivalente àquela porção de matéria orgânica e inorgânica capaz de ser oxidada por um agente oxidante forte (APHA, 2005).

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

2.3.2 Turbidez

A turbidez representa o grau de interferência com a passagem de luz através da água, conferindo uma aparência turva. Os constituintes responsáveis são os sólidos em suspensão, o qual podem ser de origem natural (partículas de rocha, argila, silte, algas e outros microrganismos) ou antropogênica (rejeitos domésticos e industriais, microrganismos e erosão). Este parâmetro é utilizado para caracterizar praticamente todos as classes de águas, brutas, tratadas e controle de operações das estações de tratamento de água (Von Sperling, 1996).

Águas que apresentem a mesma turbidez podem conter partículas de tamanho diferentes e em quantidade diferentes, concorrendo para alterar as condições de coagulação. Em geral, quanto menor a turbidez da água produzida na estação, mais eficiente resulta a desinfecção da mesma (Di Bernardo e Dantas, 2005).

A Figura 2.1 apresenta a distribuição de tamanhos de partículas presentes na água comparando com a visualização de microscópios e tamanhos dos poros do papel filtro.

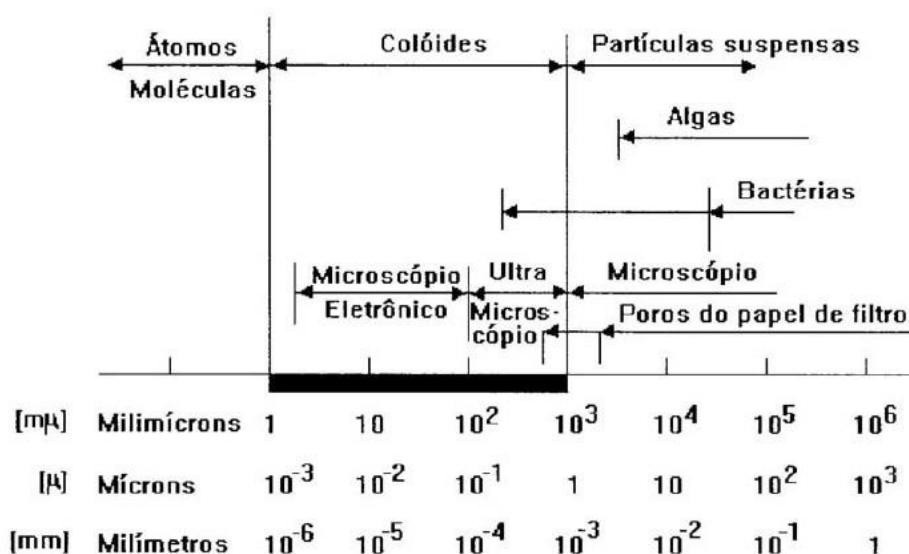


Figura 2.1: Distribuição de tamanhos de partículas na água (Di Bernardo, 1993).

2.3.3 Cor

Nas águas naturais, a cor é decorrente da presença de matéria orgânica originada da decomposição de plantas e animais, denominada substância húmica. No passado, a remoção da cor decorria apenas por motivos estéticos, no entanto com a descoberta de que tais substâncias são precursoras de formação de trihalometanos (THM) e de outros compostos organo-halogenados, a partir da desinfecção por cloro livre, a quantidade de cor passou a ser um parâmetro de grande importância. Nas estações de tratamento em geral são usados métodos de comparação visual e espectrofotometria. A cor varia com o pH da água, quanto mais baixo o pH, mais fácil é a sua remoção (Di Bernardo e Dantas, 2005).

2.3.4 Potencial Hidrogeniônico (pH)

O pH é um parâmetro bastante utilizado na indústria química, a partir do valor do pH pode-se classificar a água como ácida ou básica, dependendo da proporção de íons hidroxila em relação a íons de hidrogênio. É um parâmetro significativamente importante nas etapas de coagulação, filtração, desinfecção e controle de corrosão. Para sistemas de fornecimento, águas de valores de baixo pH tendem a ser corrosivas ou agressivas a certos metais e paredes de concreto, já com pH elevado, tendem a formar incrustações (Di Bernardo, *et al*, 2002).

2.4 Tratamento de Efluentes Líquidos por Coagulação e Floculação

O principal objetivo do processo de coagulação é neutralizar as cargas elétricas das partículas em suspensão, por meio da adição de compostos químicos com cargas positivas, como sais de ferro, sais de alumínio e polímeros (Santos *et al.*, 2007).

A coagulação, geralmente realizada por sais de alumínio e de ferro, resulta em dois fenômenos: o primeiro, essencialmente químico, consiste na reação do coagulante com a água e na formação de espécies hidrolisadas com carga positiva, dependendo da concentração do metal e pH final da solução; o segundo, fundamentalmente físico, consiste no transporte das espécies hidrolisadas para que haja contato entre as impurezas presentes na água (Di Bernardo e Dantas, 2005).

A alcalinidade é de crucial importância no tratamento químico de água e efluentes. Quando a água não possui alcalinidade ideal para a coagulação costuma-se adicionar álcalis como a cal virgem (CaO), cal hidratada (Ca(OH)₂) e carbonato de sódio (Na₂CO₃) para promovê-la e mantê-la nos níveis ideais (Di Bernardo *et al*, 2002).

Um parâmetro de grande importância para avaliar a estabilidade e a tendência à floculação de sistemas coloidais, pela determinação da magnitude das interações repulsivas entre as partículas, é o Potencial Zeta. A medida do potencial eletrocinético, corresponde à carga eletrostática superficial dos colóides presentes no efluente (Pavanelli, 2001).

Partículas coloidais, substâncias húmicas e microrganismos em geral apresentam-se com carga negativa na água, ou as partículas coloidais podem ter polímeros adsorvidos em sua superfície, impedindo a aproximação das mesmas. Por isso é necessário alterar a força iônica do meio, o que, em tratamento de água, é feito, principalmente, pela adição de sais de alumínio ou de ferro, polímeros sintéticos ou taninos vegetais catiônicos, caracterizando o fenômeno da coagulação (Di Bernardo e Dantas, 2005).

O efeito do processo de coagulação depende da valência do íon carregado de carga elétrica contrária a carga das partículas coloidais. Para esse efeito, quanto maior a valência do íon maior será a sua capacidade de coagulação, justificativa para utilizar-se íons de alta valência (Al³⁺ e Fe³⁺) como agentes de coagulação dos sistemas coloidais (CPRH, 2001).

A Figura 2.2 representa o potencial zeta e a dupla camada elétrica de uma partícula coloidal presente em águas industriais.

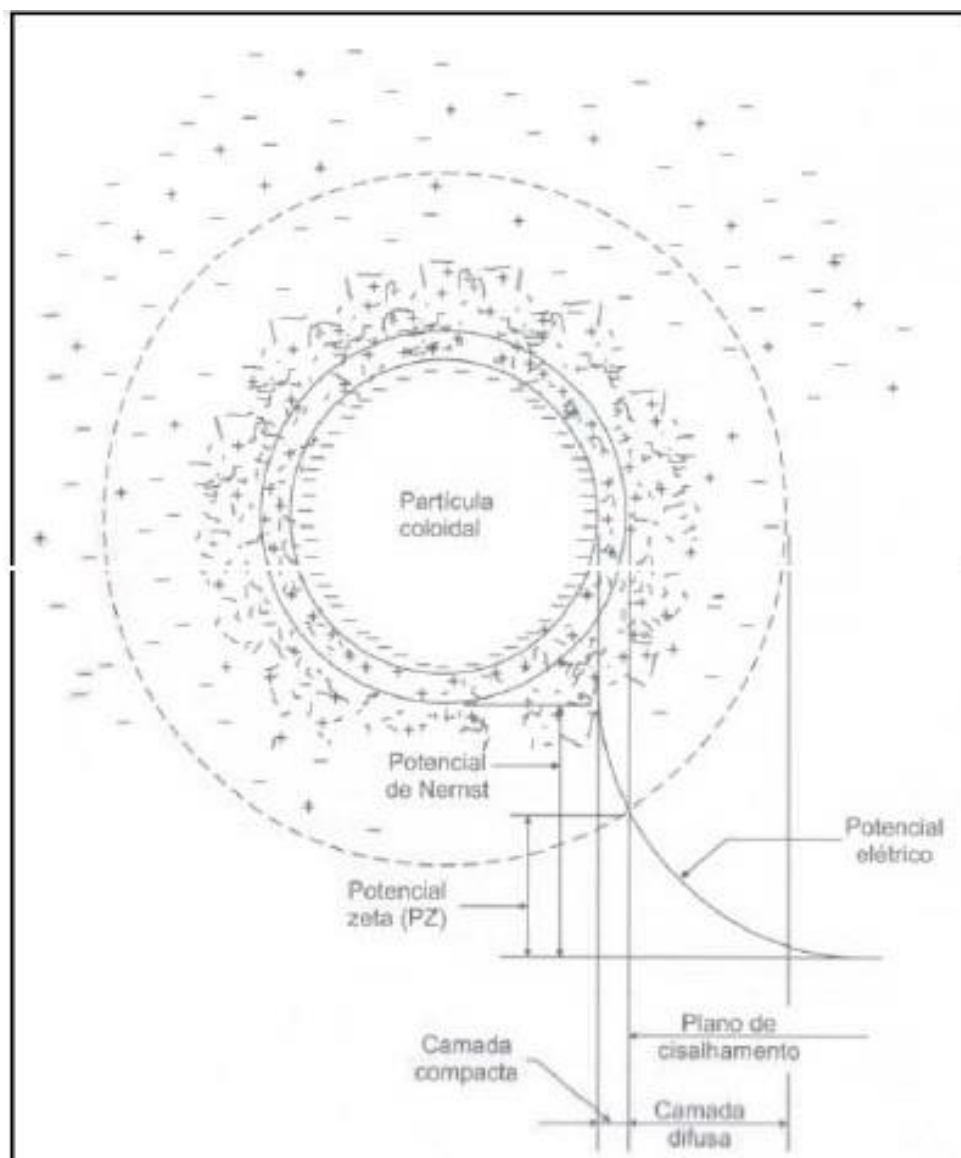


Figura 2.2: Configuração esquemática da dupla camada de íons (Pavanelli,2001).

2.4.1 Mecanismos de coagulação

Atualmente, considera-se a coagulação como o resultado individual ou combinado da ação de quatro mecanismos distintos: compressão da camada dupla elétrica, adsorção e neutralização, varredura, adsorção e formação de pontes.

- Compressão da camada dupla elétrica:

Di Bernardo e Dantas (2005) apresentam um estudo, realizado por volta de 1900, denominado DLVO, que mostra que a desestabilização de um colóide por um eletrólito indiferente ocorre devido a interações eletrostáticas (íons de mesma carga são repelidos e íons de cargas opostas são atraídos pelos colóides), sendo assim, quanto maior a carga do íon positivo, menor a quantidade de produto requerida para a coagulação.

A partir da introdução de um composto com uma certa quantidade de carga em um sistema coloidal, ocorre um aumento na densidade de carga na camada difusa ocasionando a diminuição da “esfera” de influência das partículas, causando a coagulação por compressão da dupla camada difusa (Di Bernardo e Dantas, 2005).

A quantidade de eletrólitos necessários para ocorrer a coagulação é independente da concentração de colóides no efluente e não é possível a reversão da carga dos colóides (Spinelli, 2001).

- Adsorção e neutralização de carga:

A desestabilização de uma dispersão coloidal consiste nas interações entre coagulante-colóide, coagulante-solvente e colóide-solvente (Di Bernardo & Dantas, 2005).

Devido a capacidade das partículas coloidais adsorverem algumas espécies, sendo estas de carga contrária à superfície dos colóides, ocorre a desestabilização da partícula. As dosagens de coagulantes para a desestabilização é bem inferior às do mecanismo de dupla camada (Pavanelli, 2001).

Existem diversas tecnologias de tratamento de efluentes, uma delas é conhecida como filtração direta, na qual não há a necessidade da produção de flocos para posterior sedimentação ou flotação, mas de partículas desestabilizadas que serão retidas no meio granular dos filtros. Para utilizar essa técnica é muito importante o mecanismo de adsorção-neutralização (Di Bernardo & Dantas, 2005).

- Varredura:

Quando é adicionada uma quantidade significativa de coagulante, dependendo do pH de mistura, poderá ocorrer a formação de precipitados do tipo $\text{Al}(\text{OH})_3$ ou $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Estes ligam-se às partículas coloidais, devido a presença de cargas, e originam flocos maiores que sedimentam ou flutam com maior facilidade que os flocos obtidos no mecanismo de adsorção e neutralização de cargas (Di Bernardo e Dantas, 2005).

- Adsorção e formação de pontes:

Este mecanismo caracteriza-se por envolver o uso de polímeros de grandes cadeias moleculares (sintéticos ou naturais), que apresentam sítios ao longo de sua cadeia, servindo de ponte entre a superfície à qual estão aderidos e outras partículas.

O comportamento de polieletrólitos como coagulantes é explicado baseado na adsorção à superfície de partículas coloidais, seguida da redução da carga ou pelo entrelaçamento das partículas nas cadeias orgânica (Mendes, 1989).

Os polímeros usados no tratamento de água, mais comumente agem como floculantes ou auxiliares de floculação. Dentre as principais vantagens diretas e indiretas da utilização de polímeros como auxiliares de floculação em uma estação de tratamento de água em ciclo completo, podem ser citadas: melhoria da qualidade da água decantada e filtrada, redução no consumo de coagulante primário, redução dos gastos totais com produtos químicos, redução no volume de lodo no decantador, aumento do período médio entre lavagens consecutivas dos filtros, reduzindo, portanto, a perda de água, aumento da eficiência de desinfecção, como consequência da redução da concentração de sólidos suspensos na água filtrada, diminuição da ocorrência de deposição de lodo na rede e nos reservatórios do sistema de distribuição e redução dos problemas advindos da sobrecarga (vazão e taxa) de decantadores e filtros (Di Bernardo e Dantas, 2005).

Os polieletrólitos são classificados, de acordo com a origem, em naturais ou sintéticos. Os polieletrólitos naturais são produtos derivados do amido, o qual possui uma

abundância de grupos hidroxila que fornece ao mesmo características hidrofílicas, fazendo com que o polímero estabeleça ligações de hidrogênio com a água (Di Bernardo e Dantas, 2005). Já os polieletrólitos sintéticos são polímeros de cadeia longa e alto peso molecular (Metcalf e Eddy, 2003).

Os polieletrólitos também podem ser divididos de acordo com a sua carga. Quando positiva o polieletrólito é chamado de catiônico. Quando negativa, aniônico e quando não possui carga, não iônico (Metcalf e Eddy, 2003; Eckenfelder, 1989; Azevedo Netto *et al.*, 1979).

Tanto polímeros sintéticos como naturais têm sido usados como auxiliares de coagulação, floculação ou filtração. No primeiro caso, têm-se os polímeros catiônicos, o que permite em muitas situações, reduzir consideravelmente a dosagem do coagulante primário quando este é um sal de alumínio ou de ferro. Como auxiliar de floculação, os polímeros são empregados com o objetivo de aumentar a velocidade de sedimentação dos flocos, reduzir a ação das forças de cisalhamento nos flocos durante a veiculação da água floculada e diminuir a dosagem de coagulante primário. Como auxiliares de filtração, os polímeros reduzem a possibilidade de ocorrência do transpasse e concorrem para que sejam usadas taxas de filtração maiores que as tradicionais (Di Bernardo e Dantas, 2005).

2.5 Coagulantes e Floculantes

Devido a prática de coagulação e floculação para o tratamento de efluente ser o processo convencional, existem variados tipos de coagulantes, uma vez que o custo desses produtos possui um valor considerado, decorrente da quantidade de efluente gerados, com relação ao custo total da estação.

2.5.1 Sulfato de alumínio

A partir da determinação do tipo de sal de alumínio utilizado como coagulante, pode-se relacionar a dosagem desse produto com a concentração molar de alumínio e da espécie, possibilitando que sejam determinadas as quantidades de precipitado e de compostos hidrolisados em função da variação do pH e dosagem do produto (Di Bernardo e Dantas, 2005).

Considerando o equilíbrio referente ao comportamento do íon Al^{3+} em água isenta de impurezas, na Tabela 2.3 são apresentadas as seguintes reações de hidrólise a 25° C (Di Bernardo e Dantas 2005):

Tabela 2.3: Dissociação do sulfato de alumínio em água (Di Bernardo & Dantas, 2005).

Equações de hidrólise das espécies	Log K
$\text{Al}^{3+} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Al}(\text{OH})^{2+} + \text{H}^+$	-5,02
$2 \text{Al}^{3+} + 2 \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+} + 2 \text{H}^+$	-6,27
$6 \text{Al}^{3+} + 15 \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+} + 15 \text{H}^+$	-47,00
$8 \text{Al}^{3+} + 20 \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+} + 20 \text{H}^+$	-68,70
$\text{Al}(\text{OH})_3 \rightleftharpoons \text{Al}^{3+} + 3 \text{OH}^-$	-32,64
$\text{Al}^{3+} + 4 \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Al}(\text{OH})_4^- + 4 \text{H}^+$	-23,57

O sulfato de alumínio pode ser tóxico dependendo da dosagem empregada, podendo provocar doenças de demência e coordenação motora, devido à deficiência renal em filtrar os metais do sangue que é levado ao cérebro, causando doenças como o mal de Parkinson e Alzheimer (Fiorentini, 2005).

Os sólidos agregados pela ação do sulfato de alumínio são exclusivamente de natureza inorgânica, resultando um lodo que não é biodegradável, fato que dificulta a sua disposição final (Santos Filho e Santa Rita, 2002).

2.5.2 Cloreto Férrico

A partir da reação do ácido clorídrico com o minério de ferro, hematita (Fe_2O_3), com aumento de temperatura, seguido de resfriamento e filtração, tem-se o cloreto férrico (FeCl_3), com elevado índice de impurezas. A concentração final do produto é em torno de 40% em peso de FeCl_3 . Devido à baixa solubilidade dos hidróxidos formados, o coagulante age em uma ampla faixa de pH (Pavanelli, 2001).

Uma das desvantagens de utilizar o cloreto férrico como agente de coagulação é o fato de possuir uma coloração e quando adicionado em excesso, segundo Branco (1991), a presença de ferro pode propiciar uma coloração amarelada e turva à água dependendo dos níveis de concentração.

2.5.3 Policloreto de alumínio

O hidroxicloreto de alumínio (HCA) é um coagulante inorgânico catiônico pré-polymerizado, a base de cloreto de polialumínio, conhecido como PAC (*polyaluminum chloride*). A fórmula química geral é do tipo $\text{Al}_x(\text{H}_2\text{O})_{(6x-2y)}(\text{OH})_y\text{Cl}_{(3x-y)}$ ou $\text{Al}_r(\text{OH})_u\text{Cl}_{3r-u}$ (para $0 < u < 3r$). Na Tabela 2.4 são apresentadas 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 e Dantas, 2005):

Tabela 2.4: Hidróxido de alumínio e fórmulas químicas específicas

Fonte: Di Bernardo e Dantas, 2005.

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

O hidroxidocloreto de alumínio ou policloreto de alumínio, na maioria dos casos, apresenta-se como um coagulante superior ao sulfato de alumínio. Para a eliminação de substâncias coloidais é 2,5 vezes superior, para a mesma dosagem de Al³⁺, em relação a outros sais de alumínio frequentemente utilizados (Pavanelli, 2001; Srivastava *et al.*, 2005).

2.5.4 Coagulante orgânico

Em determinados casos, o emprego de um polímero catiônico pode ser mais apropriado que um sal de alumínio ou de ferro, no entanto, a lavagem do meio filtrante deve ser mais eficiente para evitar a formação de bolas de lodo. A definição de qual polieletrólito catiônico deve ser usado como coagulante primário depende de sua massa molar, densidade de carga, dosagem requerida, condições de mistura e do tamanho predominante das partículas presentes na água (Di Bernardo e Dantas, 2005).

Para utilizar um polímero catiônico como coagulante primário ou auxiliar de coagulação, necessita-se considerar alguns fatores (Di Bernardo e Dantas 2005):

- a determinação da massa molar pode controlar o tamanho e a resistência dos flocos;
- existe uma relação direta entre a carga do polieletrólito e a dosagem ótima;
- o pH e a alcalinidade não influenciam significativamente;
- tem-se obtido bons resultados com a combinação do polímero catiônico (coagulante primário) com um sal de alumínio ou de ferro (auxiliar de coagulação);
- a taxa de crescimento de perda de carga no meio filtrante é menor quando comparada à taxa resultante com um sal de alumínio ou de ferro;
- não ocorre transpasse durante a filtração, na maioria dos casos;

- o volume de lodo gerado após a clarificação é menor que aquele observado com um sal de alumínio ou de ferro.

Poliaminas e o polidialildimetilamônio (poliDADMAC) são muito utilizados em diversos países como coagulantes orgânicos, para o processo de coagulação e sedimentação, em vez de sais metálicos como coagulante primário e agentes de desestabilização por neutralização de carga e mecanismos de precipitação, devido ao pouco efeito no pH da água bruta (Bae *et al.*, 2007).

As Figuras 2.3 e 2.4 apresentam as reações de formação dos polímeros catiônicos poliDADMAC e poliaminas.

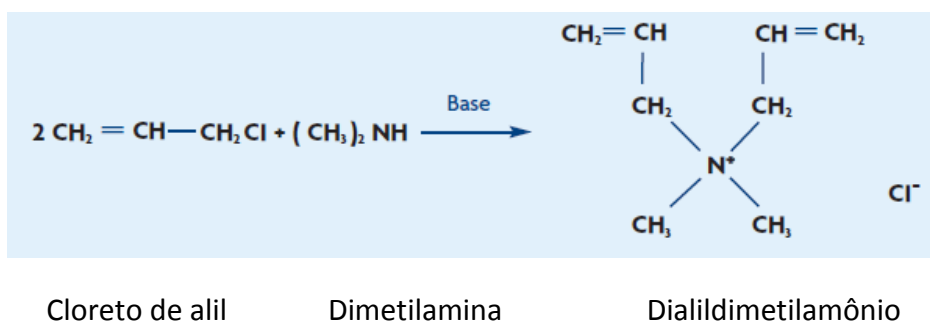


Figura 2.3: Reação de formação do poliDADMAC.

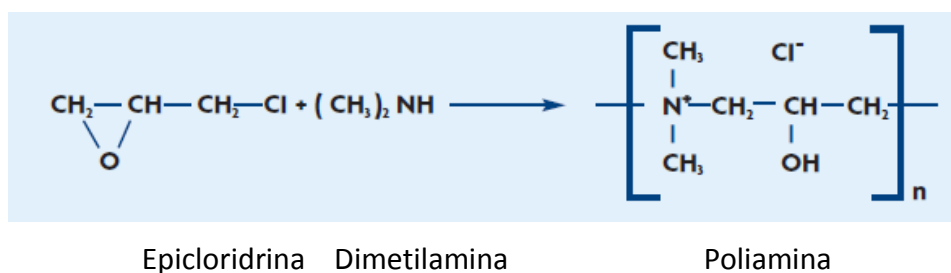


Figura 2.4: Reação de formação da poliamina.

2.5.5 Tanino vegetal

Polímero orgânico catiônico de origem vegetal, de baixo peso molecular, não tóxico, que atua como coagulante ou auxiliar de coagulação e floculação. Excetuando o fato de o produto ser natural, produzido a partir de tanino, uma das principais desvantagens é o fato de reagir com o cloro livre, devido a presença de amônia em sua molécula. Para estações de tratamento de água com pré-cloração, não deverá haver cloro livre na chegada da estação. De maneira similar, não pode haver coagulante residual após a decantação e filtração, para não haver a formação de cloro combinado ou consumo adicional de cloro na pós-cloração, que mantém a água livre de agentes patogênicos.

2.5.6 Coagulante inorgânico combinado com orgânico

A partir do desenvolvimento de novas tecnologias para o tratamento de águas industriais desenvolveram-se, também, novos produtos comerciais, com custos bastante competitivos, derivados da mistura de coagulantes orgânicos e inorgânicos, uma vez que coagulantes exclusivamente orgânicos possuem vantagens e desvantagens na etapa de coagulação química.

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), tem-se observado que a utilização de um sal de alumínio ou de ferro em conjunto com um polímero catiônico contribui para eliminar as desvantagens dos mesmos quando empregados separadamente para a maioria das águas quando é necessária a coagulação por adsorção e neutralização de carga. As principais vantagens do uso combinado de sulfato de alumínio e polímero catiônico são:

- diminuição dos dosagens dos dois produtos químicos quando usados separadamente;
- eliminação de ocorrência eventual de transpasse;
- redução das desvantagens dos dois produtos químicos quando usados separadamente.

2.5.7 Floculantes

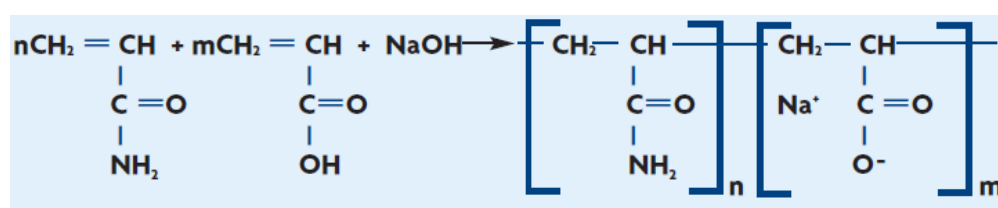
Os auxiliares de coagulação são determinados de polieletrólitos, polímeros de alta massa molar, apresentando ou não, regiões ionizáveis ao longo de sua cadeia. A quantidade e o tipo de monômeros que formam a cadeia polimérica são bastante variáveis, portanto pode-se obter uma variedade muito grande de polieletrólitos de massa molar diferentes.

Os polímeros aniônicos são polieletrólitos com massas molares típicas entre 12-15 mg.mol⁻¹ (mais de 150.000 monômeros de acrilamida por molécula). Comercialmente são fornecidos na forma granular ou em emulsão, necessitando de intensa agitação durante a dissolução, para que ocorra a inversão da cadeia em concentrações recomendadas de 0,25 a 1,0% (p.v⁻¹) para uma dissolução satisfatória, sendo bastante eficiente em dosagens baixas (Entry *et al.*, 2002).

Na maioria dos casos em que são utilizados polímeros orgânicos no tratamento de água é para aglomerar e aumentar o tamanho do floco após a utilização de sais metálicos como coagulantes primários.

O principal composto polimérico utilizado como auxiliar de coagulação é a poli(acrilamida), um composto com alto peso molecular que é solúvel em água. Em geral, utilizar a poli(acrilamida) como floculante aumenta a velocidade de sedimentação, reduz custos, aumenta a qualidade final da água e melhora as características de deságue do lodo, diminuindo o volume do lodo (Bae *et al.*, 2007).

A formação do polieletrólito aniônico ocorre a partir da copolimerização da acrilamida e ácido acrílico conforme apresentado na Figura 2.5:



Acrilamida Ácido acrílico Soda Cáustica Polímero aniônico

Figura 2.5: Reação de formação do polieletrólito aniônico.

2.6 Teste de jarro

Determinar a dosagem ótima de coagulante e auxiliar de coagulação (floculante) para o tratamento de um efluente é bastante complicado devido às complexas reações entre o coagulante químico utilizado e os contaminantes presentes no efluente. A forma mais utilizada para realizar o experimento é com o equipamento conhecido como *Jar-Test*, no qual são testados variadas dosagens de coagulantes em diferentes faixas de pH para obter-se o melhor custo-benefício no tratamento de efluentes.

O teste de jarro é o mais amplo modo de avaliar e o processo de floculação. Através dele, pode-se determinar o tempo e a agitação necessária, a condição ótima de coagulação/floculação de um efluente. A floculação determinada deve apresentar uma boa porcentagem no decaimento da turbidez após a decantação (Azevedo Neto *et al.*, 1976).

Devido a grande variedade de coagulantes existente no mercado e das desvantagens já conhecidas da utilização dos sais de alumínio e ferro na desestabilização de contaminantes, existem diversos estudos de testes de jarros no sentido de avaliar novos produtos de coagulação.

Na África do Sul foi realizado um estudo comparativo para a remoção de contaminantes orgânicos das águas da represa de *Saulspoort*. Diversos tipos de coagulante foram testados em teste de jarros, sulfato de alumínio, cloreto férrico, coagulantes combinados de cloreto férrico com o poliDADMAC, PAC, tanino, entre outros. O sulfato de alumínio e o policloreto de alumínio obtiveram resultados bastante satisfatórios na remoção de turbidez, porém não em remoção de matéria orgânica. Os coagulantes combinados de polialidimetilamônio e cloreto de ferro produziram uma curva de remoção bastante característica. O coagulante combinado, PAC e poliDADMAC, não obteve uma boa remoção para a maioria dos parâmetros analisados. O coagulante orgânico poliDADMAC foi ineficiente na remoção de contaminantes orgânicos (Polasek & Mutl, 2002).

Um estudo de teste de jarros foi realizado para investigar a formação, a ruptura e o crescimento após ruptura do floco formado a partir da coagulação. Foram utilizados dois coagulantes distintos, o poliDADMAC e o sulfato de alumínio (Yu *et al.*, 2010).

3 Materiais e Métodos

Neste capítulo são apresentados os materiais, equipamentos e metodologia utilizada na realização dos experimentos. O processo foi desenvolvido no laboratório da FAXON QUÍMICA LTDA em Novo Hamburgo.

3.1 Descrição da estação de tratamento de efluentes da empresa

O curtume no qual foi realizado o estudo de caso transforma o couro *wet-blue* em couro semi-acabado e acabado. A empresa está instalada no estado do Rio Grande do Sul. Utiliza em seu processo químico de processamento de peles a separação e reciclagem dos banhos de curtimento com sais de cromo.

O tratamento utilizado na estação segue basicamente o processo convencional de tratamento de efluentes, com pré-tratamento, tratamento primário, tratamento biológico e tratamento terciário.

No pré-tratamento são eliminados sólidos grosseiros, como retalhos de peles processadas, areia e sólidos de maior granulometria através processos físicos, a partir de um sistema de gradeamento e peneiramento.

A seguir, o efluente é encaminhado a um tanque de homogeneização com aeradores para manter o efluente sob agitação.

Com os resíduos líquidos totalmente misturados, o efluente passa pelo tratamento primário, no qual são adicionados produtos químicos para ajuste de pH, coagulação e floculação.

O ajuste de pH é feito com cal hidratada solubilizada em água. O pH do efluente que chega no tratamento primário é geralmente ácido, com pH de aproximadamente de 4,5 a 5,0. Na sequência é adicionado o coagulante químico, à base de sal de alumínio. E finalmente é acrescido um polímero aniônico de alta massa molar e média densidade de carga, para a formação de flocos maiores e posterior decantação. O lodo é encaminhado a um decantador.

O tratamento secundário é basicamente um tanque de 100 m² com 4 aeradores distribuídos ao longo de sua área. Nesse processo ocorre a degradação de compostos orgânicos pela ação das bactérias. Após o efluente é sedimentado, o lodo é misturado ao lodo primário e o clarificado é encaminhado ao tratamento de polimento.

Para finalizar e encaminhar o efluente ao seu destino final, este passa por coagulação e floculação química novamente (chamado tratamento terciário apesar de ser um primário empregado em um segundo momento), com os mesmos produtos, excetuando o ajuste de pH, utilizados no tratamento primário, uma vez que o pH está neutro, somente com dosagens bem mais reduzidas. Por fim, o líquido é levado a um decantador e o líquido tratado é despejado em um riacho.

A seguir seguem as Figuras 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 que mostram o tratamento de efluente do estudo de caso.



Figura 3.1: Decantador do tratamento primário.



Figura 3.2: Lagoa biológica, tratamento secundário.



Figura 3.3: Floculação no tanque do tratamento terciário.



Figura 3.4: Decantador do tratamento terciário.

3.2 Reagentes utilizados

Foram utilizados coagulantes combinados, policloreto de alumínio, polieletrólito aniônico, produtos para ajuste de pH. Todos os produtos foram fornecidos pela empresa FAXON QUÍMICA LTDA de Novo Hamburgo e seguem a seguir:

- Coagulante combinado 1 (Acquafloc AW8): mistura de ácido clorídrico, polidialildimetilamônio (poliDADMAC) e policloreto de alumínio (PAC) com 18% de alumínio ativo.

- Coagulante combinado 2 (Acquafloc AMB): mistura de ácido clorídrico, cloreto de dialildimetilamônio e sulfato de alumínio líquido.
- PAC (Acquafloc 18): Policloreto de alumínio com 18% de alumínio ativo.
- Cal Hidratada para ajuste de pH.
- Soda cáustica líquida 32% para o ajuste do pH.
- Polieletrólito (FX AS6): polímero aniônico de alta massa molar e média densidade de carga em pó.

Os coagulantes apresentados, por alguns serem uma combinação de compostos, possuem custos variados. O coagulante CC1 custa R\$ 1,70, o CC2 custa R\$ 1,20 e o PAC R\$ 1,20. O polieletrólito é o produto com maior valor agregado, R\$ 11,90. Já os reguladores de pH, cal hidratada custa R\$ 0,90 e o soda cáustica líquida a 32% custa R\$ 0,95. Todos os custos são por quilograma de produto e foram indicados pela empresa que os forneceu.

3.3 Ensaios de coagulação e floculação

3.3.1 Metodologia

Os ensaios de coagulação e floculação foram conduzidos em laboratório utilizando equipamentos de teste de jarro microprocessado, marca Milan. Nos experimentos realizados foram controlados a velocidade de agitação, o tempo de mistura e o tempo de sedimentação do lodo. Este equipamento possibilita realizar seis testes simultaneamente no qual é permitido a comparação visual do resultado final das amostras ensaiadas.

Em cada copo do equipamento do teste de jarro foi adicionada a mesma quantidade de efluente bruto, 500 ml. Durante o período de testes as amostras permaneceram sobre agitação rápida de 120 RPM nos 5 minutos iniciais. Com o auxílio de uma micropipeta de volume variável foram adicionados os coagulantes combinados 1 e 2 (CC1, CC2, respectivamente) e o PAC ao sistema. Devido ao pH do efluente bruto estar ácido foi necessário o ajuste com cal hidratada ou soda cáustica. Após acertar o pH em aproximadamente 6,0, as amostras foram deixadas em repouso durante 1 minuto. Após, iniciou-se a agitação lenta de 40 RPM durante 15 minutos para a adição do auxiliar de floculação (polieletrólito). Ao final da agitação as amostras foram deixadas em repouso de 30 minutos.

O procedimento descrito acima foi realizado em três etapas, a primeira para definir a dosagem aproximada de coagulante e o pH ótimo de coagulação para os coagulantes combinados. Na segunda, foi coletada uma nova amostra e comparado o desempenho dos coagulantes combinados, CC1 e CC2, e, na terceira, foi realizada uma nova batelada de ensaios comparando o desempenho do coagulante combinado que obteve os melhores resultados com o PAC, coagulante inorgânico.

a) Ensaios prévios para acerto de pH e dosagem de partida:

Na primeira etapa de testes, a amostra coletada serviu como ponto de partida para determinar o pH ótimo e uma dosagem de partida dos coagulantes combinados para a remoção de contaminantes. As dosagens testadas das combinações CC1 e CC2 foram de 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1500, 1600, 1700 mg/L, cal hidratada para ajuste de pH, e

adição de 8 mg/L de polieletrólito. Estas elevadas dosagens se justificam uma vez que o efluente de processamento de couros possui uma carga orgânica bastante elevada.

Para o ajuste do pH foi utilizado cal hidratada em pó. Foram realizados ensaios variando a faixa de pH com a dosagem de alcalinizante, após a adição do coagulante para verificar em qual ocorre a melhor desestabilização de colóides e formação de flocos. Os testes foram realizados com os coagulantes CC1 ou CC2, e polieletrólito aniônico, para a floculação.

b) Ensaios comparativos de coagulação e floculação entre os coagulantes CC1 e CC2:

Para a segunda batelada de ensaios foram realizados testes comparativos variando a dosagem dos coagulantes combinados. A partir dos resultados da primeira etapa foi possível definir quais as dosagens iniciais de coagulante, alcalinizante e floculante necessárias para a remoção de contaminantes das amostras. O pH permaneceu fixado no valor de melhor coagulação, apenas aumentaram as quantidades adicionadas de coagulantes e, caso necessário, de floculantes para melhorar a aglomeração das partículas. As dosagens de CC1 e CC2 foram aumentadas gradualmente para a verificação do produto com os resultados mais significativos em relação a remoção dos contaminantes. As amostras de clarificado sobrenadante foram filtradas com papel filtro. Cada ensaio foi caracterizado pelos parâmetros de DQO, cor, turbidez e pH e comparados.

c) Ensaios comparativos de coagulação e floculação entre o coagulante combinado e o PAC:

Com a definição do coagulante combinado com a melhor resposta em termos remoção de contaminantes, foram realizados testes comparativos bastante similares a segunda etapa, agora com a finalidade de comparar a melhor combinação de coagulante com o emprego de PAC. Com uma nova amostra coletada, foram feitos ensaios variando-se gradualmente a dosagem de coagulantes com o pH fixado. Os parâmetros analisados foram os mesmos.

4 Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos experimentos de coagulação e floculação, assim como a eficiência alcançada em cada ensaio, através da análise dos parâmetros de DQO, cor, turbidez e pH, além do aspecto visual.

4.1 Ensaio de coagulação e floculação

a) Ensaios prévios para acerto de pH e dosagem de partida:

Para os testes iniciais de determinação de pH ótimo e dosagem de partida de coagulante CC1 verificou-se para as dosagens de 900 a 1700 mg.L⁻¹ e após 30 minutos de sedimentação (Figura 4.1), o que segue:

- Com baixa dosagem (900mg.L⁻¹) de coagulante a coagulação foi parcial (Figura 4.1 (a));
- aumentando a dosagem de CC1 foi melhorando a remoção de sólidos do efluente;
- com quantidade maior de alcalinizante em pH elevado os flocos ficaram menores, com velocidade de sedimentação baixa e o volume de lodo produzido aumentou, chegando a aproximadamente 80% do volume para a dosagem de 1700 mg.L⁻¹, conforme a Figura 4.1 (c);
- os flocos tiveram melhor formação e sedimentaram melhor com pH entre 5,50 e 6,50 (Figura 4.1 (b)).

No entanto, devido à demora de solubilização do cal nas amostras e o elevado volume de lodo formado, atingindo 80% do volume total, não foi possível dar seguimento aos testes com a cal hidratada como regulador de pH.

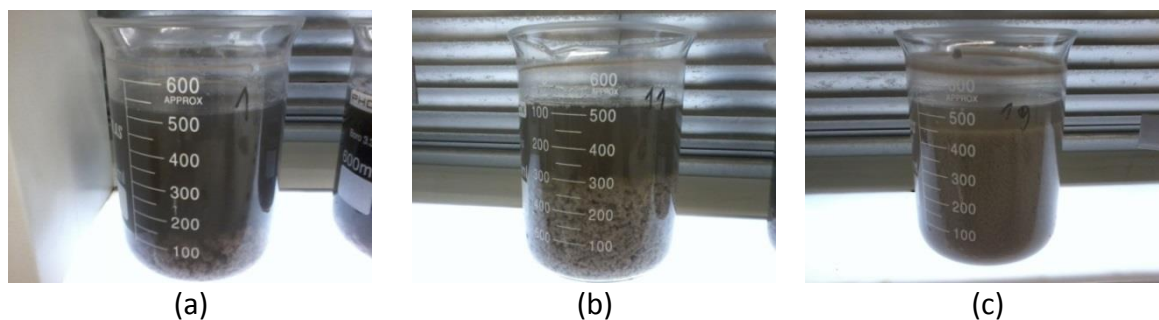


Figura 4.1: Ensaios de coagulação e floculação com cal hidratada, CC1 e polieletrólito.

Para os testes iniciais de coagulação e floculação com o coagulante CC2 verificou-se após 30 minutos de sedimentação (Figura 4.2, com dosagens crescentes de CC2 da esquerda para a direita) que não foi atingida uma dosagem adequada de coagulante, a dosagem de 1700 mg.L⁻¹ não foi suficientes para clarificar as amostras, e que o pH de melhor efeito ficou também entre 5,50 e 6,50.



Figura 4.2: Ensaios de coagulação e floculação com cal hidratada, CC2 e polieletrólito.

O aspecto visual dos ensaios realizados para determinação da faixa ótima de pH e dosagem de partida para os coagulantes são apresentados no Anexo A.

b) Ensaios comparativos de coagulação e floculação entre os coagulantes CC1 e CC2:

Na segunda etapa de ensaios foram realizados testes com dosagens mais elevadas de coagulante. Os efluentes brutos foram analisados a partir dos parâmetros de DQO, cor, turbidez e pH como mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Características analíticas do efluente bruto na segunda fase de testes.

Parâmetro	Unidade	Bruto
DQO	mg O ₂ .L ⁻¹	7187,70
Cor	uH	7000
Turbidez	NTU	2140,0
pH	-	4,42

Para o coagulante combinado 1 iniciou-se os testes de jarro com 1500 mg. L⁻¹, já para o combinado 2 iniciou-se com 2000 mg.L⁻¹. As dosagens dos produtos utilizados em cada ensaio da segunda fase de testes é apresentado na Tabela 4.2. Para essa nova batelada de ensaios foi substituído o alcalinizante para o ajuste do pH, onde foi utilizada a soda cáustica líquida de 32% de concentração. As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam os aspectos visuais de cada ensaio descrito anteriormente. As Tabelas 4.3 e 4.4 apresentam as análises analíticas de DQO, pH, cor e turbidez dos testes 1 a 11 das amostras filtradas com papel filtro.

Tabela 4.2: Dosagens dos produtos dos experimentos da segunda fase de testes.

Coagulante	Dosagem coagulante (mg.L ⁻¹)	Dosagem alcalinizante (mL)	Dosagem polieletrólito (mg.L ⁻¹)	Ensaio
Coagulante combinado 1	1500,0	0,6	8,0	Teste 1
	1750,0	0,6	8,0	Teste 2
	2000,0	0,8	8,0	Teste 3
	2500,0	0,6	10,0	Teste 4
	2750,0	0,6	12,0	Teste 5
	3000,0	0,6	12,0	Teste 6
Coagulante combinado 2	2000,0	0,6	8,0	Teste 7
	2500,0	0,6	8,0	Teste 8
	2750,0	0,7	8,0	Teste 9
	3000,0	0,8	8,0	Teste 10
	3500,0	0,8	8,0	Teste 11



(a) Teste 1



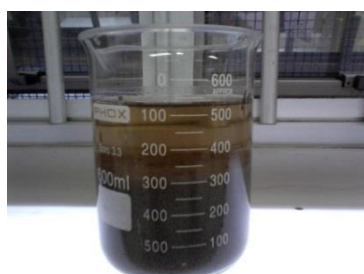
(b) Teste 2



(c) Teste 3



(d) Teste 4



(e) Teste 5



(f) Teste 6

Figura 4.3: Ensaio de coagulação e floculação com soda cáustica líquida, coagulante CC1 e polieletrólito.

Tabela 4.3: Análise de parâmetros da coagulação com o coagulante combinado 1.

Ensaio	Dosagem coagulante (mg.L ⁻¹)	DQO (mgO ₂ .L ⁻¹)	Cor (uH)	Turbidez (NTU)	pH
Teste 1	1500	2684,20	417	8,55	5,56
Teste 2	1750	2574,28	380	7,97	5,66
Teste 3	2000	2654,41	383	8,53	7,50
Teste 4	2500	2445,50	184	6,38	5,62
Teste 5	2750	2386,21	164	5,66	5,89
Teste 6	3000	2384,60	131	4,39	5,91



(a) Efluente bruto



(b) Teste 7



(c) Teste 8



(d) Teste 9



(e) Teste 10



(f) Teste 11

Figura 4.4: Ensaios de coagulação e floculação com soda cáustica líquida, CC2 e polieletrólito.

Tabela 4.4: Análise de parâmetros da coagulação com o coagulante combinado 2.

Ensaio	Dosagem coagulante (mg.L ⁻¹)	DQO (mgO ₂ .L ⁻¹)	Cor (uH)	Turbidez (NTU)	pH
Teste 7	2000,0	3234,50	1050	55,50	6,01
Teste 8	2500,0	3163,35	760	50,30	6,33
Teste 9	2750,0	2718,20	518	28,50	5,89
Teste 10	3000,0	2652,10	346	17,84	6,44
Teste 11	3500,0	2548,30	341	17,81	5,91

Para verificar a eficiência dos ensaios de teste de jarro montou-se a Tabela 4.5 onde são apresentados a remoção de DQO, cor e turbidez para cada ensaio. Percebe-se claramente que os ensaios que utilizaram o CC1 como coagulante atingiram maiores níveis de remoção química.

Tabela 4.5: Análise de remoção de parâmetros para os ensaios de coagulação CC1 e CC2.

Coagulante	Ensaio	Remoção de DQO (%)	Remoção de cor (%)	Remoção de turbidez (%)
CC1	Teste 1	62,65	94,04	99,60
	Teste 2	64,18	94,57	99,63
	Teste 3	63,07	94,53	99,60
	Teste 4	65,98	97,37	99,70
	Teste 5	66,80	97,66	99,73
	Teste 6	66,82	98,13	99,79
CC2	Teste 7	54,99	85,00	97,41
	Teste 8	55,98	89,14	97,65
	Teste 9	62,18	92,60	98,67
	Teste 10	63,10	95,06	99,17
	Teste 11	64,55	95,13	99,17

A partir da Tabela 4.5 é possível comparar a remoção para os dois coagulantes combinados: com uma dosagem de 3000 mg/L de CC1 (Teste 6) atingiu-se 66,82% de

remoção de DQO, 98,13% de remoção cor e 99,79% de remoção de turbidez; para a mesma dosagem do coagulante CC2 (Teste 10) atingiu-se 62,18% de remoção de DQO, 92,60% de cor e 98,67% de turbidez. Mesmo com uma dosagem mais elevada de coagulante (Teste 11) a remoção de contaminantes permaneceu inferior. Remoções similares foram atingidas no Teste 11 e o Teste 2, em que a dosagem de coagulante CC2 foi de 3500 mg.L⁻¹ enquanto que a de CC1 foi de 1750 mg.L⁻¹.

A diferença é significativa, uma vez que o teste de jarros seria uma simulação do tratamento físico-químico do curtume, e quanto maior a eficiência nessa etapa, o tempo de retenção no tratamento biológico seria menor (podendo tratar uma vazão maior de efluente), e seria necessário uma quantidade inferior de químicos no tanque de polimento (tratamento terciário). Devido aos resultados deu-se continuidade aos ensaios com o coagulante CC1.

Com relação aos custos de cada produto, comparou-se o melhor resultado do coagulante CC2 com o resultado mais aproximado, em relação às características analíticas, do coagulante CC1. Os ensaios comparados foram o Teste 11 (3500 mg.L⁻¹ de CC2) e o Teste 2 (1750 mg.L⁻¹ de CC1). A partir da relação de proporção, considerando os custos por quilograma de produto, para cada tonelada de efluente tratado seriam necessários 1,75 kg de CC1, com um custo de R\$ 2,98, já para o coagulante CC2, seriam necessários 3,5 kg com um custo de R\$ 4,20.

c) Comparação do Coagulante Combinado com o PAC

Com a definição do melhor coagulante combinado, foi realizada a terceira fase de ensaios. As dosagens de do coagulante CC1 foram praticamente as mesmas, 2250, 2500, 2750, 3000 e 3250 mg.L⁻¹. A definição da dosagem dos ensaios em que o coagulante era o PAC foi definida a partir de testes prévios, na mesma faixa de pH, 5,50 a 6,50. Aqueles que obtiveram a melhor clarificação foram analisados, as dosagens de PAC escolhidas foram 2500, 2750, 3000, 3250 e 3500 mg.L⁻¹.

Para realizar uma nova batelada de ensaios foi coletada uma nova amostra com características analíticas diferentes da primeira, como mostra a Tabela 4.6. Pode-se perceber que alguns parâmetros estão com variações significativas, principalmente a DQO e o pH. O motivo dessa variação foi que o curtume está passando por mudanças na sua produção. Anteriormente, o curtume possuía uma filial que realizava o recurtimento com tanino vegetal, agora, essa prática foi transferida para a matriz, empresa na qual o efluente foi coletado, então algumas variações estão ocorrendo, principalmente no efluente gerado.

Tabela 4.6: Características analíticas do efluente bruto na segunda fase de testes.

Parâmetro	Unidade	Bruto
DQO	mg O ₂ .L ⁻¹	4523,20
Cor	uH	9020,0
Turbidez	NTU	1898,0
pH	-	6,85

As dosagens dos produtos utilizados na terceira fase de testes é apresentado na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Dosagens dos produtos dos experimentos da terceira fase de testes.

Coagulante	Dosagem coagulante (mg.L ⁻¹)	Dosagem alcalinizante (mL)	Dosagem polieletrólito (mg.L ⁻¹)	Ensaio
Coagulante combinado 1	2250	0,2	8,0	Teste 12
	2500	0,2	8,0	Teste 13
	2750	0,2	10,0	Teste 14
	3000	0,25	8,0	Teste 15
	3250	0,25	8,0	Teste 16
Policloreto de alumínio	2500	0,2	8,0	Teste 17
	2750	0,2	8,0	Teste 18
	3000	0,23	8,0	Teste 19
	3250	0,25	8,0	Teste 20
	3500	0,25	8,0	Teste 21

A Figura 4.5 apresenta o aspecto visual dos testes de jarro com o coagulante combinado 1 e do efluente bruto e a Figura 4.6 apresenta o resultado visual dos ensaios com o PAC como coagulante. Nas Tabelas 4.8 e 4.9 estão os resultados das análises feitas no efluente clarificado e filtrado.

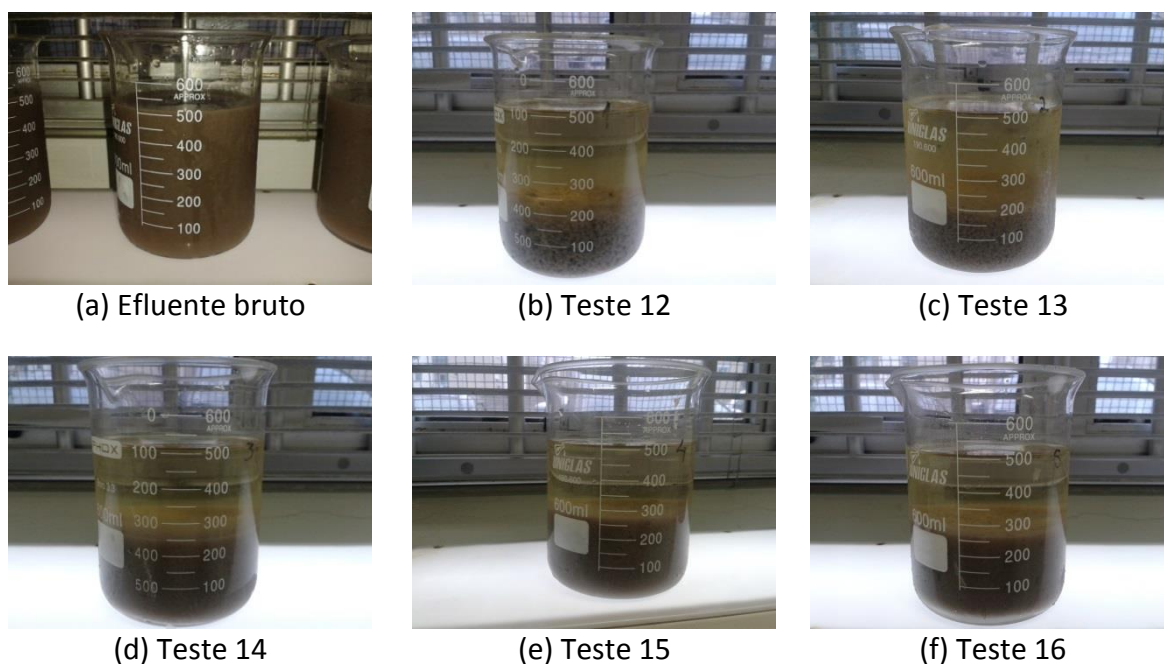


Figura 4.5: Aspecto visual dos ensaios com o coagulante CC1 e o efluente bruto.

Tabela 4.8: Análise de parâmetros de coagulação e floculação com o coagulante combinado 1.

Ensaio	Dosagem coagulante (mg.L ⁻¹)	DQO (mgO ₂ .L ⁻¹)	Cor (uH)	Turbidez (NTU)	pH
Teste 12	2250,0	1890,70	67,0	5,80	6,42
Teste 13	2500,0	1735,00	65,0	3,25	6,45
Teste 14	2750,0	1730,6	64,0	3,10	6,18
Teste 15	3000,0	1647,1	62,0	3,05	6,26
Teste 16	3250,0	1610,73	60,0	2,2	6,45

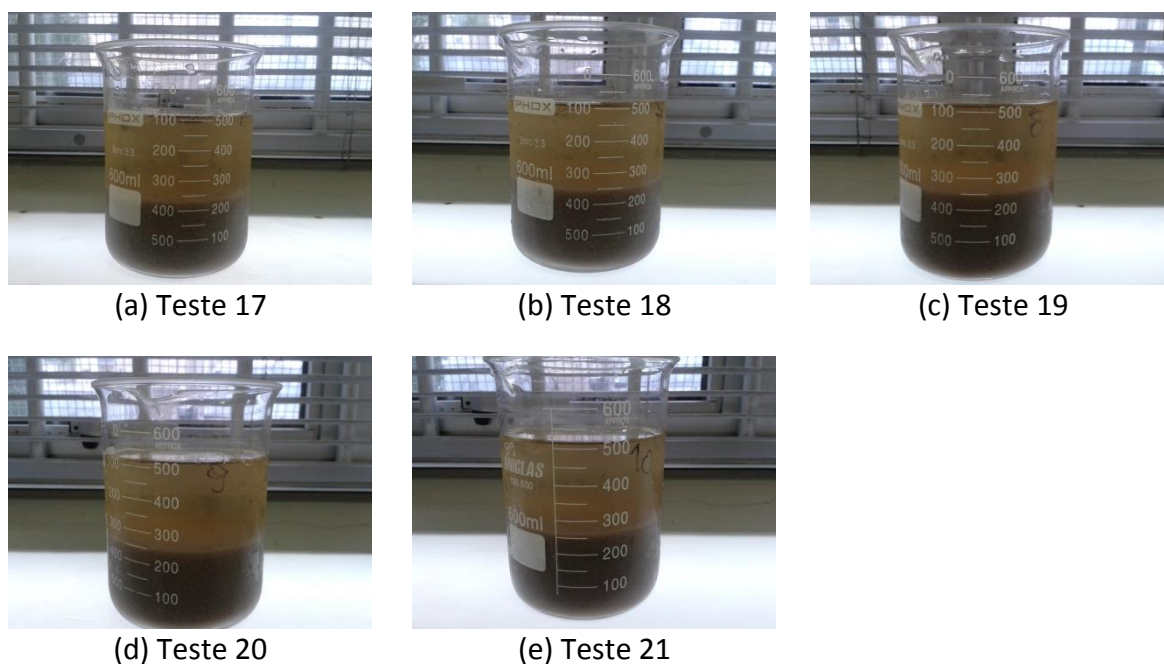


Figura 4.6: Aspecto visual dos ensaios com o coagulante PAC.

Tabela 4.9: Análise de parâmetros de coagulação e floculação com o coagulante PAC.

Ensaio	Dosagem coagulante (mg.L ⁻¹)	DQO (mgO ₂ .L ⁻¹)	Cor (uH)	Turbidez (NTU)	pH
Teste 17	2500,0	1897,42	117,0	6,3	6,14
Teste 18	2750,0	1896,20	107,0	4,8	6,26
Teste 19	3000,0	1860,20	103,0	3,45	6,15
Teste 20	3250,0	1843,70	102,0	3,19	6,12
Teste 21	3500,0	1825,50	98,0	2,99	6,25

A partir dos dados apresentados foi possível verificar que os ensaios com o coagulante CC1 obtiveram resultados mais satisfatórios em comparação com o coagulante puro PAC. A Tabela 4.10 analisa a remoção dos parâmetros para cada ensaio.

Tabela 4.10: Análise de remoção de parâmetros para os ensaios de coagulação CC1 e PAC.

Coagulante	Ensaio	Remoção de DQO (%)	Remoção de cor (%)	Remoção de turbidez (%)
CC1	Teste 12	58,20	99,26	99,69
	Teste 13	61,64	99,28	99,83
	Teste 14	61,74	99,29	99,84
	Teste 15	63,58	99,31	99,84
	Teste 16	64,39	99,33	99,88
PAC	Teste 17	58,05	98,70	99,66
	Teste 18	58,08	98,81	99,75
	Teste 19	58,87	98,86	99,82
	Teste 20	59,24	98,87	99,83
	Teste 21	59,64	98,91	99,84

Decorrente dos resultados, apresentados o ensaio que obteve os melhores resultados em termos de remoção foi o Teste 16, com 64,39% de remoção de DQO, 99,33% de cor e 99,88% de turbidez com o CC1. Para a mesma dosagem de PAC (Teste 20) atingiu-se 59,24% de remoção de DQO, 98,87% de cor e 99,83% de turbidez. Novamente os ensaios com o coagulante CC1 foram aqueles que melhor clarificaram a amostra. O melhor resultado de remoção atingido pelo PAC (Teste 21) foi inferior ao Teste 13, em que foram dosados 2500 mg.L⁻¹ de coagulante contra 3500 mg.L⁻¹ do PAC.

Com relação ao custo dos produtos utilizados, novamente relacionando apenas o valor dos coagulantes, para cada tonelada de efluente tratado seriam necessários 2,4 kg de CC1 com um custo de R\$ 4,08. Já para o coagulante PAC seriam necessários 3,5 kg com um custo de R\$4,20. Foi utilizado um valor intermediário de dosagem no CC1 pois os valores atingidos por 3500 mg.L⁻¹ de PAC foram entre 2250 e 2500 mg.L⁻¹ de CC1.

5 Conclusões

O objetivo principal deste trabalho foi realizar uma simulação, através da técnica do teste de jarros, do tratamento primário de um estudo de caso de um efluente de curtume. Foram realizados ensaios comparativos de coagulação química com coagulantes combinados e coagulante formado por sais metálicos. O efluente escolhido foi de uma empresa de processamento de couros (curtume), caracterizado por possuir uma elevada carga orgânica e por consumir uma quantidade bastante alta de produtos químicos no tratamento de efluentes.

Devido aos variados problemas decorrentes da utilização de sais de alumínio e ferro na coagulação química do tratamento de efluente existem variados estudos de produtos químicos e procedimentos que substituam a utilização desses sais metálicos. Como coagulantes orgânicos atuam na coagulação química por mecanismos diferentes, estes não atingem os mesmos resultados de remoção que os sais inorgânicos. Então coagulantes combinados estão sendo testados atualmente e estão apresentando resultados satisfatórios, uma vez que atuam na coagulação por dois mecanismos, o que diminui a quantidade de produto adicionada ao meio e reduz a quantidade de produtos que não são biodegradáveis.

No decorrer do desenvolvimento experimental foi necessário realizar uma série de etapas de trabalho. Como pode-se perceber, no desenvolvimento da etapa experimental foi necessário realizar três coletas de amostras de efluentes na empresa.

Na primeira etapa de testes, não foram analisados parâmetros analíticos, pois os resultados não foram muito satisfatórios. Nas outras duas as amostras foram analisadas e pelos resultados pode-se notar que ocorreu uma grande diferença entre as amostras, enquanto a segunda possuía $7187,70 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ de DQO, 7000 uH de cor e pH de 4,42, a terceira amostra possuía $4523,20 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ de DQO, 9020 uH de cor e pH de 6,85 (o parâmetro de turbidez apresentou resultados aproximados, 2140,0 e 1898,0 NTU, respectivamente). Essa variação é decorrente das mudanças que estão ocorrendo na empresa, o curtume possuía uma filial que foi fechada durante o período de testes, como o recurtimento de peles com tanino vegetal ocorria na outra sede e passou para a matriz, provavelmente esse produto está ocasionando a variação no efluente bruto.

Na primeira batelada de experimentos foram realizados ensaios comparativos de teste de jarros entre o coagulante combinado 1 com o combinado 2. Para ajuste de pH foi utilizado cal hidratada. No entanto, com o aumento das dosagens dos coagulantes foi necessário uma grande quantidade de alcalinizante. Pode-se verificar que ocorreu uma formação de elevada camada de lodo, em alguns casos com o aumento da dosagem, o lodo passou dos 80% do volume no jarro após 30 minutos de sedimentação, inviabilizando a sequência dos ensaios, uma vez que com o aumento da quantidade de coagulante, o volume de lodo seria ainda maior. Nessa etapa pode-se concluir que o pH ótimo de dosagem foi entre 6,00 e 6,50, devido a quantidade de lodo formado e a formação do floco após a dosagem do polieletrólito. O neutralizante foi alterado, para a sequência de testes foi utilizado soda cáustica líquida a 32% de concentração.

Na segunda fase de ensaios, foi comparada a remoção de contaminantes da amostra, pela técnica do teste de jarros, do coagulante combinado 1 com o coagulante combinado 2. As análises foram satisfatórias, uma vez que foi possível verificar a remoção gradual de contaminantes com o aumento da dosagem do coagulante. Para o combinado 1 obteve-

se uma remoção de 66,82% de DQO, 98,13% de remoção de cor, 99,79% de remoção de turbidez, com uma dosagem de 3000 mg.L⁻¹ de coagulante, 0,6 mL de alcalinizante e 12 mg/L de polieletrólito. Paralelamente, o coagulante combinado 2 obteve 64,55% de remoção de DQO, 95,13% de remoção de cor, 99,17% de remoção de turbidez. No aspecto visual de cada ensaio ficou bastante nítido que o coagulante combinado 1 atingiu uma maior clarificação.

A partir destes resultados pode-se concluir que os ensaios com o coagulante combinado 1 foram mais satisfatórios, já que foram atingidos níveis maiores de remoção com uma dosagem inferior de coagulante.

Na terceira fase de ensaios foi comparado a remoção de sólidos da amostra pela técnica de jarros com o coagulante CC1 e PAC. Novamente o coagulante combinado 1 apresentou resultados mais significativos, com 64,39% de remoção de DQO, 99,33% de cor e 99,88% de turbidez. Enquanto o PAC obteve 59,64% de remoção de DQO, 98,91% de cor e 99,84% de turbidez com uma dosagem superior. Visualmente o coagulante CC1 apresentou uma maior clarificação nos ensaios.

Com relação aos custo-benefício dos produtos, considerando apenas o valor dos coagulantes, conclui-se que o coagulante combinado 1 foi o melhor, apesar de ser o com maior valor agregado. Na segunda etapa, para uma remoção aproximada, o custo do CC1 para cada tonelada de efluente tratado foi de R\$ 2,98, já para o CC2 foi de R\$ 4,20. Na terceira etapa o custo por tonelada de efluente tratado foi de R\$ 4,08 para o coagulante CC1 e R\$ 4,20 para o coagulante PAC, indicando um maior custo-benefício para o CC1, considerando apenas o valor de cada produto.

Por fim, é possível concluir que os resultados com o coagulante combinado 1 e 2 obtiveram resultados bastante satisfatórios para as amostras do efluente do estudo de caso. O coagulante CC1 apresentou resultados de remoção mais significativos que qualquer outro coagulante estudado, a proposta de utilizar um coagulante combinado que utiliza dois mecanismos de coagulação química em conjunto, com uma quantidade menor de sais de alumínio deve ser considerada em estudos e aplicações futuras.

6 Referências

ⁱABQTIC (Associação Brasileira dos Químicos e Técnicos da Indústria do Couro). *Guia Brasileiro do Couro*, 2011.

ABQTIC (Associação Brasileira dos Químicos e Técnicos da Indústria do Couro). *Guia Brasileiro do Couro*, 2009.

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

AZEVEDO NETTO, J. M. *Técnicas de abastecimento e tratamento de água*. v. 2: CETESB, São Paulo, 1976.

AZEVEDO NETTO, J. M.; MANFRINI, C.; CAMPOS J.R.; POVINELLI J.; PARLATORE, A. C.; HESPANHOL, I.; ROSSINI, A.C.; YAGUINUMA, S. *Técnicas de abastecimento e tratamento de água*. 2^a ed. v.2, São Paulo, CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1979.

BAE, Y. H.; KIM, H. J.; LEE, E. J.; SUNG, N. C.; LEE, S. S.; KIM, Y. H. *Potable water treatment by polyacrylamide base flocculants, couple with an inorganic coagulant*. Department of Chemical Engineering, Dong-A University, Busan, Coreia do Sul, 2007.

BRANCO, S. M. Água e o homem. In. *Hidrologia Ambiental*. v. 3, São Paulo: Edusp. 1991.

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

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.

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

ENTRY, J. A.; SOJKA, R. E.; WATWOOD, M.; ROSS, C. *polyacrylamide preparations for protection of water quality threatened by agricultural runoff contaminants*. Environment Pollution, 2002.

FIORENTINI, V. *Uso do tanino no processo de Água como Melhoria em Sistema de Gestão Ambiental*. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

GUTTERRES, M.; PASSOS, J. B.; FRIEDRICH, D. *Uso da água e caracterização das correntes parciais residuais de curtumes*. *Tecnicouro*, Novo Hamburgo, v. 27, n.03, p. 68-72, 2005.

GUTTERRES, M. *A Ciência rumo à Tecnologia do Couro*. 1. ed. Porto Alegre: Tríplex Assessoria e Soluções Ambientais, ISBN 078-85-61980-00-9, p. 119 e 254, 2008.

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

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

MENDES, G. G. N. *Estudo de coagulação e floculação de água sintéticas e naturais com turbidez e cor variáveis*. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia São Carlos. Universidade do Estado de São Paulo. São Carlos, 1989.

MURUGANANTHAN, M.; RAJU, G. B.; PRABHAKAR, S. *Separation of pollutants from tannery effluents by electro flotation*. *Separation and Purification Technology*, v. 40, n. 1, 2004.

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

POLASEK, P.; MUTL, S.; *Cationic polymers in water treatment*. *Water SA*. v. 28. Cidade do Cabo. África do Sul, 2002.

SANTOS, E. P. C. C.; TEIXEIRA, A. R.; ALMEIDA C. P.; LIBÂNIO, M.; PÁDUA, V. L. *Estudo da coagulação aplicada à filtração direta descendente*. *Engenharia Sanitária Ambiental*, v. 12, n. 4, 2007.

SANTOS FILHO, J. D., SANTA MARIA, E. S. *Gerenciamento de Resíduos Gerado na Clarificação de Água da RLAM*. Universidade Federal da Bahia – Escola Politécnica, 2002.

SPINELLI, V. A. *Quitossana: Polieletrólito Natural para o Tratamento de água Potável*. Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

SRIVASTAVA, V. C.; MALL, I. D.; MISHRA, I. M. *Treatment of pulp and paper mill wastewater with poly aluminum chloride and bagasse fly ash*. *Colloids and surfaces* 260, 17-28; 2005.

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

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

YU, W.; GREGORY, J.; CAMPOS, L. C.; *Breakage and re-growth of flocs formed by charge neutralization using alum and polyDADMAC*. *Water Research* 44. Londres. Inglaterra.

WINTER, C. *Avaliação analítica de proteínas e gorduras para detecção de constituintes da pele em meios aquosos*. Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Orientador: Mariliz Gutterres Soares, 2011.

7 Anexo A

A Figura 7.1 apresenta os ensaios realizados para a primeira fase de testes com o coagulante combinado 1, cal hidratada e polieletrólito aniônico, e efluente bruto. Cada ensaio é indicado pela quantidade de coagulante dosado.



(a) Efluente bruto



(b) 900 mg.L⁻¹



(c) 1000 mg.L⁻¹



(d) 1100 mg.L⁻¹



(e) 1200 mg.L⁻¹



(f) 1300 mg.L⁻¹



(g) 1400 mg.L⁻¹



(h) 1500 mg.L⁻¹



(i) 1600 mg.L⁻¹



(j) 1700 mg.L⁻¹

Figura 7.1: Ensaios de coagulação e floculação na primeira fase de testes, coagulante CC1.

A Figura 7.2 apresenta os ensaios realizados com o coagulante combinado 2. Os ensaios são indicados pela dosagem de coagulante utilizado.

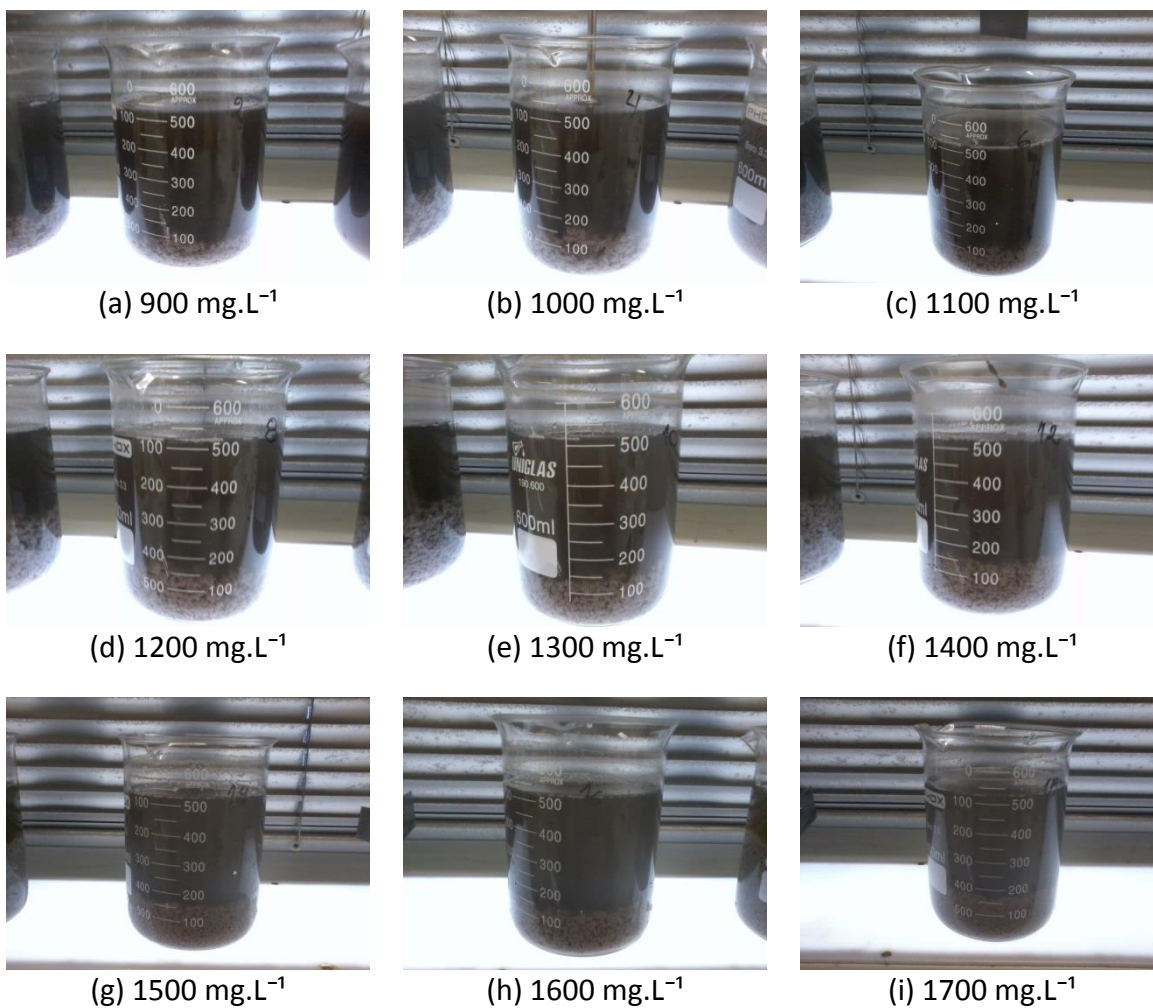


Figura 7.2: Ensaio de coagulação e floculação na primeira fase de testes, coagulante CC2.
