

JULIANA GARDENALLI DE FREITAS

**VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA REGENERAÇÃO  
DE COAGULANTES A PARTIR DE LODOS GERADOS EM  
ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de  
São Paulo para obtenção do título  
de Mestre em Engenharia

São Paulo

2004

OK

JULIANA GARDENALLI DE FREITAS

**VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA REGENERAÇÃO  
DE COAGULANTES A PARTIR DE LODOS GERADOS EM  
ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de  
São Paulo para obtenção do título  
de Mestre em Engenharia

Área de Concentração:  
Engenharia Hidráulica e Sanitária

Orientador:  
Prof. Associado  
Sidney Seckler Ferreira Filho

São Paulo

2004

FD - 3864

FICHA CATALOGRÁFICA

**Freitas, Juliana Gardenalli de**  
**Viabilidade técnica e econômica da regeneração de**  
**coagulantes a partir de lodos gerados em estações de trata-**  
**mento de água / Juliana Gardenalli de Freitas. -- São Paulo,**  
**2004.**

146 p.

**Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade**  
**de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e**  
**Sanitária.**

**1. Lodo 2. Tratamento de água 3. Regeneração de coagu-**  
**lantes I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Depar-**  
**tamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária II. t.**

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Sidney, por todos os valiosos conselhos, que iniciaram antes e foram além dessa pesquisa de mestrado.

A todos da SABESP - ETA Guaraú e ETA Rio Grande - por fornecerem a matéria prima da pesquisa e muitas informações, sem as quais esse trabalho não poderia ter sido realizado.

À Marycel Cotrim e à Profª Drª Maria Aparecida Faustino Pires, do IPEN - CQMA, pela realização de análises químicas que permitiram a obtenção, de maneira mais precisa, de dados fundamentais para a realização desse estudo.

Ao Wanderley Ferreira da Kemwater Brasil, por ter me recebido com boa vontade e compartilhado o seu conhecimento.

Ao Silvio Parisi da SABESP, por todas as informações fornecidas.

Aos funcionários do Laboratório de Saneamento e do Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, pela paciência, explicações e ajuda nas horas difíceis.

Ao Prof. Roque, pelos conselhos, ajuda, incentivo, e principalmente, pela companhia.

À Projectus Consultoria Ltda., por ter permitido e incentivado a realização do mestrado juntamente com a minha atividade profissional.

Ao Vicente, pelo apoio que possibilitou a continuidade dessa pesquisa e, principalmente, pela divertida e enriquecedora convivência.

À Cassandra, pelo suporte técnico e amizade, me socorrendo nos momentos complicados. Aos meus pais, à Lia e ao Marcelo, por terem compartilhado esse momento e tornado tudo mais fácil e divertido.

## RESUMO

Esse trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade técnica e econômica da regeneração de coagulantes a partir de lodos gerados em ETA's, tendo em vista o uso dos coagulantes regenerados em sistemas de tratamento de esgotos. A regeneração de coagulantes consiste basicamente em promover uma alteração no pH do lodo, de forma a solubilizar os hidróxidos metálicos presentes. A fase líquida com alta concentração de metais é então separada, constituindo o coagulante regenerado. Essa tecnologia propicia a recuperação de um recurso, que é o coagulante, e a redução de lodo a ser tratado e disposto.

Para a verificação da viabilidade técnica foram realizados ensaios de acidificação em escala de bancada com lodos das ETA's Guaraú e Rio Grande, visando o estudo das condições de regeneração, da qualidade do coagulante produzido e do lodo restante.

Foi verificado que do ponto de vista técnico a regeneração de coagulantes é uma alternativa possível, gerando um coagulante aproximadamente 100 vezes mais diluído que os comerciais, mas com desempenho satisfatório na aplicação no tratamento de efluentes de reator UASB. As reduções médias de sólidos em suspensão nos lodos das ETA's Rio Grande e Guaraú foram de 53% e 28%, respectivamente. A avaliação econômica foi realizada a partir dos resultados obtidos dos ensaios de bancada, considerando uma ETA com características similares à ETA Rio Grande. Foi verificado que considerando as reduções de custos decorrentes da diminuição de lodo a ser tratado e disposto, o custo de produção do coagulante regenerado é muito próximo ao custo do coagulante comercial.

Portanto, conclui-se que hoje em dia essa tecnologia deve ser considerada como uma alternativa potencialmente viável dos pontos de vista técnico e econômico para o tratamento e reaproveitamento de lodo de ETA's.

## ABSTRACT

The primary goal of this work was to evaluate the technical and economical feasibility of coagulant recovery from water treatment plant sludges, considering that the recovered coagulant is going to be used in wastewater treatment plants. The coagulant recovery technology consists in change the sludge pH, in order to solubilize the present metal hydroxides. The liquid phase with high metals concentrations is then separated, becoming the recovered coagulant. This technology provides a resource recovery, which is the coagulant, and also a reduction in the amount of sludge that needs to be treated and disposed.

To verify the technical feasibility, acidification bench tests were conducted using sludges from Guaraú e Rio Grande water treatment plants, in order to study the regeneration conditions, the recovered coagulant quality and the remaining sludge.

From the technical point of view, it was verified that coagulant recovery is a possible alternative, producing a coagulant 100 times more diluted than the commercial coagulant, but with a satisfactory behavior in the treatment of UASB reactor effluent. The suspended solids average reductions in the Rio Grande and Guaraú water treatment plants sludges were 53% and 28%, respectively. The economical evaluation was done using the results obtained in the bench tests and considering a water treatment plant similar to Rio Grande. It was verified that considering the costs decrease due to the sludge reduction, the recovered coagulant production cost was very similar to commercial coagulants cost.

Thus, it was concluded that nowadays this technology must be considered as a potential alternative for the treatment and reuse for water treatment plant sludges, regarding to the technical and economical aspects.

# SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1.	INTRODUÇÃO .....	1
2.	OBJETIVOS .....	4
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
3.1	GERAÇÃO DE LODOS EM ETA'S .....	5
3.1.1	<i>Concepção de Sistemas de Tratamento de Água Convencionais</i> .....	5
3.1.2	<i>Características e Avaliação Quantitativa da Geração de Resíduos</i> .....	17
3.1.3	<i>Possibilidades para a Utilização e Tratamento dos Resíduos</i> .....	21
3.2	COAGULANTES .....	27
3.2.1	<i>Principais Tipos e Fontes de Origem</i> .....	27
3.2.2	<i>Comportamento Químico dos Coagulantes Sais Metálicos Simples</i> .....	36
3.3	REGENERAÇÃO DE COAGULANTE.....	39
3.3.1	<i>Objetivos</i> .....	39
3.3.2	<i>Princípios e Tecnologia</i> .....	40
3.3.3	<i>Contaminantes</i> .....	47
3.3.4	<i>Viabilidade Técnica e Econômica</i> .....	50
3.4	PROCESSOS FÍSICO-QUÍMICOS PARA O TRATAMENTO DE ESGOTOS .....	53
4.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	59
4.1	COLETA DAS AMOSTRAS DE LODO .....	59
4.2	REGENERAÇÃO DO COAGULANTE .....	66
4.2.1	<i>Descrição do Ensaio</i> .....	66
4.2.2	<i>Definição de Condições para a Realização dos Ensaios</i> .....	68
4.2.3	<i>Estudo da Regeneração de Coagulante em Ensaio de Bancada</i> .....	69
4.3	CARACTERIZAÇÃO DO COAGULANTE OBTIDO.....	72
4.3.1	<i>Análise da Concentração do Metal de Interesse (Alumínio ou Ferro) no Coagulante</i> 72	
4.3.2	<i>Análise da Concentração de Contaminantes no Coagulante:</i> .....	73
4.3.3	<i>Ensaio em Escala de Bancada</i> .....	74

4.4	CARACTERIZAÇÃO DO LODO RESULTANTE.....	76
5.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS..	78
5.1	REGENERAÇÃO DO COAGULANTE.....	78
5.1.1	<i>Condições de Realização dos Ensaios.....</i>	78
5.1.2	<i>Estudo da Regeneração de Coagulante em Ensaio de Bancada.....</i>	80
5.2	CARACTERIZAÇÃO DO COAGULANTE.....	97
5.2.1	<i>Análise da Concentração do Metal de Interesse (Alumínio ou Ferro) no Coagulante.....</i>	97
5.2.2	<i>Análise da Concentração de Contaminantes no Coagulante:.....</i>	101
5.2.3	<i>Ensaios em Escala de Bancada.....</i>	106
5.3	CARACTERIZAÇÃO DO LODO RESULTANTE.....	116
6.	AVALIAÇÃO ECONÔMICA.....	123
6.1	METODOLOGIA.....	124
6.2	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	129
6.2.1	<i>Obtenção das Variáveis de Cálculo.....</i>	129
6.2.2	<i>Comparação entre Custos do Coagulante Comercial e Regenerado.....</i>	132
7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS.....	137
8.	LISTA DE REFERÊNCIAS.....	140



## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 –Características do Sulfato de Alumínio Comercial pela EB-2005.....	32
Tabela 3.2 – Sulfato Férrico: Características Estabelecidas por Alguns Clientes e Fabricantes .....	33
Tabela 3.3 – Limite de Concentração de Substâncias Tóxicas em Coagulantes: Sulfato de Alumínio.....	34
Tabela 3.4 – Limite de Concentração de Substâncias Tóxicas em Coagulantes: Sulfato Férrico .....	35
Tabela 3.5 – Concentrações de Metais nos Coagulantes Comerciais.....	36
Tabela 3.6 – Concentrações de Alumínio Obtidas em Coagulantes Regenerados ....	50
Tabela 4.1 – Características das ETA's .....	66
Tabela 4.2 – Condição de Realização dos Ensaios Preliminares P1 a P4.....	68
Tabela 4.3 – Condições Adotadas para a Realização dos Ensaios 1 a 3.....	69
Tabela 4.4 – Ensaios Realizados com Tempo Variável (1).....	70
Tabela 4.5 – Ensaios Realizados com Tempo Variável (2).....	71
Tabela 4.6 – Ensaios Realizados com pH Variável.....	72
Tabela 4.7 – Condições para Obtenção dos Coagulantes Regenerados.....	74
Tabela 4.8 – Condições de Realização dos Ensaios tipo <i>jar-test</i> .....	75
Tabela 5.1 – Ensaios Preliminares P1 a P4.....	78
Tabela 5.2 – Resultados Obtidos no Ensaio R1 .....	79
Tabela 5.3 – Resultados Obtidos nos Ensaios 1 a 3.....	81

Tabela 5.4 – Condições de Realização dos Ensaios com Tempo Variável .....	82
Tabela 5.5 – Resultados Obtidos no Ensaio R4 .....	82
Tabela 5.6 – Resultados Obtidos no Ensaio G4.....	83
Tabela 5.7 – Resultados Obtidos no Ensaio R5 .....	86
Tabela 5.8 – Resultados Obtidos no Ensaio G5.....	86
Tabela 5.9 – Resultados Obtidos no Ensaio R6 .....	89
Tabela 5.10 – Resultados Obtidos no Ensaio G6.....	90
Tabela 5.11 – Resultados de Análises de Metais por Métodos Colorimétricos.....	98
Tabela 5.12 – Resultados das Análises de Fe e Al nos Coagulantes Obtidos a Partir do Lodo da ETA – Guaraú.....	99
Tabela 5.13 – Resultados das Análises de Fe e Al nos Coagulantes Obtidos a Partir do Lodo da ETA – Rio Grande .....	100
Tabela 5.14 – Comparação entre as Concentrações de Fe no Coagulante Regenerado e no Coagulante Comercial.....	101
Tabela 5.15 – Resultados das Análises de Metais .....	102
Tabela 5.16 – Razão entre a Concentração do Contaminante e a Concentração de Fe, para Coagulantes Comerciais e Regenerados .....	105
Tabela 5.17 – Ensaios para Geração de Coagulante Regenerado .....	106
Tabela 5.18 – Resultados do Ensaio R7.....	107
Tabela 5.19 – Resultados do Ensaio R8.....	107
Tabela 5.20 – Resultados do Ensaio R9.....	108
Tabela 5.21 – Resultados do Ensaio R10.....	108

Tabela 5.22 – Resultados Obtidos de Teor de Sólidos .....	116
Tabela 5.23 – Resultados das Análises das Concentrações de Sólidos em Suspensão nos Ensaios com Lodo da ETA Guaraú.....	117
Tabela 5.24 – Resultados das Análises das Concentrações de Sólidos em Suspensão nos Ensaios com Lodo da ETA Rio Grande .....	118
Tabela 5.25 – Redução de SST: Ensaios com Lodo da ETA Guaraú.....	119
Tabela 5.26 – Redução de SST: Ensaios com Lodo da ETA Rio Grande .....	119
Tabela 5.27 – Redução de SS Observada e Esperada.....	120
Tabela 6.1 – Dados de Entrada Utilizados no Balanço de Massa.....	128
Tabela 6.2 – Resumo dos Valores das Variáveis do Grupo 1.....	129
Tabela 6.3 – Balanço de Massa: Valores Obtidos .....	130
Tabela 6.4 – Resumo dos Valores das Variáveis do Grupo 2.....	130
Tabela 6.5 – Resumo dos Valores das Variáveis do Grupo 3.....	132

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – ETA Convencional .....	6
Figura 3.2 – Vias de Reação dos Produtos da Hidrólise dos Coagulantes de Sais Metálicos .....	9
Figura 3.3 – Decantadores na ETA Guaraú .....	12
Figura 3.4 – Projeto de Filtro para ETA .....	14
Figura 3.5 – Arranjo Possível para o Tratamento da Fase Sólida.....	24
Figura 3.6 – Centrífuga.....	26
Figura 3.7 – Filtro Prensa de Placas.....	26
Figura 3.8 – Fluxograma de Produção do Sulfato Férrico.....	30
Figura 3.9 – Diagrama de Solubilidade do Alumínio .....	38
Figura 3.10 – Diagrama de Solubilidade do Ferro.....	38
Figura 3.11 – Arranjo Possível de Sistema para Regeneração de Coagulante .....	45
Figura 3.12 – Diagrama de Solubilidade para Alguns Metais .....	48
Figura 3.13 – Diagrama de Solubilidade do $\text{FePO}_4$ e $\text{AlPO}_4$ .....	55
Figura 3.14 – Configurações Possíveis para Remoção de Fósforo.....	56
Figura 4.1 – Sistemas Produtores da RMSP .....	59
Figura 4.2 – Vista da ETA Guaraú .....	60
Figura 4.3 – Vista da ETA Rio Grande.....	61
Figura 4.4 – ETA Guaraú: Vista dos Decantadores e Floculadores .....	62
Figura 4.5 – ETA Guaraú: Local de Coleta de Lodo .....	63

Figura 4.6 – ETA Rio Grande: Sistema de Remoção de Lodo dos Decantadores.....	64
Figura 4.7 – ETA Rio Grande: Ponto de Coleta de Lodo.....	64
Figura 4.8 – ETA Rio Grande: Ponto de Aplicação do Coagulante .....	65
Figura 4.9 – Equipamento para Filtração do Lodo Acidificado .....	67
Figura 4.10 – Etapas de Realização de <i>Jar-test</i> (fotos do <i>jar-test</i> 10).....	75
Figura 5.1 – Resultados do Ensaio R1 .....	79
Figura 5.2 – Ensaios R4 e G4: Efeito do Tempo de Mistura na concentração de SS	83
Figura 5.3 – Ensaios R4 e G4: Efeito do Tempo de Mistura na Redução dos SS .....	84
Figura 5.4 – Ensaio R4: Efeito do Tempo de Mistura na Concentração de Fe.....	84
Figura 5.5 – Ensaio G4: Efeito do Tempo de Mistura nas Concentrações de Fe e Al .....	85
Figura 5.6 – Ensaio R5 e G5: Efeito do Tempo de Mistura na Redução dos SS.....	87
Figura 5.7 – Ensaio R5: Efeito do Tempo de Mistura na Concentração de Fe.....	87
Figura 5.8 – Ensaio G5: Efeito do Tempo de Mistura na Concentração de Fe e Al..	88
Figura 5.9 – Ensaios G6 e R6: Efeito do pH na Redução da Concentração de Sólidos em Suspensão.....	90
Figura 5.10 – Ensaios G6 e R6: Efeito do pH nas Concentrações de Fe e Al.....	91
Figura 5.11 – Relação entre o pH e a Massa de Ácido Adicionada por Unidade de Massa de Sólidos em Suspensão.....	92
Figura 5.12 – Ensaios com Lodo da ETA Rio Grande: Redução de SS X Concentração de Fe.....	94

Figura 5.13 – Ensaio com Lodo da ETA Guaraú: Redução SS X Concentração de Fe .....	95
Figura 5.14 – Ensaio com Lodo da ETA Guaraú: Redução SS X Concentração de Al .....	95
Figura 5.15 – Concentrações de Contaminantes nos Coagulantes Regenerados.....	103
Figura 5.16 – Ensaio R8: <i>Jar-Test</i> - Flocculação .....	109
Figura 5.17 – Ensaio R8: <i>Jar-Test</i> : Sedimentação.....	109
Figura 5.18 – Ensaio R8: <i>Jar-Test</i> – Sedimentação: Jarros com Coagulante Comercial.....	110
Figura 5.19 – Ensaio R8: <i>Jar-Test</i> – Sedimentação: Jarros com Coagulante Regenerado .....	110
Figura 5.20 – Ensaio R9: <i>Jar-Test</i> – Sedimentação.....	111
Figura 5.21 – Resultados do Ensaio R7 .....	112
Figura 5.22 – Resultados do Ensaio R8 .....	113
Figura 5.23 – Resultados do Ensaio R9 .....	114
Figura 5.24 – Resultados do Ensaio R10 .....	115
Figura 5.25 – Ensaio R9: Béqueres com Lodos Acidificado e Não Acidificado ....	121
Figura 6.1 – Situação Inicial: ETA Sem Sistema para Regeneração de Coagulante	125
Figura 6.2 – Situação Final: ETA Com Sistema para Regeneração de Coagulante	126
Figura 6.3 – Variação do Custo do Coagulante com o Custo de Transporte e Disposição do Lodo (maio/04).....	135

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	- American National Standards Institute
APHA	- American Public Health Association
ASCE	- American Society of Civil Engineers
AWWA	- American Water Works Association
CEN	- European Committee for Standardization
CETESB	- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
DBO	- Demanda bioquímica de oxigênio
DQO	- Demanda química de oxigênio
EPA	- United States Environmental Protection Agency
ETA	- Estação de Tratamento de Água
IPEN	- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
NSF	- National Sanitation Foundation
PROSAB	- Programa de Pesquisas em Saneamento Básico
RMSP	- Região Metropolitana de São Paulo
SABESP	- Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SST	- Sólidos em suspensão totais
SSF	- Sólidos em suspensão fixos
SSV	- Sólidos em suspensão voláteis
UASB	- Reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo
WPCF	- Water Pollution Control Federation
WEF	- Water Environment Federation

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, um dos grandes problemas enfrentados pela Engenharia Sanitária e Ambiental é a destinação a ser dada aos resíduos gerados nas Estações de Tratamento de Água. No Brasil, esse assunto só vem recebendo atenção nos últimos anos (FERREIRA FILHO et al., 1997), apesar de ser um problema extremamente freqüente e que tende a se agravar devido ao maior consumo de água e geração de resíduos, por causa do crescimento populacional.

O tratamento de água visando torná-la potável gera uma quantidade de resíduos, que pode ser de diferentes tipos dependendo da concepção do sistema de tratamento. No Brasil, o sistema de tratamento mais utilizado é o chamado convencional, que gera dois tipos principais de resíduos.

Um deles é a água de lavagem dos filtros, que, em boa parte das Estações de Tratamento de Água (ETA's) vem recebendo tratamento e destinação adequados. Esse resíduo vem sendo reaproveitado, gerando uma economia aos sistemas de tratamento. A viabilidade econômica do reaproveitamento desse resíduo é o que tem tornado essa solução amplamente difundida.

No entanto, para o outro resíduo gerado em grandes quantidades nas ETA's, o lodo dos decantadores, ainda se está em busca de uma solução definitiva. Portanto, o seu tratamento e destinação final ainda são grandes problemas ambientais.

De acordo com a legislação brasileira, o lodo gerado nos decantadores é classificado como resíduo sólido, e, portanto, não pode ser disposto em corpos d'água superficiais (PROSAB, 2001b).

Apesar disso, a maior parte das Estações de Tratamento de Água (ETA's) do Brasil dispõe esse resíduo diretamente nos corpos d'água, uma prática que pode gerar uma série de danos ao meio ambiente, podendo promover impactos ambientais intensos (PROSAB, 2001b). Essa situação se deve, em grande parte, à escassez de recursos e



ao alto custo de implantação e operação dos sistemas de tratamento e disposição final de resíduos sólidos.

Deve-se ressaltar que, na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), a questão da disposição dos resíduos sólidos é extremamente grave, considerando-se que os aterros sanitários existentes estão se aproximando do final da vida útil (como o aterro Bandeirantes) e que existe uma grande dificuldade para encontrar novas áreas de disposição, devido à intensa concentração urbana.

Atualmente, antes de se pensar na disposição e no tratamento de que os resíduos gerados em ETA's necessitam, deve-se pensar na utilização dos mesmos (AWWA, 1999). Assim, é de fundamental importância o desenvolvimento e aprimoramento de técnicas que viabilizem a utilização desses resíduos, bem como o seu tratamento e disposição adequada.

No Brasil, em quase todos os sistemas de tratamento de água para abastecimento, é adicionado um coagulante, composto principalmente de sais metálicos, de forma que parte dos contaminantes em suspensão presentes na água bruta possa ser removida por sedimentação.

O lodo gerado na decantação é um dos principais resíduos gerados nos processos de tratamento. Esse lodo é composto principalmente pelo precipitado metálico, que em geral são hidróxidos de ferro e alumínio que são gerados com a adição do coagulante (PETRUZELLI et. al, 2000).

Uma das alternativas possíveis que poderia trazer benefícios para a sociedade em vários aspectos é a regeneração de coagulante, ou seja, a extração do coagulante utilizado no processo de tratamento de água, do lodo dos decantadores. Essa recuperação é realizada por meio de ajustes no pH do lodo, de forma a solubilizar os hidróxidos de ferro e alumínio.

A utilização dessa técnica pode trazer dois grandes benefícios: a recuperação de um recurso, o coagulante, e a minimização dos resíduos sólidos a serem tratados e dispostos no meio ambiente (ASCE, AWWA, EPA, 1996).

Considerando-se que estudos anteriores levantaram problemas em relação à qualidade do coagulante regenerado, que pode conter concentração mais elevada de poluentes como metais pesados, a sua utilização em sistemas de abastecimento de água pode comprometer a qualidade d'água a ser distribuída à população.

Portanto, é mais adequado que o coagulante regenerado seja utilizado em outros processos e não no tratamento de águas para abastecimento. Uma das alternativas para o uso do coagulante obtido pela regeneração é a aplicação em sistemas de esgotos sanitários.

Além dos benefícios ambientais, essa técnica pode trazer vantagens econômicas, propiciadas pela produção de um coagulante com custo reduzido e pela redução do custo de tratamento e disposição da fase sólida (AWWA, 1987).

A viabilidade de regeneração dos coagulantes a partir dos lodos de ETA's depende de duas classes de fatores. A primeira são os fatores técnicos, englobando a técnica de regeneração, a qualidade e aplicações possíveis do coagulante obtido e as características do lodo resultante.

Existem também os fatores econômicos, que devem ser avaliados pela execução de uma análise de custos, incluindo as etapas de implantação, operação e manutenção de um sistema para regeneração de coagulante, e englobando também os benefícios econômicos obtidos com a redução do volume de lodo e obtenção a de um coagulante com aplicabilidade em sistemas de tratamento de esgotos.

## 2. OBJETIVOS

Esse trabalho tem como foco estudar a viabilidade técnica e econômica da aplicação da tecnologia de regeneração de coagulante a partir de lodos de ETA's. Para isso, distinguem-se quatro objetivos principais a serem atingidos:

- Sugerir uma metodologia para verificação da viabilidade técnica da regeneração de coagulantes a partir de lodos gerados em estações de tratamento de água convencionais;
- Avaliar a qualidade do coagulante regenerado e discutir a sua aplicação em sistemas de tratamento de esgotos sanitários;
- Avaliar o impacto da regeneração do coagulante nas características do lodo resultante, em relação à redução de massa;
- Estimar do ponto de vista econômico a viabilidade da regeneração de coagulante, visando o seu emprego em sistemas de tratamento de esgotos.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 *Geração de Lodos em ETA's*

Todas as tecnologias para o tratamento de água, desde as convencionais como coagulação e filtração até processos menos usuais como osmose reversa, filtração em carvão ativado granular e troca iônica produzem resíduos. Esses resíduos podem apresentar características físicas, químicas e biológicas extremamente distintas, podendo conter compostos orgânicos e inorgânicos nas formas sólida, líquida e gasosa. (BOURGEOIS, WALSH e GAGNON, 2004).

As características e quantidade dos resíduos produzidos em ETA's dependem diretamente das unidades que compõem o sistema de tratamento, ou seja, da sua concepção. As propriedades dos resíduos também são influenciadas pelos contaminantes presentes na água bruta e das técnicas de manuseio desses resíduos. (ALDEEB et al, 2003).

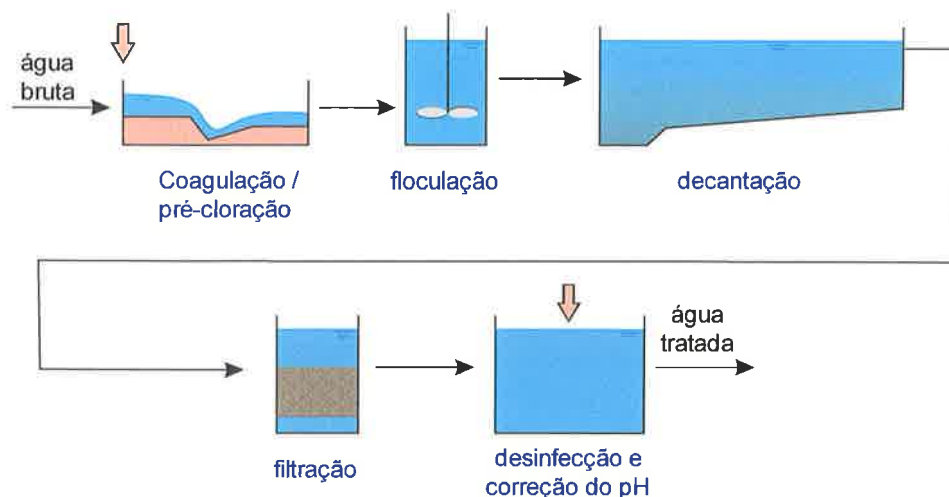
Usualmente os resíduos produzidos nas etapas do tratamento correspondem de 2 a 10% da capacidade de produção total da ETA. (BOURGEOIS, WALSH e GAGNON, 2004).

No Brasil, a maior parte das ETA's é do tipo convencional, motivo pelo qual esse sistema é detalhado no item 3.1.1. Esse sistema produz basicamente dois tipos de resíduos em grandes quantidades, o lodo dos decantadores e a água de lavagem dos filtros. As características de cada um desses resíduos serão apresentadas em detalhes nos itens seguintes.

#### 3.1.1 *CONCEPÇÃO DE SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ÁGUA CONVENCIONAIS*

As ETA's convencionais foram concebidas principalmente para a remoção de cor e turbidez, além de buscar atingir padrões microbiológicos seguros. As operações e processos unitários que compõem uma ETA desse tipo são: coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção e correção do pH.

A figura 3.1 representa um esquema simplificado de uma ETA convencional.



**Figura 3.1 – ETA Convencional**

A primeira etapa desse sistema de tratamento é a coagulação, onde, durante uma mistura rápida, é adicionado um coagulante. O objetivo da coagulação é desestabilizar as suspensões de partículas coloidais, gerando um aumento na taxa de formação de flocos nas etapas seguintes.

Após passar por essa etapa, a água segue para a floculação, que tem por objetivo promover a interação entre as partículas, permitindo a formação e crescimento dos flocos. A floculação pode ser realizada em reatores com agitação, que pode ser promovida por meios hidráulicos ou com agitadores mecânicos.

A operação seguinte é a sedimentação. Nessa etapa ocorre a separação de fases: líquido-sólido. O material sedimentado nesses reatores é o primeiro dos resíduos formados no processo de tratamento. A água decantada segue para os filtros, onde são removidas partículas menores, com o objetivo de gerar-se uma água com menor turbidez. Esses filtros precisam ser lavados periodicamente e isso gera outro resíduo, que é a água de lavagem.

Para garantir a qualidade microbiológica, a água filtrada segue para a desinfecção, que em geral é realizada pela aplicação de um agente oxidante, sendo mais comumente utilizado o cloro. Em algumas ETA's no Brasil a desinfecção também é realizada com a aplicação de cloro em pontos iniciais do sistema, como na mistura rápida, chamado de pré-cloração. Por fim, são adicionados flúor e produtos visando atingir uma faixa de pH adequada para a distribuição.

Portanto, nas ETA's que apresentam essa concepção, existem dois pontos principais de geração de resíduos, os decantadores e os filtros. As etapas que compõem uma ETA convencional serão detalhadas nos itens seguintes, enfocando a questão da geração de resíduos nos decantadores e filtros.

- *Coagulação*

A coagulação é um processo de desestabilização das partículas presentes na água bruta, visando tornar o sistema instável, com as partículas menos resistentes à agregação. Segundo alguns autores, também podem ser consideradas como etapas da coagulação (além da desestabilização propriamente dita) a formação dos produtos da hidrólise e colisões interparticulares. As colisões interparticulares se iniciam na mistura rápida, mas ocorrem principalmente no processo de floculação. As reações de hidrólise e desestabilização das partículas ocorrem logo após adição do coagulante, na mistura rápida. (AWWA, 1999).

Um sistema pode estar estável pela estabilização eletrostática. Ela é gerada por uma das principais forças repulsivas que atuam sobre as partículas, causada pela interação entre as camadas duplas das partículas. A maioria das partículas presentes na água possui carga superficial negativa que é explicada principalmente por três processos. (AWWA, 1999).

O primeiro é a reação entre grupos existentes na superfície do colóide (como sílica) e a água, podendo receber ou doar prótons. O segundo é a reação entre grupos superficiais da partícula e outros compostos presentes na água. O terceiro é a imperfeição na estrutura das partículas, chamado substituição isomórfica. Essas reações são influenciadas pelas características da água bruta, como o pH e compostos presentes. (AWWA, 1999).

Como em um sistema coloidal deve existir um balanço de cargas, ao redor das partículas com carga negativa, forma-se uma nuvem de íons de forma a neutralizar essa carga, chamada de camada difusa. A carga negativa na superfície das partículas faz com que se forme ao seu redor uma camada de íons de carga positiva. Essa camada, junto com a carga da partícula, formam a chamada dupla camada. (AWWA, 1999).

Quando há a aproximação entre duas partículas semelhantes, as camadas difusas das duas se sobrepõem e interagem, gerando uma força de repulsão, inversamente proporcional à distância entre elas. Por outro lado, existe a força atrativa de Van der Waals, que aumenta conforme a distância diminui. Assim, a força que atua sobre as partículas é uma composição das forças atrativa e repulsiva colocadas. Quando a força de repulsão é predominante, a solução é dita eletrostaticamente estabilizada. (AWWA, 1999).

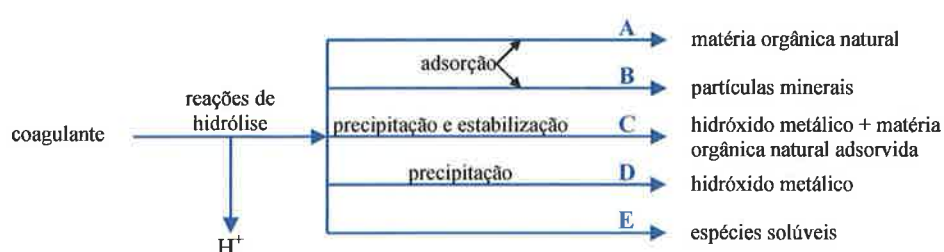
Uma suspensão também pode apresentar estabilidade estérica. Ela acontece pela adsorção de compostos (como polímeros) na interface sólido-água. Os polímeros podem ser estabilizantes ou não, dependendo, entre outras coisas, da relação entre as quantidades de polímero e sólidos e da afinidade aos sólidos e a água. A adsorção desses polímeros pode resultar em repulsão entre duas partículas por dois processos, quando, no encontro entre duas partículas, ou ocorre a compressão da camada de polímero, reduzindo o volume e gerando repulsão ou quando ocorre a penetração de uma camada de polímero na outra, e, se os polímeros forem fortemente hidrofílicos,

preferirão o solvente (a água) a reagir com outro polímero, portanto as partículas se separarão com qualquer agitação. (AWWA, 1999).

Para gerar a desestabilização das partículas, são adicionados os produtos chamados de coagulantes, principalmente sais com os íons  $Al^{+3}$  e  $Fe^{+3}$ . É necessário que ocorra a mistura desses coagulantes com a água bruta, promovendo a dispersão rápida e uniforme do coagulante, o que é chamado de mistura rápida. (CHEREMISINOFF, 1995). Essa agitação pode ser obtida por meios mecânicos, com o uso de agitadores, ou hidráulicos, como em ressaltos hidráulicos.

Quando esses coagulantes são adicionados à água, ocorrem reações de hidrólise, resultando na formação de diferentes produtos, que podem ser espécies mononucleares, polinucleares e um precipitado de hidróxido metálico. (AWWA, 1999). A formação desses compostos está apresentada com mais detalhes no item 3.3.2.

Os produtos da hidrólise podem reagir de diferentes maneiras. A Figura 3.2 mostra as vias que podem ser seguidas.



**Figura 3.2 – Vias de Reação dos Produtos da Hidrólise dos Coagulantes de Sais Metálicos**

As vias de reação A e B indicam a reação dos produtos da hidrólise com alguns grupos nas superfícies das partículas. Com isso pode ocorrer a neutralização da carga



superficial das partículas que possuem carga negativa, o que é chamado de coagulação por neutralização da carga.

Nas vias C e D é colocada a formação dos hidróxidos metálicos ( $\text{Al(OH)}_3$  e  $\text{Fe(OH)}_3$ , para alumínio e ferro respectivamente). Se houver a presença de matéria orgânica natural, a fração mais hidrofóbica tende a ficar adsorvida ao precipitado à medida que esse se forma (via C). Quando a dosagem de coagulante é superior à demanda exercida, ocorre a formação do precipitado (instável), e na etapa seguinte (floculação) ocorre a formação de flocos. Quando ocorre a formação do precipitado se terá a coagulação por varredura. Nesse caso, as partículas coloidais são envolvidas pelo precipitado, e removidas quando esses sedimentam.

A quantidade de hidróxidos formados e de quanto permanecerá como produtos solúveis (via E) é função do pH, conforme será detalhado no item 3.3.2.

- *Floculação*

A floculação é a etapa onde se busca promover o encontro entre as partículas e promover a sua agregação, após terem sido desestabilizadas na coagulação.

O encontro entre as partículas é propiciado pelos mecanismos de transporte, tais como difusão Browniana (floculação pericínética), floculação ortocínética, diferentes velocidades de sedimentação e difusão turbulenta. (AWWA, 1999).

O principal mecanismo em sistemas de floculação de ETA's convencionais é a floculação ortocínética, que considera que duas partículas localizadas em pontos onde o fluido tem velocidades diferentes irão se mover com velocidades diferentes, e isso pode proporcionar o encontro entre elas. Portanto, o gradiente de velocidades é de fundamental importância nas operações de floculação. (AWWA, 1999).

No entanto, principalmente com gradientes de velocidade elevados, pode haver a ruptura dos flocos. Os principais mecanismos de ruptura são a erosão de partículas primárias da superfície do floco e a fratura do floco em pequenos agregados.

Uma das principais conclusões, obtidas da modelagem matemática desenvolvida considerando esses dois fenômenos, foi a de que a compartimentalização dos reatores de floculação pode reduzir significativamente o tempo de detenção. Ou seja, uma série de reatores de mistura completa propiciam resultados melhores que um único reator com o mesmo tempo de detenção (AWWA, 1999). Usualmente, são utilizados três ou quatro reatores em série, com gradientes de velocidade decrescentes, buscando maximizar a formação de flocos.

- *Sedimentação*

Em uma ETA convencional a água floculada segue para a etapa de sedimentação, que tem por objetivo promover a separação sólido líquido, diminuindo a carga na etapa de filtração. Essa etapa se baseia em separar as partículas presentes na água bruta e geradas nas etapas anteriores de coagulação e floculação, na forma de hidróxidos metálicos, da fase líquida pela atuação da força da gravidade.

Usualmente, as ETA's promovem a sedimentação em tanques retangulares, com fluxo horizontal, chamados de decantadores (Figura 3.3). Quanto maior a relação entre o comprimento e a largura mais o comportamento do reator se aproxima de um reator pistonado (*plug flow*) e a eficiência aumenta.



**Figura 3.3 – Decantadores na ETA Guarau**

A sedimentação das partículas nesse tipo de decantador é aproximada pelo modelo de sedimentação flocculenta, também chamada sedimentação tipo 2. Nesse tipo de sedimentação as partículas se agrupam ao longo do movimento, adquirindo diâmetros maiores e, portanto, não possuem velocidade de sedimentação constante. São utilizados testes de coluna para avaliar o efeito da floculação ao longo da profundidade e embasar o dimensionamento das unidades. (AWWA, 1999).

Em algumas ETA's são utilizados decantadores de alta taxa, que são equipados com placas inclinadas, de forma que a área disponível para a sedimentação é maior, aumentando a eficiência da unidade. Usualmente são utilizados módulos pré-fabricados. (AWWA, 1999).

Inicialmente, a remoção do lodo era realizada com a interrupção da operação, utilizando métodos manuais ou hidráulicos. Posteriormente, foram desenvolvidos instalações mecânicas para a remoção do lodo, de forma que não é necessária a

interrupção da operação. Um desses equipamentos são raspadores que levam o lodo a um canal na extremidade de entrada dos decantadores, que é esvaziado por meios hidráulicos periodicamente. (AWWA, 1999).

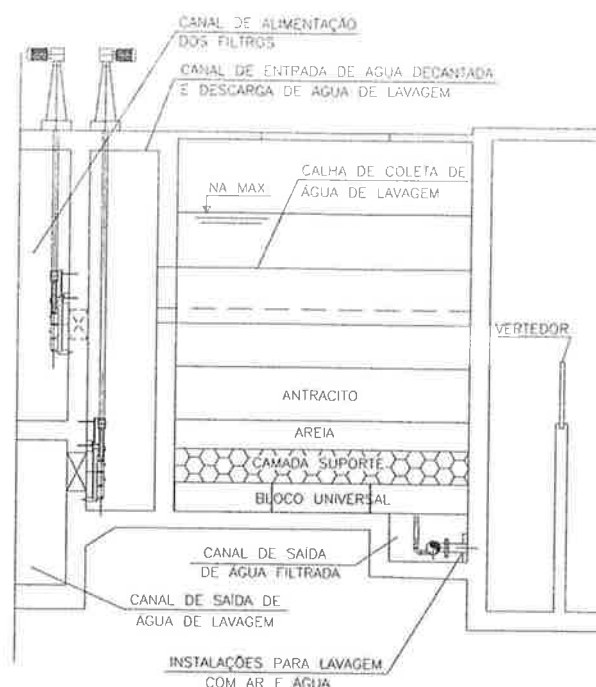
- *Filtração*

A água decantada proveniente dos decantadores segue para os filtros, que também promovem a separação sólido líquido, sendo a segunda tecnologia mais utilizada com essa finalidade. A filtração consiste na passagem de água por um leito de material granular, resultando na captura de sólidos (CHEREMISINOFF, 1995).

De acordo com Cheremisinoff (1995), as principais características dos filtros são:

- configuração do filtro
- granulometria, espessura e materiais que compõem o leito filtrante
- taxa de filtração
- perda de carga terminal
- controle de fluxo
- lavagem

Usualmente, os filtros são compostos por uma estrutura de contenção, pelo meio granular, estruturas de suporte desse meio, instalações para coleta e distribuição do afluente, efluente e água de lavagem, instalações adicionais para lavagem e mecanismos de controle de vazão, nível d'água e pressão (CHEREMISINOFF, 1995). Na Figura 3.4 está colocado um exemplo de projeto de um filtro de fluxo descendente com meio filtrante duplo.



**Figura 3.4 – Projeto de Filtro para ETA**

Os filtros podem ser classificados com base em vários parâmetros. Um deles é o sentido de fluxo, que pode ser ascendente ou descendente. Os utilizados com maior frequência são de fluxo descendente.

Outro critério para a classificação dos filtros é relativo ao meio filtrante. Os filtros podem possuir meio filtrante simples, ou seja, composto por um único material como areia, ou possuir mais de um material compondo o meio filtrante. Nesse caso, o meio filtrante pode ser duplo, com, por exemplo, areia e antracito, que é comumente utilizado, ou areia e carvão ativado granular. O meio filtrante também pode ser triplo, como com garnet, areia e antracito.

Existem outros critérios para a classificação dos filtros, que se relacionam com o arranjo hidráulico, que pode ser por gravidade ou pressurizados ou também relacionado com o controle hidráulico, que pode ser com taxa de filtração constante ou declinante.

A filtração é realizada em ciclos, com interrupções para a realização da lavagem. Existem dois critérios para determinação do período de operação dos filtros, a perda de carga e a turbidez da água filtrada (CHEREMISINOFF, 1995). Idealmente, esses dois fatores limitantes atingiriam os valores limites no mesmo intervalo de tempo.

A turbidez é maior no início do ciclo de filtração, decai após um intervalo de tempo e pode aumentar novamente no final. Esse aumento no final do ciclo de filtração é causado por um aumento das velocidades do fluxo a medida que a área dos canais entre as partículas do meio filtrante vão se reduzindo com o acúmulo de partículas. Com o aumento dessa velocidade a capacidade de remoção é reduzida e as partículas são carregadas até maiores profundidades, atravessando a camada filtrante e saindo na água filtrada. Isso gera a piora na qualidade da água filtrada. (AWWA, 1999).

A lavagem dos filtros usualmente é realizada principalmente pela passagem de água em fluxo ascendente. Pode ser feita também injeção de ar antes ou simultaneamente com a circulação da água de lavagem. Durante a passagem da água de lavagem ocorre a expansão do meio filtrante, que proporciona melhor remoção das partículas. (AWWA, 1999).

A água de lavagem é recolhida por canaletas, e esse é o primeiro resíduo gerado no sistema de tratamento convencional. O volume de água de lavagem gerado é grande, na faixa de 1 a 5% da vazão total da ETA. (AWWA, 1999).

- *Desinfecção, Fluoretação e Correção do pH*

A etapa de desinfecção tem como principal meta reduzir a concentração de microorganismos patogênicos na água tratada. Para atingir esse objetivo existem uma série de tecnologias disponíveis, baseadas no uso de agentes físicos ou químicos.

Como agentes físicos destacam-se a temperatura, radiação e filtração. A aplicação de temperaturas elevadas em geral não é viável economicamente. A aplicação de radiação ultravioleta apresenta a desvantagem de não deixar residual após a sua aplicação. (AWWA, 1999).

Os agentes químicos mais amplamente utilizados são o cloro (visando a formação de cloro residual livre ou cloraminas), dióxido de cloro e ozônio, sendo que o cloro é utilizado em boa parte das ETA's do Brasil. A aplicação de cloro pode ser realizada pela dissolução do gás sobre pressão na água, em solução de hipoclorito de sódio ou hipoclorito de cálcio na forma sólida.

Quando é feita a aplicação do cloro na água ocorre a formação de ácido hipocloroso (HOCl), íon hipoclorito (OCI<sup>-</sup>) e o cloro também pode permanecer na fase aquosa como Cl<sub>2(aq)</sub>. A soma dessas três fases é chamada de cloro residual livre. (AWWA, 1999).

Na presença de nitrogênio amoniacal ocorre a formação dos compostos chamados de cloraminas, que são a monoclорamina, dicloramina e tricloramina. A soma desses compostos é denominada cloro residual combinado. As cloraminas têm eficiência inferior as formas do cloro livre como agentes desinfetantes, mas apresentam algumas vantagens, como serem mais estável. (AWWA, 1999).

A aplicação de cloro pode ser realizada em diferentes partes do sistema de tratamento, antes da coagulação, após a coagulação, entre a sedimentação e a filtração, após a filtração ou em pontos na rede de distribuição. A pós-cloração é a mais comum, sendo realizada após a filtração. Grande parte das ETA's no Brasil também realiza a pré-cloração, com a aplicação na mistura rápida. As vantagens de realização da pré-cloração é evitar problemas operacionais decorrentes da formação de limo nos filtros, bombas e tanques e reduzir o problema de gosto e odor gerado por esses limos. (AWWA, 1999).

A eficiência da desinfecção é definida basicamente pelo tipo de agente oxidante, a concentração do agente oxidante e o tempo de contato. Por isso, uma das abordagens para avaliar se um sistema de desinfecção está adequado se baseia na avaliação do produto entre o tempo de contato pelo qual 90% do fluido fica em contato com o agente utilizado para desinfecção e a concentração residual final. (AWWA, 1999).

No final do processo também é feita a adição de flúor, visando promover saúde dentária. Também é feita a aplicação de cal buscando ajustar o pH à faixa adequada para a distribuição e consumo.

### *3.1.2 CARACTERÍSTICAS E AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS*

Conforme exposto no item anterior, em uma ETA convencional são gerados dois tipos de resíduos. Um tipo é o resíduo gerado durante a operação de lavagem dos filtros, sendo que o seu tratamento e reaproveitamento têm recebido atenção, como acontece nas ETA's do Guaraú e Alto da Boa Vista, que realizam o reaproveitamento de 100% das águas de lavagem, o que representa um grande benefício econômico e ambiental. (FERREIRA FILHO e ALÉM SOBRINHO; 1997).

Esse reaproveitamento tem sido facilitado pelas características desse resíduo, pois a água de lavagem dos filtros se caracteriza por ser um grande volume de água, com vazão elevada e baixa concentração de sólidos em suspensão, de 30 a 300 mg/L. Os volumes de água de lavagem se situam entre 3 a 10% da capacidade da ETA, e, portanto, o seu reaproveitamento tem um valor econômico muito significativo. (AWWA, 1991) e (CORNWELL e LEE, 1994).

O outro resíduo é o lodo dos decantadores. Esse lodo possui partículas provenientes da água bruta (como argilas, siltes, areia fina, material húmico e microorganismos) e produtos do processo de coagulação, como hidróxidos de alumínio ou ferro. (FERREIRA FILHO e ALÉM SOBRINHO; 1997).



A legislação brasileira classifica o lodo produzido nas ETA's como resíduo sólido. Em caracterização realizada para o lodo da ETA São João/Navegantes em Porto Alegre, seguindo a norma NBR10.004, de resíduos sólidos, o lodo foi classificado como resíduo classe II – não inerte (PROSAB, 2001b).

O teor de sólidos de lodos de decantadores de ETA's é muito variável, e é função da dosagem de coagulante, das características da água bruta e do sistema de remoção de lodo utilizado. Segundo AWWA (1987), o teor de sólidos do lodo gerado em sistemas que utilizam sais de alumínio como coagulantes varia de 0,1% a 27%, em massa.

Em ETA's onde os decantadores são limpos somente periodicamente e com procedimentos manuais o lodo tende a ser mais adensado, com uma estratificação com as partículas mais densas no fundo e as menos densas, em geral as partículas de hidróxido, no topo. O volume e teor de sólidos desse lodo depende da quantidade de água utilizada para a remoção desse lodo. (AWWA, 1991).

Já em ETA's com sistema de remoção contínua de lodo dos decantadores, o lodo tende a ser menos denso, devido ao menor tempo e altura de acumulação. Nesses casos, os teores de sólidos em geral variam de 0,1 a 1%, para água bruta com turbidez de baixa a média. (AWWA, 1991).

Uma das características mais importantes do lodo é a desidratabilidade, pois, em geral, o lodo necessita passar por operações de desaguamento para ser encaminhado à disposição final. Alguns parâmetros utilizados como indicativo dessa capacidade são a resistência específica, tempo de filtração e o tempo de sucção capilar. Os dois primeiros parâmetros citados são obtidos em ensaios de bancada, utilizando um equipamento de filtração.

O lodo também contém outras substâncias, e a sua determinação é importante na avaliação de alternativas de disposição e tratamento. As substâncias usualmente investigadas são metais (total e lixiviado) e nutrientes.

Outras características físicas e de engenharia podem ser relevantes dependendo da disposição final prevista para o lodo. Aldeeb et al (2003) apresentaram diversas características de lodos gerados em ETA's levantados por diversos autores, como densidade, distribuição do tamanho das partículas, plasticidade, limite de liquidez, compactação, resistência à compressão e ao cisalhamento. Foi concluído que há uma grande variabilidade dessas características.

Em ensaios de mecânica dos solos realizados com lodo da ETA Rio das Velhas, o lodo foi caracterizado como sendo composto por silte e argila. Também foram obtidos resultados em ensaios de compactação, que indicaram que o lodo possui comportamento de materiais plásticos (PROSAB, 2001b).

A maior parte dos metais encontrados não são provenientes da água bruta, mas são impurezas dos coagulantes utilizados na coagulação (ASCE, 1996) e (CORNWELL, KOPPERS, 1990). Em lodos gerados em sistemas que utilizam sais de alumínio, o metal encontrado em maior concentração é o ferro, e, em ambos os lodos (de alumínio e ferro), são encontrados manganês, cromo, cobre, zinco, níquel, arsênio, bário, cádmio e chumbo (AWWA, 1999).

As concentrações de nutrientes, principalmente fósforo e nitrogênio, são significativamente menores que as encontradas em biosólidos, mas podem atingir 3% de nitrogênio ou fosfato (AWWA, 1999).

A quantidade gerada desses dois resíduos gerados em ETA's convencionais é função de uma série de parâmetros, como qualidade da água bruta, dosagem dos produtos utilizados, performance do sistema de tratamento, método de remoção do lodo, eficiência da sedimentação e frequência de lavagem dos filtros.

A quantificação do lodo gerado nas ETA's é fundamental para o projeto das unidades de tratamento desse lodo. Ferreira Filho e Além Sobrinho (1997) e ASCE (1996), apresentaram equações que podem ser utilizadas para estimar a quantidade de lodo

gerada em um processo de tratamento de água convencional, apresentadas nas eq. (1) e eq. (2) para estações que usam sais de alumínio ou ferro, respectivamente.

$$P_L = Q \cdot (4,89 \cdot D_{Al} + SS + A) \cdot 10^{-3} \quad (1)$$

$$P_L = Q \cdot (2,88 \cdot D_{Fe} + SS + A) \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

onde:  $P_L$ : produção de lodo,

$Q$ : vazão em  $m^3/dia$ ,

$D_{Al}$ : dosagem de sais de alumínio, expressa como Al em mg/L,

$D_{Fe}$ : dosagem de sais de ferro, expressa como Fe em mg/L,

SS: concentração de sólidos em suspensão totais na água bruta em mg/L,

A: sólidos de outros produtos utilizados (polímeros, carvão ativado em pó, etc) em mg/L,

Essa equação é desenvolvida assumindo que todo o ferro ou alumínio adicionado pelos coagulantes irá se precipitar na forma de hidróxido, como  $Fe(OH)_3$  ou  $Al(OH)_3$ , incorporando de 3 a 4 moléculas de água. Assumindo isso, as constantes 4,89 e 2,88, para sais de alumínio e ferro respectivamente, são obtidas por estequiometria. (FERREIRA FILHO e ALÉM SOBRINHO, 1997).

A equação também assume que todos os sólidos em suspensão presentes na água bruta e todos os sólidos originários de outros produtos como carvão ativado são removidos e compõem o lodo.

Fernandes e Ferreira Filho (2003) realizaram estudo na ETA Alto da Boa Vista, localizada em São Paulo, que utilizava como coagulante sulfato férrico. Nesse estudo foi concluído que nesse caso a relação entre a concentração de sólidos em suspensão gerada pela adição de coagulante e a dosagem de coagulante era, em média, 2,03.

Esse valor é menor que o previsto pela equação apresentada anteriormente, de 2,88. Isso pode ser justificado pois a equação foi obtida considerando que todos os íons

metálicos precipitam na forma de hidróxidos, mas também parte pode permanecer como outros produtos da hidrólise, não precipitando.

Segundo Cornwell e Koppers (1990) de 20 a 92% dos sólidos gerados no processo de tratamento de água são gerados da adição de produtos químicos.

Masschelein, Devleminck e Genot (1985), fizeram estudo em uma ETA em Bruxelas com concepção convencional, que utilizava sulfato de alumínio como coagulante e carvão ativado em pó e avaliaram que a composição do lodo gerado nos decantadores era aproximadamente 50% de materiais com origem na água bruta, 35% resíduo do coagulante e 15% resíduo do carvão ativado, em massa.

O volume de lodo gerado nos decantadores em geral varia de 0,1 a 3% da vazão de água bruta, com valor médio de 0,6% (AWWA, 1991).

### *3.1.3 POSSIBILIDADES PARA A UTILIZAÇÃO E TRATAMENTO DOS RESÍDUOS*

Em geral, uma vez que o volume de resíduos gerados representa uma parcela muito grande da capacidade da ETA, muitas ETA's buscam reciclar os resíduos como uma forma de maximizar a produção de água potável.

No entanto, de acordo com Bourgeois, Walsh e Gagnon (2004), muitas vezes essa alternativa é inviabilizada pela preocupação com a possibilidade de concentração de compostos químicos dissolvidos e microorganismos em níveis que venham a comprometer a eficiência do tratamento, e, conseqüentemente, da qualidade da água produzida. Alguns desses constituintes são o ferro, manganês, carbono orgânico total, giárdia, cistos de criptosporidium e trihalometanos (BOURGEOIS, WALSH e GAGNON, 2004) e (CORNWELL e LEE, 1994).

Cornwell e Lee (1994) avaliaram a recirculação de efluentes em 24 ETA's, incluindo resíduos gerados no processo de tratamento da água (como a água de lavagem dos filtros) e resíduos gerados nos processos de tratamento do lodo dos decantadores, como o efluente de filtro prensa de placas ou outros equipamentos de desaguamento.

Foi concluído que esses efluentes de forma geral continham contaminantes em concentrações preocupantes, mas o gerenciamento adequado poderia propiciar a recirculação de alguns desses efluentes. Foi ressaltada a necessidade de monitoramento para o contaminante de interesse.

Apesar da possibilidade de aumento da concentração de contaminantes, alguns estudos demonstraram que a reutilização da água de lavagem dos filtros não comprometia a remoção desses compostos (BOURGEOIS, WALSH e GAGNON, 2004). Essa alternativa está amplamente difundida e é utilizada em algumas ETA's no Brasil.

No entanto, boa parte das ETA's ainda não dá destinação adequada a esse resíduo. Em levantamento realizado por Parsekian (1998) em 11 ETA's localizadas no interior do Estado de São Paulo, só uma reutilizava a água de lavagem dos filtros, retornando 64% ao início do processo. As demais lançavam esse resíduo em corpos d'água.

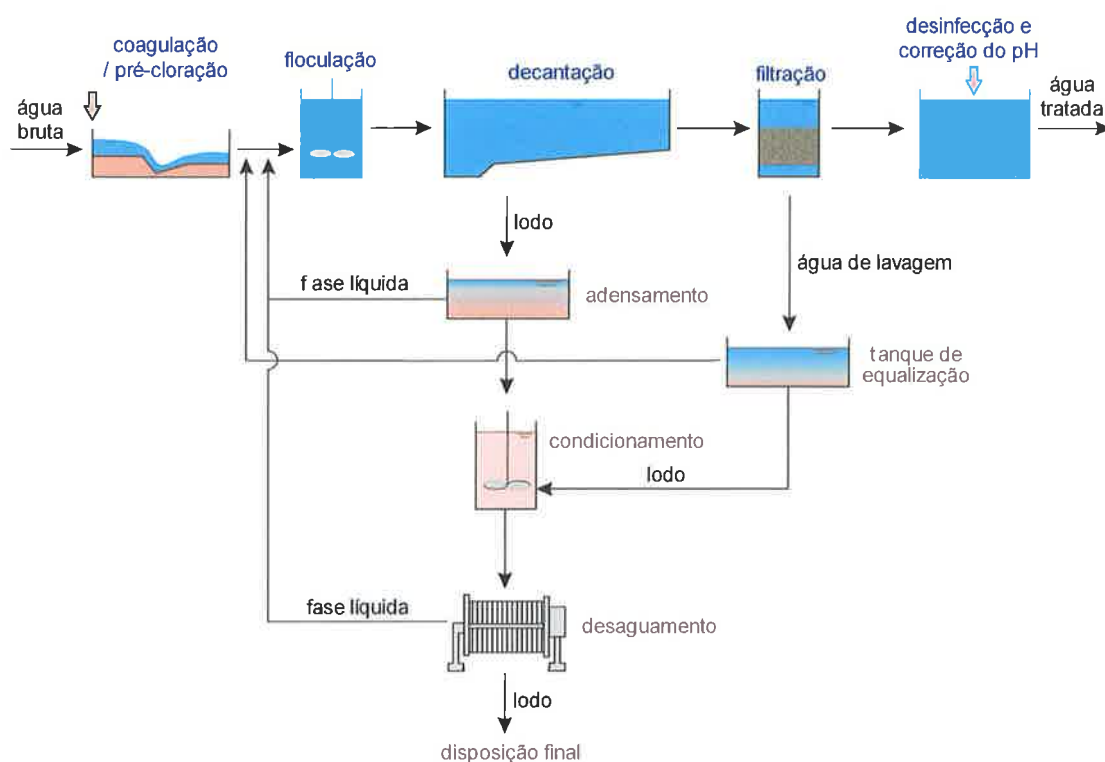
A reutilização das águas de lavagem pode ser feita encaminhando esse resíduo diretamente ao início do processo ou após uma etapa de tratamento. A tecnologia mais utilizada para o tratamento de água de lavagem dos filtros antes da reutilização tem sido a sedimentação, que pode ser realizada utilizando substâncias para melhorar a floculação, como polímeros. Outras opções também tem sido estudadas e utilizadas, tais como a flotação com ar dissolvido e filtração em membrana (BOURGEOIS, WALSH e GAGNON, 2004).

As primeiras alternativas para a disposição dos resíduos gerados nos decantadores eram a disposição em corpos d'água, em aterros sanitários e na rede de esgotos sanitários. Essas alternativas tem se tornado menos viáveis devido ao aumento das restrições para disposição em corpos d'água e rede de esgotos e aumento do custo para disposição em aterros. Essa situação tem levado à busca por alternativas que considerem a reutilização desses resíduos, considerando aspectos econômicos e ambientais. (AWWA, 1999).

No Brasil grande parte das ETA's continuam lançando o lodo dos decantadores em corpos d'água. Parsekian (1998) apontou que entre 11 ETA's localizadas no interior do Estado de São Paulo somente uma dava destino ao lodo diferente do lançamento em corpos d'água. Essa ETA possuía um leito de secagem para disposição final do lodo.

A disposição do lodo em corpos d'água superficiais não é permitida pela legislação brasileira atual, que classifica esse lodo como resíduo sólido. Algumas pesquisas avaliaram o impacto ambiental dessa destinação, relacionadas principalmente à concentração de alumínio (nos lodos gerados em ETA's que utilizam sulfato de alumínio ou outro sal de alumínio como coagulante). (PROSAB, 2001b).

Existe uma série de tecnologias desenvolvidas para a utilização e tratamento do lodo gerado nos decantadores de estações de tratamento de água convencionais. As mais comuns envolvem o tratamento (composto principalmente pelas etapas de adensamento, condicionamento e desaguamento) e a disposição final em aterros sanitários. Esse arranjo está indicado na Figura 3.5. Também existem técnicas que buscam reutilizar o lodo em outras atividades, como na fabricação de compostos cerâmicos.



**Figura 3.5 – Arranjo Possível para o Tratamento da Fase Sólida**

As etapas de adensamento, condicionamento e desaguamento do lodo têm como principal objetivo aumentar o teor de sólidos de lodo, com conseqüente redução do volume. Essas operações são necessárias quando o objetivo é dispor esse material em aterros sanitários e também para outros usos como a utilização em materiais cerâmicos. Para a disposição final em aterros sanitários essas etapas são fundamentais, pois propiciam uma redução muito significativa do volume de lodo a ser encaminhado à disposição final, além de melhorar as características geotécnicas desse material, o que é importante para a estabilidade do aterro de resíduos.

O lodo retirado dos decantadores pode ser encaminhado para a etapa de adensamento, com o objetivo de aumentar o teor de sólidos do lodo e remover sólidos da fase líquida, que pode ser descartada ou re-circulada ao início da ETA. O adensamento usualmente é realizado por sedimentação. (AWWA, 1999).

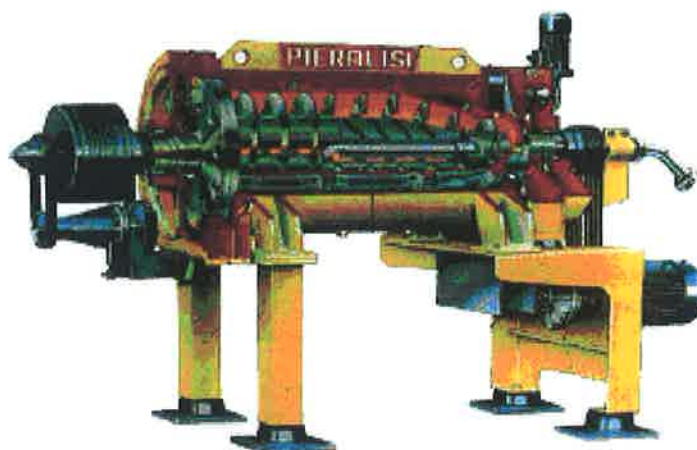
Como usualmente esses lodos são difíceis de serem desidratados, antes de serem submetidos ao processo de desaguamento é necessário que passem pelo condicionamento (FERREIRA FILHO e ALÉM SOBRINHO, 1997). Essa etapa visa desestabilizar as partículas, permitindo que se agreguem em flocos, facilitando a separação sólido-líquido. O condicionamento pode ser realizado com coagulantes inorgânicos, como cloreto férrico e sulfato de alumínio, ou orgânicos, como os polímeros.

Após o condicionamento o lodo é encaminhado para o desaguamento, que pode ser realizado por equipamentos mecânicos ou não. Algumas alternativas sem o uso de equipamentos mecânicos são o uso de leitos de secagem e lagoas de desidratação. Essas técnicas se baseiam na percolação, decantação e evaporação. (AWWA, 1999).

Os leitos de secagem são uma técnica para aumentar o teor de sólidos do lodo, sendo que um leito de secagem tradicional é composto por uma camada suporte, um meio filtrante e sistema drenante. (PROSAB, 2001b).

Existem diversos equipamentos mecânicos que podem ser utilizados para o desaguamento, gerando lodos com teor de sólidos elevados. Alguns deles são filtro prensa de esteiras, centrífugas (Figura 3.6) e filtros prensa de placas (Figura 3.7). As centrífugas geram lodos com teor de sólidos da ordem de 20% e os filtros prensa de placas produzem um resíduo (torta) com teor de sólidos da ordem de 30%. (AWWA, 1999).





**Figura 3.6 – Centrifuga**



**Figura 3.7 – Filtro Prensa de Placas**

Algumas das alternativas buscando a reutilização do lodo são o uso em produtos comerciais, como material para a construção civil e substituto do solo natural, devido à capacidade de alta retenção de umidade (AWWA, 1999) e (PROSAB, 2001b).

A aplicação na construção civil pode ocorrer na fabricação de blocos cerâmicos, de solo-cimento, pigmentos para argamassa ou revestimentos, ou como aditivo para agregados. Essas utilizações podem ser viáveis devido às características físicas e de engenharia do lodo. (PROSAB, 2001b).

Outra opção é o uso em conjunto com biosólidos, com a vantagem de poder reduzir as concentrações de metais e a aplicação no solo, que é pouco praticada pois compete com biosólidos nos locais onde há interesse (AWWA, 1999).

As preocupações relativas à aplicação de lodos de ETA's no solo são relacionadas a geração de deficiência de fósforo no solo (pois esse poderia ser adsorvido ao lodo), toxicidade do alumínio às plantas e aumento da concentração de metais no solo que pudessem ser capturados pelas plantas (LUCAS et al, 1994).

De acordo com PROSAB (2001b) a aplicação de lodo de ETA's no solo por espargimento tem como um problema a ocorrência de metais, que pode ter impactos no sistema solo-planta. Além disso, esse lodo não possui capacidade fertilizante semelhante à capacidade dos lodos de ETE's, e sua composição poderia modificar a retenção de água e propriedades estruturais do solo.

Geertsema et al (1994) avaliaram a aplicação de lodo de alumínio no solo, e não foi constatado nenhum efeito deletério nas características do solo, da água subterrânea ou no crescimento de pinheiros após um período de 30 meses. Lucas et al (1994) concluíram que o lodo de alumínio poderia ser aplicado no solo, com efeitos muito pequenos no crescimento de plantas, que poderia ser compensado pela aplicação de fertilizantes.

Outra alternativa é a utilização do lodo na cobertura de aterros sanitários. Aldeeb et al (2003) avaliaram essa alternativa e concluíram que é viável tecnicamente se o lodo for misturado com solo superficial, de forma a melhorar as propriedades físicas do lodo, aumentando, por exemplo, as resistências à compressão e ao cisalhamento.

## **3.2 Coagulantes**

### *3.2.1 PRINCIPAIS TIPOS E FONTES DE ORIGEM*

A maior parte dos coagulantes utilizados no tratamento de água são sais, sulfato ou cloreto, que contém os íons  $Al^{+3}$  ou  $Fe^{+3}$ . Outros coagulantes tem sido estudados visando a aplicação no tratamento de água, como polímeros e coagulantes naturais, a base de produtos agrícolas.

Os polímeros tem grande potencial de uso no tratamento de água, sendo que algumas ETA's no Brasil utilizam esses produtos, em geral em conjunto com coagulantes metálicos. Duas razões para o uso dos polímeros ainda ser restrito são o custo elevado e potencial de geração de resíduos tóxicos na água tratada. (MANDLOI, CHAUDHARI e FOLKARD, 2004).

Alguns materiais tem sido estudados como coagulantes naturais, de diferentes fontes, como semente de moringa, milho, substâncias da casca de caranguejo e taninos vegetais. Esses coagulantes estão em estudo, podendo se tornar uma alternativa viável para substituição dos sais metálicos. Até o momento os coagulantes de sais metálicos aparecem como coagulantes superiores, e os coagulantes naturais tem sido recomendados para serem utilizados em conjunto com coagulantes metálicos. (MANDLOI, CHAUDHARI, FOLKARD, 2004), (MOTA e PATERNIANI, 2004) e (SILVA, 1999).

Em relação aos coagulantes de sais metálicos, eles podem ser classificados em cinco principais grupos que são os sais metálicos simples, sais metálicos pré-hidrolisados, sais metálicos com ácido forte, sais metálicos com aditivos e aluminato de sódio (AWWA, 1999).

Os sais metálicos simples são o sulfato de alumínio, sulfato férrico e cloreto férrico, que podem ser encontrados na forma sólida (agregado ou granular) ou em soluções aquosas concentradas.

Os sais metálicos pré-hidrolisados são sais que, no momento da fabricação, recebem bases que neutralizam parte dos íons hidrogênio liberados na reação de hidrólise. Esses coagulantes com cloreto de alumínio são chamados de cloreto de polialumínio, ou *PACl*. De acordo com McCurdy, Carlson e Gregory (2004) esse coagulante apresenta como vantagem o fato de ser mais efetivo em baixas temperaturas e atuar de maneira eficaz em uma faixa mais larga de pH.

Quando o coagulante contém o sal metálico e alguma quantidade de um ácido forte (o mais frequentemente utilizado é o ácido sulfúrico), o coagulante é chamado de sais metálicos com ácido forte. A utilização desses coagulantes gera uma queda no pH maior que a gerada pelos sais metálicos simples.

Outra opção existente são os coagulantes com aditivos, como o ácido fosfórico. Nesse caso, a adição de ácido fosfórico faz que o coagulante se comporte de maneira similar ao com ácido forte, mas, quando é adicionado à água, há a formação do precipitado  $AlPO_4$ . Outros aditivos que são utilizados são polímeros.

O aluminato de sódio ( $NaAlO_2$ ) tem uso limitado, principalmente, devido ao custo elevado em relação aos outros tipos de coagulantes e ao manuseio mais complicado. Quando esse coagulante é adicionado à água, ocorre a formação de hidróxido de alumínio e, ao contrário dos outros coagulantes de sais metálicos, a alcalinidade e o pH da solução tendem a aumentar.

Os sais metálicos simples são utilizados com muita frequência no Brasil, sendo que os tipos mais empregados no mercado são o sulfato de alumínio, sulfato férrico e cloreto férrico ( $Al_2(SO_4)_3$ ,  $Fe_2(SO_4)_3$  e  $FeCl_3$ , respectivamente). Estão disponíveis no mercado como sólidos cristalinos ou soluções concentradas. As características e a qualidade do coagulante são função da matéria prima utilizada e do processo produtivo e a maior parte das impurezas nos coagulantes encontrados no mercado são provenientes da matéria bruta utilizada nos processos de fabricação. (AWWA, 1999).

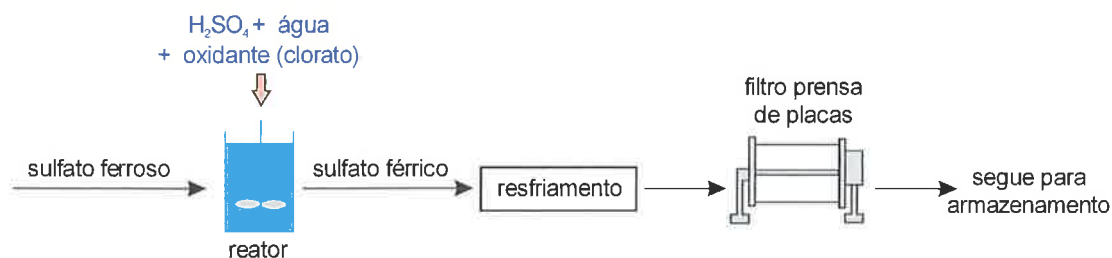
- Produção dos Coagulantes de Sais Metálicos de Ferro

Os sais de ferro são obtidos pela dissolução de minérios de ferro ou de sucata em ácido sulfúrico ou hipocloroso. Podem conter metais pesados como contaminantes, usualmente, manganês, cobre, vanádio, zinco, chumbo e cádmio. A quantidade presente depende da fonte utilizada, sendo que os provenientes da sucata em geral possuem maior quantidade de metais pesados. (AWWA, 1999).

A Kemwater Brasil é uma empresa que fabrica produtos químicos que são utilizados em sistemas de tratamento de água para abastecimento. Na sua unidade localizada em São Paulo, o sulfato férrico é produzido a partir da oxidação do sulfato ferroso, que é trazido da Bahia. O sulfato ferroso é um resíduo da produção do dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), material nobre que é utilizado como corante branco. Na produção do dióxido de titânio, o material minerado é acidificado para solubilizar o ferro (que existe em grande quantidade) e separar o titânio do ferro e outros contaminantes, gerando dois produtos, o dióxido de titânio e o sulfato ferroso, que era considerado sem utilidade, e era disposto inadequadamente no ambiente, até começar a ser utilizado para produção de coagulante.

A reação de oxidação do sulfato ferroso para sulfato férrico é espontânea, mas cineticamente é lenta, e, portanto, na linha de produção são fornecidas condições que aceleram a reação.

A linha de produção utilizada para o sulfato férrico está exposta simplificadamente na Figura 3.8.



**Figura 3.8 – Fluxograma de Produção do Sulfato Férrico**

O sulfato ferroso é oxidado a sulfato férrico em um meio ácido, utilizando clorato como oxidante. A reação ocorre em um intervalo de tempo de duas a três horas e é exotérmica. A solução passa posteriormente por resfriamento, e por um filtro prensa de placas, com a função de filtração (onde é adicionado caulinita para permitir a formação de torta, já que a solução possui poucos sólidos). Após essa etapa, a solução segue para tanques de armazenamento.

Na linha de produção da Kemwater existente na Bahia, o processo é semelhante com algumas alterações. O oxidante utilizado é oxigênio puro e é realizada a remoção de metais pesados por precipitação, gerando um coagulante de melhor qualidade. Esse é um exemplo de como o processo produtivo interfere nas características do coagulante produzido.

- Produção dos Coagulantes de Sais Metálicos de Alumínio

No caso de coagulantes de sais de alumínio, as principais fontes de obtenção são a mineração da bauxita e argilas com alta concentração de alumínio. O alumínio está presente nesses materiais na forma de óxidos, e uma das formas de extração do alumínio desses materiais é com a adição de ácido sulfúrico em temperaturas entre 100 e 120°C, quando o alumínio é solubilizado. Nesse processo, outros compostos presentes na matéria prima podem ser solubilizados, tornando-se contaminantes no produto final. O principal contaminante encontrado é o ferro, e também podem ser encontrados pequenas quantidades de metais pesados como chumbo e cromo. (AWWA, 1991) e (AWWA, 1999).

Para a geração de sulfato de alumínio isento de ferro, o processo de extração é diferente, sendo realizado pela adição de hidróxido de sódio em substituição ao ácido. Esse processo tem um custo mais elevado, e, por esse motivo, raramente esse tipo de coagulante é utilizado em sistemas de tratamento de água para abastecimento. (AWWA, 1991).

- Características dos Coagulantes de Sais Metálicos

Existe uma série de normas nacionais e internacionais que estabelecem critérios para os coagulantes comerciais de sais metálicos.

A ABNT possui uma norma (EB-2005: Sulfato de Alumínio) que fixa as condições exigíveis para o fornecimento e recebimento do produto sulfato de alumínio, para utilização no tratamento de água destinada ao abastecimento público, entre outros fins. A norma fixa condições relativas às características de apresentação, embalagem,

armazenamento, inspeção, aceitação e rejeição, e condições específicas, que englobam composição química e granulometria.

A composição química que deve ser atendida pelo coagulante comercial de acordo com essa norma está colocada na Tabela 3.1. Como pode ser observado, em relação à presença de contaminantes, somente há indicações em relação à presença de ferro e não para outros metais.

**Tabela 3.1 –Características do Sulfato de Alumínio Comercial pela EB-2005**

Características	Sulfato de Alumínio	
	sólido	líquido
Alumínio total solúvel em água (% em massa como $Al_2O_3$ ) - mín.	14,0%	7,5%
Ferro total solúvel em água (% em massa como $Fe_2O_3$ ) - máx.	2,5%	1,2%
Resíduo insolúvel em água (% em massa) - máx.	6,0%	0,2%
Acidez livre (% em massa como $H_2SO_4$ ) - máx.	0,5%	0,5%
Basicidade (% em massa como $Al_2O_3$ ) – máx.	0,4%	0,2%

No Brasil, os valores limites de metais pesados são determinados por quem adquire o produto para utilização, ou pelos próprios fabricantes, que colocam no mercado uma série de produtos com diferentes características. Na Tabela 3.2 são apresentadas as características para o sulfato férrico estabelecidas por algumas empresas que utilizam o produto.

Tabela 3.2 -- Sulfato Férrico: Características Estabelecidas por Alguns Clientes e Fabricantes

	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Insolúveis	Acidez Livre	pH	As	Cd	Cr	Pb	Hg	Se	Ag	Al	Mn
KEMWATER	≥17,0%	≤0,1%	≤ 0,5%	≤2,0	≤10,0	≤4,0	≤40,0	≤10,0	≤0,8	≤8,0	≤40	≤340	≤1200
SABESP	≥17,0%	≤0,1%	≤ 0,5%	≤2,0	≤10,0	≤5,0	≤50,0	≤10,0	≤1,0	≤10,0	≤50	≤340	≤1200
AS KEMIVESI	≥16,0%	≤0,01%	≤ 0%	≤1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CAGECE	≥17,0%	≤0,1%	≤ 0,5%	-	≤10,0	≤4,0	≤40,0	≤40,0	≤0,8	≤8,0	≤40	≤340	≤1200
CATAGUASES	≥17,0%	≤0,2%	≤ 0,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CEN	-	≤0,2%	-	-	≤50,0	≤50,0	≤50,0	≤40,0	≤10,0	≤60,0	-	-	≤2
COPASA	≥17,5%	-	≤ 1,0%	-	≤30,0	≤3,0	≤30,0	≤30,0	≤0,6	≤6,0	≤30	-	-
DAE JUNDIAÍ	≥17,0%	≤0,1%	≤ 0,5%	-	≤50,0	≤5,0	≤50,0	≤50,0	≤1,0	≤10,0	≤50	≤340	≤1200
KEMIRA KEMWATER	≥16,0%	-	≤ 0,2%	≤1,0	≤0,1	≤0,05	≤10,0	≤1,0	≤0,01	≤0,05	-	-	≤800
KEMIRA MILJO S/A	≥15,5%	-	-	≤1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NHEEL	≥17,0%	≤0,1%	≤ 0,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PIRACICABA	≥17,0%	≤0,1%	≤ 0,5%	≤2,0	≤50,0	≤5,0	≤50,0	≤50,0	≤1,0	≤10,0	≤50	≤340	≤1200
SANASA	≥17,0%	≤0,1%	≤ 0,5%	≤2,0	≤50,0	≤5,0	≤50,0	≤50,0	≤1,0	≤10,0	≤50	≤340	≤1200
SEMASA	-	-	-	-	≤50,0	≤5,0	≤50,0	≤50,0	≤1,0	≤10,0	≤50	-	-
SOROCABA	≥17,0%	≤0,1%	± 0,5 %	-	≤50,0	≤5,0	≤50,0	≤50,0	≤1,0	≤10,0	-	-	≤1200

Metais expressos em mg/kg

Fonte: Kemwater



Existem normas da AWWA para sulfato de alumínio, sulfato férrico e cloreto férrico líquido. Em todas é estabelecido que o coagulante não deve conter substâncias em quantidades capazes de causar efeitos deletérios ou injuriosos à saúde de quem consome a água que foi tratada adequadamente com o coagulante.

A NSF (National Sanitation Foundation) estabelece as concentrações máximas de substâncias tóxicas, segundo um procedimento que determina que um coagulante possa gerar diretamente na água uma concentração de 10% da concentração máxima permitida (MCL – *maximum contaminant level*). Portanto, esse valor é função da dosagem de coagulante utilizada e do valor máximo permitido (AWWA, 1991). Os valores estabelecidos estão relacionados nas Tabelas 3.3 e 3.4.

As normas europeias do Comitê Europeu para Padronização (CEN) para sulfato de alumínio e sulfato férrico são específicas para produtos que serão utilizados para abastecimento de água e definem as concentrações máximas para alguns contaminantes, relacionados às matérias primas e processos comumente utilizados. Os valores máximos estabelecidos para o sulfato de alumínio e o sulfato férrico estão expressos nas Tabela 3.3 e 3.4, respectivamente.

**Tabela 3.3 – Limite de Concentração de Substâncias Tóxicas em Coagulantes: Sulfato de Alumínio**

Parâmetro	NSF	CEN		
		Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
Arsênio	330	14	40	100
Cádmio	77	3	50	100
Cromo	330	30	700	1000
Mercúrio	11	4	10	20
Níquel	-	20	700	1000
Chumbo	330	40	200	800
Antimônio	-	20	40	120
Prata	330	-	-	-
Selênio	77	20	40	120

Concentrações em mg/kg de Al

**Tabela 3.4 – Limite de Concentração de Substâncias Tóxicas em Coagulantes: Sulfato Férrico**

Parâmetro	NSF	CEN		
		Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
Arsênio	219	1	20	50
Cádmio	44	1	25	50
Cromo	219	100	350	500
Mercúrio	9	0,1	5	10
Níquel	-	300	350	500
Chumbo	219	10	100	400
Antimônio	-	10	20	60
Prata	219	-	-	-
Selênio	44	1	20	60

Concentrações em mg/kg de Fe<sup>+3</sup>

Em geral, as pequenas quantidades de metais presentes não são suficientes para comprometer a qualidade da água tratada em ETA's. Os metais podem estar presentes na forma solúvel, mas também podem precipitar ou serem adsorvidos nos flocos formados pela adição dos coagulantes. Assim, os metais presentes nos coagulantes podem aumentar a concentração de metais no lodo gerado no processo de tratamento. (AWWA,1999).

As normas citadas não apresentam padrões para coagulantes utilizados para outros fins, além do tratamento de água para abastecimento, como o tratamento de esgotos.

As características do sulfato de alumínio comercial foram estudadas por Cornwell e Westerhoff, Bishop e Saunders (AWWA, 1991). Foram analisadas as concentrações de ferro, alumínio e outros metais (AWWA, 1991). As concentrações de alumínio variaram de 50 g/L a 63 g/L. As concentrações dos contaminantes encontradas são expostas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Concentrações de Metais nos Coagulantes Comerciais

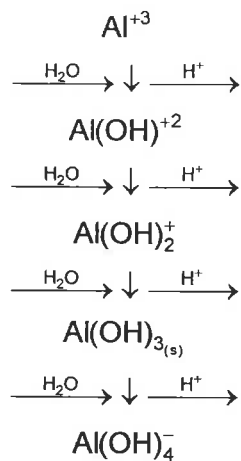
parâmetro	Impurezas no sulfato de alumínio comercial (mg/kg Al)				sulfato de alumínio comercial isento de ferro
	Durham	Tampa	Atlanta 1	Atlanta 2	
arsênio	47,6	-	-	-	-
bário	7,9	2,0	-	-	-
cádmio	-	8-14	0,41	5,4	5,4
cálcio	100	-	-	-	-
cromo	150,8	52-440	1285	726,6	16,1
cobalto	-	34-60	-	-	-
cobre	1,6	16-30	91,2	50,9	-
ferro	18413	17000	30600	37780	180
chumbo	23,8	180-200	298,5	181,6	100
magnésio	198	110-660	-	-	-
manganês	27,0	36-140	331,7	363,3	-
mercúrio	0,02	-	0,08	0,06	-
níquel	1,6	-	723,1	844,7	-
potássio	88,9	-	-	-	-
selênio	-	-	-	-	-
silício	225,4	-	-	-	-
prata	6,3	2-12	4,15	3,63	2,7
sódio	905	-	-	-	-
estanho	-	-	2570	2815,6	44,6
zinco	17,5	4-34	141	154,4	17,9

Concentrações em mg/kg de Al

Como pode ser observado na Tabela 3.5, o principal contaminante encontrado no sulfato de alumínio comercial é o ferro, com concentrações de 17 a 37,78 g/kg Al (0,85 a 2,08 g/L, respectivamente). Os contaminantes seguintes com maiores concentrações foram cromo, manganês, zinco, chumbo e cobre.

### 3.2.2 COMPORTAMENTO QUÍMICO DOS COAGULANTES SAIS METÁLICOS SIMPLES

Os coagulantes compostos por sais metálicos simples, como cloreto férrico, sulfato férrico e sulfato de alumínio, quando são adicionados à água, liberam os íons metálicos trivalentes ( $\text{Fe}^{+3}$  e  $\text{Al}^{+3}$ ).

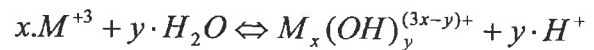


Exemplo de reações de hidrólise para o íon



Esses íons passam por reações de hidrólise, como as expressas ao lado, que são algumas das que podem ocorrer se houver íons de alumínio. Essas reações podem formar produtos mononucleares, polinucleares e o precipitado.

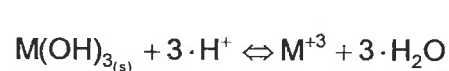
Essas reações podem ser escritas de forma genérica, para qualquer composto metálico M, como:



Dessa reação, pode-se escrever a constante de equilíbrio como colocado na eq. (3).

$$K = \frac{[\text{M}_x(\text{OH})_y^{(3x-y)+}] \cdot [\text{H}^+]^y}{[\text{M}^{+3}]^x} \quad (3)$$

Quando as reações envolvem o composto na forma sólida, como precipitado, a constante de equilíbrio é chamada de constante de solubilidade. A reação e a equação (eq. (4)) resultante para a constante de solubilidade estão colocadas na seqüência (AWWA, 1999).



reação

$$K = \frac{[\text{M}^{+3}]}{[\text{H}^+]^3}$$

constante de solubilidade

eq. (4)

Como se pode observar pelas equações apresentadas, a forma em que estará o metal é função do pH da solução e da concentração total do metal. Esse comportamento pode ser observado nos diagramas de solubilidade para cada metal, que são construídos a partir dessas equações e respectivas constantes de equilíbrio. As Figuras 3.9 e 3.10 apresentam os diagramas de solubilidade para o alumínio e ferro, respectivamente.

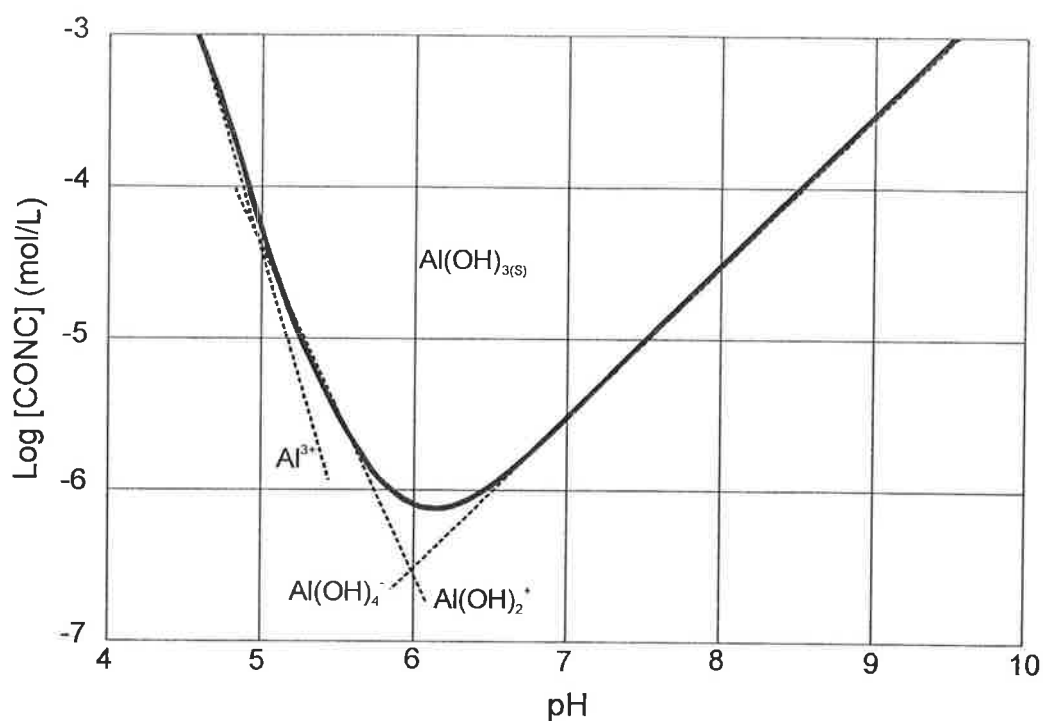


Figura 3.9 – Diagrama de Solubilidade do Alumínio

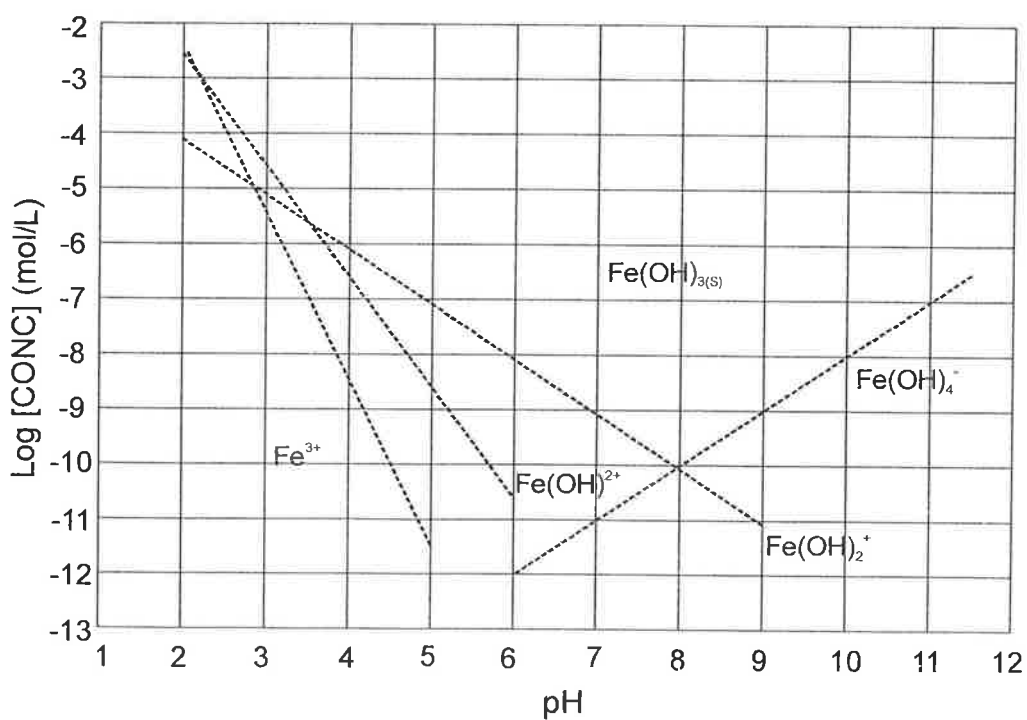


Figura 3.10 – Diagrama de Solubilidade do Ferro

Portanto, em valores de pH baixos, a dissolução do precipitado metálico gera produtos com carga positiva e o íon metálico na forma aquosa (como  $Al^{+3}$  ou  $Fe^{+3}$ ).

Por outro lado, em valores altos de pH, são formados produtos com carga negativa. A solubilidade mínima do alumínio (e conseqüente formação máxima de precipitado) ocorre, portanto, em valores de pH da ordem de 6,3 e para o ferro a solubilidade mínima ocorre em pH da ordem de 8. (AWWA, 1999).

### **3.3 Regeneração de Coagulante**

#### **3.3.1 OBJETIVOS**

Conforme já exposto nos itens anteriores, as etapas de coagulação, floculação e decantação existentes em ETA's convencionais resultam na geração de um lodo composto por hidróxidos metálicos, decorrentes da precipitação do íon metálico existente no coagulante. O princípio da regeneração de coagulante é alterar a forma como o metal está presente, mudando o seu estado para as formas solúveis, de forma a permitir sua reutilização como coagulante.

A regeneração do coagulante utilizado nos processos de coagulação em ETA's convencionais vem sendo estudada desde o início do século XX, sendo relatada a sua utilização em escala real em ETA's no Japão e Grã-Bretanha, entre outros. (AWWA, 1991).

Essa técnica pode trazer benefícios principalmente em dois aspectos:

- redução do volume e da massa de lodo a ser tratado e disposto no ambiente;
- viabilização da reutilização do coagulante.

O primeiro benefício colocado ocorre como conseqüência da redução na quantidade de precipitado, dado que parte dos íons metálicos que se encontram na forma  $M(OH)_{3(s)}$  passarão para as formas solúveis, e, portanto, a quantidade de sólidos em suspensão será reduzida.

Além disso, em uma operação de adensamento ou desaguamento, com separação das fases sólido-líquido, o filtrado resultante possuirá concentrações do metal na forma solúvel elevadas, podendo ser utilizado como coagulante.

Esses dois aspectos podem ser convertidos em vantagem econômica, pois o custo para a regeneração do coagulante pode resultar em um produto de custo inferior ao comercial e as reduções do volume e da massa do lodo geram economias no tratamento e disposição da fase sólida.

### 3.3.2 PRINCÍPIOS E TECNOLOGIA

Observando os diagramas de solubilidade apresentados no item 3.3.2 (Figuras 3.9 e 3.10), em condições fortemente ácidas ou fortemente alcalinas predominam espécies solúveis de ferro e alumínio. Assim, a regeneração do coagulante é realizada somente pela alteração do pH, com a adição de um ácido ou uma base no lodo, solubilizando parte dos precipitados de hidróxidos de alumínio ou ferro. Com isso, na fase líquida, a concentração do metal aumenta e, na fase sólida permanecem parte do precipitado e partículas provenientes da água bruta.

Portanto, a regeneração do coagulante pode ser realizada de duas formas distintas, pela adição de um ácido, chamado regeneração ácida ou pela adição de uma base, chamada de regeneração alcalina.

Masschelein, Devleminck e Genot (1985) citaram que pesquisas anteriores realizadas por Chojnaki (1964) e Rosenquist (1976) haviam indicado que coagulante gerado pelo processo de regeneração ácida era menos puro que o gerado pela regeneração alcalina, que até aquele momento havia sido pouco estudada. (AWWA, 1991).

Alguns outros estudos indicaram que a regeneração do coagulante pela acidificação é mais adequada do que pela alcalinização, como no estudo de Chen (AWWA, 1991). Este, em ensaios de regeneração de alumínio, obteve resultados indicativos que com as bases a recuperação de alumínio era pior, enquanto que utilizando ácidos obteve

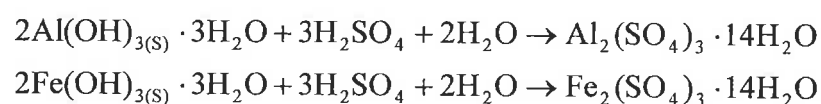
resultados muito próximos aos esperados pelas relações estequiométricas. (AWWA, 1987) e (AWWA, 1991).

Masides, Soley e Mata-Alvarez (1988) também obtiveram resultados que indicaram que a regeneração ácida era mais adequada. Essa conclusão foi obtida a partir de ensaios realizados com ácido sulfúrico e soda cáustica. Nos ensaios com ácido sulfúrico a recuperação de alumínio foi maior e o custo envolvido menor que nos ensaios com regeneração alcalina.

Isaac e Vahid relataram que a recuperação de alumínio utilizando soda cáustica foi pouco satisfatória, pois a matéria orgânica era muito mais solúvel em meio alcalino que em meio ácido, comprometendo a qualidade do coagulante obtido. (AWWA, 1987).

#### • Regeneração Ácida

A regeneração ácida do coagulante pode ser descrita pelas reações abaixo, considerando a utilização de ácido sulfúrico para promover a acidificação, para os hidróxidos de alumínio e ferro, respectivamente (BISHOP et al, 1987):



Por essas reações, a quantidade de ácido que necessitaria ser adicionada é de 1,5 mol por mol de alumínio ou ferro. Essa relação pode ser colocada em termos de massa, resultando em 1,1 kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/ kg Al(OH)<sub>3</sub>.3H<sub>2</sub>O, no caso de sais de alumínio, ou 0,91 kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/ kg Fe(OH)<sub>3</sub>.3H<sub>2</sub>O.

Essa relação considera a dissolução completa das espécies dos metais, mas, em geral, parte do alumínio ou ferro está presente em outros produtos da hidrólise, o que poderia resultar em uma redução da quantidade necessária de ácido a ser adicionada.



Por outro lado, existem outros compostos presentes no lodo que exercem demanda pelo ácido, como, por exemplo, manganês e outros metais, e, portanto a quantidade de ácido necessária pode ser maior que a prevista pela relação estequiométrica (AWWA, 1991).

Outra forma de se definir a quantidade de ácido necessária além da estequiometria é buscando o controle do pH obtido após a adição do ácido. Estudos desenvolvidos por Chen (AWWA, 1991) permitiram concluir que cada lodo possui um pH ótimo, a partir do qual tem-se a máxima recuperação de coagulante. Em geral, para valores de pH inferiores a 2,5 a recuperação atingia seu máximo.

Issac e Vahidi (AWWA, 1991) concluíram que o pH ótimo seria de 3, pois abaixo disso ocorreria um aumento muito significativo na cor, com implicações na qualidade do coagulante regenerado, provavelmente decorrente do aumento na quantidade de matéria orgânica solúvel. Em outra pesquisa, conduzida por Roberts e Roddy (AWWA, 1991), concluiu-se que o pH ótimo era função da alcalinidade da água bruta. Como conclusão, a maioria das pesquisas chegou a valores de pH ótimo entre 1 e 3.

Outro parâmetro importante no projeto e operação de sistemas para a regeneração de coagulante é o tempo de contato após a aplicação do ácido para que ocorra a solubilização. De acordo com ASCE (1996), o tempo de contato recomendado é de 10 a 20 minutos, baseado em operações piloto realizadas por Saunders e Roeder, 1991. Outros dados também confirmam esses valores. Cornwell e Susan chegaram à conclusão que, de acordo com a cinética de dissolução do alumínio, após 15 minutos de mistura o equilíbrio era alcançado (AWWA, 1987).

De acordo com Masides, Soley e Mata-Alvarez (1988), outro fator que interfere na recuperação obtida é o pH de coagulação da água bruta e a temperatura. Baseado em uma série de ensaios, foi determinada uma equação para o lodo em estudo relacionando esses parâmetros e a recuperação de alumínio. Essa relação está apresentada na eq. (5).

$$Y = 192,7 - 2,3 \cdot T + 13 \cdot \text{pH}_C - 70,1 \cdot \text{pH}_R \quad (5)$$

onde: Y: recuperação de alumínio;

T: temperatura;

pH<sub>C</sub>: pH de coagulação da água bruta;

pH<sub>R</sub>: pH de regeneração

O estudo concluiu que a temperatura tem muito pouco efeito na recuperação de alumínio, e que o principal aspecto é o pH de acidificação. O pH de coagulação também foi avaliado como tendo pouco efeito na recuperação de alumínio obtida.

#### • Regeneração Alcalina

A regeneração alcalina tem sido menos estudada que a regeneração ácida. As principais bases utilizadas para a regeneração alcalina foram hidróxido de sódio (Na(OH)) e cal (CaO). As reações que descrevem a regeneração alcalina de alumínio utilizando essas bases estão colocadas abaixo (AWWA, 1991).



Por essas equações, a demanda de hidróxido de sódio é 1 mol por mol de alumínio e para a cal é 0,5 mol por mol de alumínio. Em massa essas relações se tornam 1,48 kg de hidróxido de sódio por kg de alumínio e 1,37 kg de cal por kg de alumínio.

Alguns estudos práticos demonstraram que em geral a quantidade de ácido a ser adicionada é maior que a prevista pela relação estequiométrica (AWWA, 1991) e (Masschelein, Devleminck e Genot, 1985). Masschelein, Devleminck e Genot (1985) realizaram ensaios tipo *jar test* utilizando hidróxido de sódio e cal, e avaliou a concentração de alumínio e de metais obtidas no coagulante regenerado. A relação molar obtida para o hidróxido de sódio foi de 1,75, com recuperação de 80% de alumínio, superior ao valor previsto de 1.

De forma análoga ao que acontece na regeneração ácida, essas reações assumem a dissolução completa do hidróxido de alumínio na forma sólida e a formação de  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ , sem considerar a possibilidade de formação de outras espécies que alterariam de forma significativa a estequiometria da reação. (AWWA, 1991).

Algumas pesquisas identificaram alguns problemas com o uso da cal para a regeneração. Em 1982, Holmes (AWWA, 1991) concluiu que havia a formação de aluminatos de cálcio pouco solúveis, o que reduzia a quantidade de alumínio solúvel e aumentava o volume de lodo gerado pela precipitação do aluminato de cálcio.

Na regeneração alcalina o pH de alcalinização é uma variável fundamental, assim como na regeneração ácida. Masschelein, Develminck e Genot (1985) concluíram que o pH ideal para regeneração com hidróxido de cálcio era de 11,4 a 11,8, com recuperação de alumínio da ordem de 80% e entre 11,2 e 11,6 para regeneração com cal, obtendo recuperação menores que 50%.

Em 1975, Wang e Yang concluíram que na regeneração com hidróxido de sódio era necessário pH extremamente elevado, maior que 13,5 para que se alcançasse recuperação de alumínio da ordem de 100%. Isaac e Vahidi obtiveram resultados semelhantes, apresentando a conclusão que a regeneração com hidróxido de sódio só era viável com pH superior a 11. (AWWA, 1991).

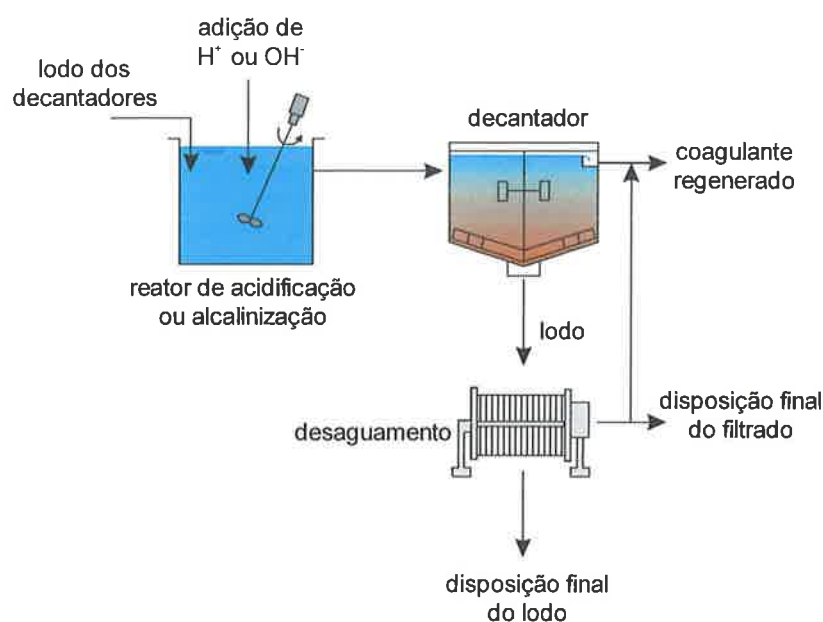
Assim como na regeneração ácida, outro parâmetro importante é o tempo de alcalinização. Wang e Yang (1975) apresentaram estudo da cinética da dissolução do alumínio na acidificação e concluíram que um intervalo de tempo de cinco minutos era suficiente para a recuperação máxima de alumínio. (AWWA, 1991).

- **Instalações**

As instalações para regeneração de coagulante consistem, de forma geral, na inclusão de um tanque de mistura rápida para acidificação ou alcalinização, seguido por

algum processo de desaguamento, onde ocorre a separação de fases, usualmente por sedimentação.

A Figura 3.11 ilustra esquematicamente o fluxograma de um arranjo possível para a regeneração de coagulante (AWWA, 1991). Ressalta-se que qualitativamente as instalações serão as mesmas para a regeneração ácida ou alcalina.



**Figura 3.11 – Arranjo Possível de Sistema para Regeneração de Coagulante**

A etapa de desaguamento pode ser realizada utilizando basicamente as mesmas tecnologias utilizadas para o desaguamento de lodo de ETA's, como filtro prensa de placas, centrífugas e outros. No entanto esses equipamentos devem ser adequados para trabalhar com lodo em faixas de pH mais distantes do neutro, ou ácido ou alcalino.

- **Lodo Resultante**

O lodo resultante do processo de regeneração de coagulante tem características diferentes do lodo não acidificado. A primeira consequência do processo de regeneração é a redução do volume e da massa de lodo.

Estudos anteriores relatam reduções muito significativas do volume de lodo na regeneração ácida, como no estudo de Isaac e Vahid (1961) com regeneração ácida, que obtiveram redução de 74% no volume de lodo, e Streicher, que em ensaios piloto com filtro prensa de placas atingiu redução da ordem de 90% no volume (AWWA, 1987).

A redução em massa de lodo seco pode ser estimada pelas equações 6 e 7 expostas abaixo (AWWA, 1987), sendo que o resultado obtido pode ser maior que o calculado se houver dissolução de compostos orgânicos e menor se a dissolução de hidróxidos for incompleta (AWWA, 1987) e (BISHOP et al, 1987):

- regeneração de alumínio:

$$\text{redução(\%)} = \frac{4,89 \cdot D_{\text{Al}}}{4,89 \cdot D_{\text{Al}} + \text{SS} + \text{A}} \cdot 100 \quad (6)$$

- regeneração de ferro:

$$\text{redução(\%)} = \frac{2,88 \cdot D_{\text{Fe}}}{2,88 \cdot D_{\text{Fe}} + \text{SS} + \text{A}} \cdot 100 \quad (7)$$

onde: Q: vazão em m<sup>3</sup>/dia;

D<sub>Al</sub>: dosagem de sais de alumínio, expressa como Al em mg/L;

D<sub>Fe</sub>: dosagem de sais de ferro, expressa como Fe em mg/L;

SS: concentração de sólidos em suspensão totais na água bruta em mg/L;

A: sólidos de outros produtos utilizados (polímeros, carvão ativado em pó, etc.) em mg/L;

Bishop et al (1987) coloca que nos ensaios de campo realizados em Durham, na ETA Willians, foram obtidas reduções de sólidos de 53% e 27%, sendo que os valores teóricos esperados eram 42% e 39%, respectivamente.

Outra característica importante é a desidratabilidade do lodo resultante após a extração do coagulante. Segundo Bishop et al (1987), o lodo resultante após a acidificação em geral é menos volumoso, mais concentrado e com melhor desidratabilidade. Em ensaios de desidratação em filtro prensa de placas e em centrífugas do lodo acidificado proveniente de uma ETA convencional que utilizava sulfato de alumínio como coagulante, conseguiu-se obter teores de sólidos maiores que 30% com o lodo acidificado condicionado com polímero e cloreto férrico (BISHOP et al, 1991).

De acordo com AWWA (1987) Streicher, em ensaios pilotos com regeneração ácida, desidratou o lodo utilizando filtro prensa de placas e pela decantação. Obteve teores de sólidos totais de 20% pela decantação e valores da ordem de 45% em ensaios no filtro prensa de placas. Chen (AWWA, 1987) concluiu em suas pesquisas que a desidratabilidade do lodo (avaliada pela resistência específica) não era máxima quando a regeneração do coagulante era máxima, mas sim quando a recuperação de alumínio se situava entre 60% e 80%.

### 3.3.3 CONTAMINANTES

Os principais contaminantes encontrados nos coagulantes regenerados são matéria orgânica, ferro, manganês e outros metais e compostos orgânicos.

A presença de contaminantes em concentrações maiores que as encontradas nos coagulantes comerciais gera uma preocupação em relação à sua aplicação no tratamento de águas para abastecimento, pois isso poderia comprometer a qualidade da água obtida.

- Matéria orgânica:

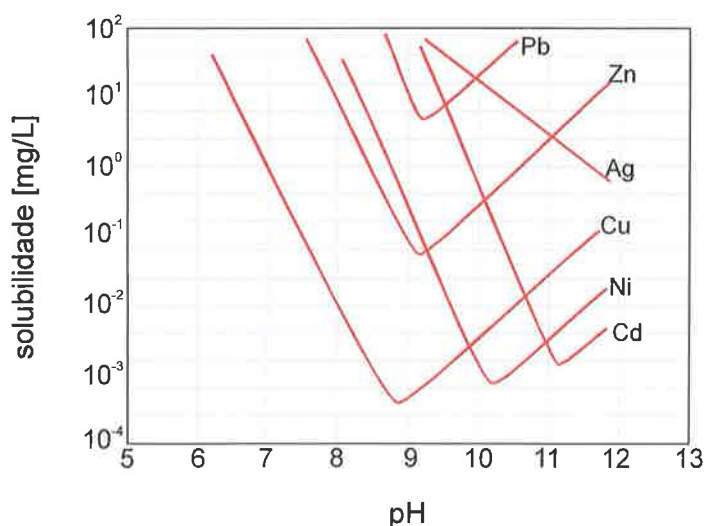
Diversos autores relatam que o aumento na concentração de matéria orgânica gera um aumento na cor. De acordo com AWWA (1991), Fulton defendeu que essa cor não seria transferida para a água se esse coagulante fosse empregado em sistemas de tratamento de água, pois seriam removidos nos processos de coagulação, floculação e

decantação. Uma preocupação é que o aumento da matéria orgânica pode aumentar o potencial de formação de subprodutos da desinfecção (ASCE, 1996).

Os coagulantes obtidos pela regeneração alcalina apresentaram mais problemas de remoção de matéria orgânica e cor que coagulantes obtidos pela regeneração ácida, pois a ligação da matéria orgânica com o lodo seria mais solúvel em faixas de pH mais altas (ISAAC e VAHID, 1961 apud AWWA, 1991).

- Metais:

No item 3.3.2, foram apresentados os diagramas de solubilidade do alumínio e do ferro. Outros metais apresentam comportamento semelhante e tornam-se mais solúveis em valores de pH altos e baixos. Esse comportamento está ilustrado na Figura 3.12 (CHUNG, 1989).



**Figura 3.12 – Diagrama de Solubilidade para Alguns Metais**

Cada metal possui um valor de pH distinto no qual a solubilidade é mínima. Mas todos se tornam mais solúveis em valores de pH baixos ou altos. Portanto, quando se promove a acidificação ou alcalinização do meio buscando solubilizar ferro ou alumínio, a solubilidade dos outros metais também crescerá, e, conseqüentemente, a concentração na fase dissolvida aumentará.

Os principais metais que aparecem como contaminantes são o ferro (no caso de coagulantes de alumínio) e manganês, que são compostos comuns na composição dos solos naturais, o que justifica a frequência e as concentrações em que são encontrados. Além desses, em alguns estudos realizados aparecem o cromo, chumbo, cobre, arsênio e zinco (AWWA, 1991).

De acordo com AWWA (1991), em pesquisa realizada por Saunders com regeneração ácida, foi concluído que nem todos os metais presentes no lodo se solubilizam, de maneira similar ao que ocorre com o ferro e o alumínio, parte se mantém no lodo, não indo para o coagulante regenerado.

Masschlein, Devleminck e Genot (1965) realizaram estudo de regeneração alcalina com hidróxido de sódio e cal, e concluiu que as concentrações de metais quando a regeneração era realizada com cal eram 10 a 15 vezes menores. O contaminante encontrado em maior concentração foi o ferro, seguido por níquel, cobre, chumbo, manganês e cromo.

- Contaminantes Orgânicos:

Em relação aos contaminantes orgânicos, em alguns ensaios no lodo não acidificado foi detectada a presença de alguns contaminantes orgânicos, como clorofórmio, 1,1,1-tricloroetano, pireno, antraceno, 2,4-diclorofenol, benzeno, tolueno, 1,2-dicloroetano e clorobenzeno, sendo que as maiores concentrações foram de compostos voláteis.

Já no coagulante regenerado, nenhum desses compostos foi detectado. Foram colocadas três possíveis explicações para esse fato: a primeira seria a volatilização desses compostos, a segunda a continuidade desses compostos nos sólidos, e por fim a destruição desses contaminantes. (AWWA, 1991).



### 3.3.4 VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA

Como se afirmou anteriormente, um dos problemas enfrentados para a viabilização dessa técnica é a qualidade do coagulante regenerado, principalmente se o objetivo for a reutilização do coagulante em ETA's.

Um dos principais aspectos a serem considerados em relação a qualidade do coagulante é a concentração do metal de interesse, alumínio ou ferro. Os valores obtidos por alguns pesquisadores para a concentração de alumínio estão indicados na Tabela 3.6.

**Tabela 3.6 – Concentrações de Alumínio Obtidas em Coagulantes Regenerados**

pesquisador	regeneração	concentração (mg/L)
Isaac e Vahidi (1961)*	ácida – ácido sulfúrico	740-1590
Webster (1967)*	ácida – ácido sulfúrico	360-545
Saunders (1989)*	ácida - ácido sulfúrico	2700
Bishop et al (1987)	ácida – ácido sulfúrico	2200
Masschelein et al (1985)	alcalina com cal	270
Masschelein et al (1985)	alcalina com hidróxido de sódio	945

\*AWWA (1991)

Comparando esses resultados com o mínimo estabelecido na norma, de 40 g/L para sulfato de alumínio, pode-se verificar que as concentrações dos coagulantes regenerados são significativamente menores, da ordem de 10 vezes menores.

Alguns pesquisadores avaliaram a qualidade do coagulante regenerado na aplicação em processos físico-químicos. Em trabalho de 1967, Slechta e Culp (AWWA, 1991) apresentaram resultados da utilização de coagulante de alumínio obtido pela regeneração ácida na remoção de turbidez da água bruta, em conjunto com coagulante comercial. Foi concluído que a remoção atingia aproximadamente o mesmo valor quando da utilização do coagulante regenerado.

Masschelein, Devleminck e Genot (1985) obtiveram resultados semelhantes na utilização de coagulante regenerado com cal para coagulação de água de um

manancial superficial. Resultados de Wang e Yang também levaram a conclusão que os resultados obtidos com a aplicação de coagulantes comercial ou regenerado são muito próximos (AWWA, 1991).

Outro problema freqüentemente levantado em relação à qualidade dos coagulantes regenerados é que pode ocorrer a dissolução de contaminantes provenientes da água bruta que estavam no lodo, e com a reutilização do coagulante esses contaminantes seriam recirculados, o que resultaria em concentrações cada vez maiores (ASCE, 1996). Essa questão foi discutida no item 3.3.3.

Uma possibilidade para contornar o problema da qualidade do coagulante em relação à concentração de contaminantes é a utilização dos coagulantes regenerados em outras aplicações ao invés do uso em ETA's. Com isso, o risco envolvido na sua utilização é reduzido, o que tornaria possível a sua viabilidade técnica.

Masides, Soley e Mata-Alvarez (1988) estudaram a aplicação do coagulante regenerado no tratamento de esgotos. Em estudo comparativo utilizando coagulante novo e regenerado, foi concluído que o coagulante regenerado apresentava boa qualidade, tendo sido obtidos resultados similares com os dois coagulantes.

O outro ponto a ser considerado é a viabilidade econômica da regeneração do coagulante. Diversos estudos avaliaram esse aspecto, como será apresentado na seqüência.

Roberts e Roddy, em Tampa, estimaram uma redução de custos de 70%, considerando o reaproveitamento do coagulante e a redução do volume de sólidos. Nas instalações em escala real, em *Athens Utilities Board, Tennessee*, observou-se uma redução de custos de 50%, sendo um terço proveniente da economia de coagulante e dois terços devido à redução dos sólidos. (AWWA, 1987).

Em 1987 a American Water Works Service Company desenvolveu uma análise comparativa de custos para diversas opções de tratamento e desaguamento de lodos

de ETA's, considerando custos de implantação, operação e manutenção. Uma característica observada é que os custos de operação e manutenção no sistema com regeneração de coagulante eram superiores aos outros sistemas quando a carga de sólidos era da ordem de 136 kg/d. Isso se invertia quando a carga do sistema era maior, da ordem de 3400 kg/d. Nesse caso os custos de operação e manutenção se tornavam bem inferiores aos dos outros sistemas. (AWWA, 1991).

Em Spartanburg foi realizado um teste piloto para fornecer subsídio para uma avaliação econômica. Foi realizada a comparação de um sistema com adensadores de lodo e leito de secagem, e a opção com a regeneração do coagulante antes do encaminhamento do lodo ao leito de secagem. (AWWA, 1991).

A conclusão que se obteve nesse caso foi que a regeneração de coagulante geraria um aumento nos custos da ordem de US\$ 7.800,00 por ano. Nesse caso, um fator que foi determinante foi a grande proximidade do local de disposição final do lodo, um aterro existente operado pela companhia de água, que não cobrava pela disposição do lodo. Com isso os custos relacionados ao transporte e disposição final do lodo eram pouco significativos, o que praticamente anulava uma das vantagens do sistema com regeneração de coagulante, que é a redução no volume de lodo. (AWWA, 1991).

Em estudo de avaliação econômica realizada por Masides, Soley e Mata-Alvarez (1988), considerando custos de implantação e operação foi concluído que a implantação de um sistema de regeneração de coagulante em uma ETA existente seria viável economicamente. O tempo de retorno do investimento para implantação do sistema foi estimado entre 0,7 e 1,7 anos, e considerando um período de 10 anos a taxa interna de retorno calculada foi de 275%.

Observando-se os casos estudados pode se perceber que entre as características que interferem na avaliação econômica, destacam-se características específicas de cada local, como a composição da água bruta, dose de coagulante utilizada, e custos para tratamento e disposição do lodo. Portanto, fica claro que a viabilidade econômica só

pode ser avaliada para cada situação específica, com um estudo para cada caso, considerando-se suas particularidades.

### ***3.4 Processos Físico-Químicos para o Tratamento de Esgotos***

Os coagulantes podem ser utilizados em diferentes etapas dos sistemas de tratamento de esgotos. A utilização da precipitação química no tratamento de esgotos é uma técnica estabelecida, e pode ser empregada para a remoção de metais e outros compostos inorgânicos, sólidos em suspensão e óleos e graxas. (EPA, 2000).

Alguns exemplos são no tratamento primário em sistemas de lodos ativados convencionais, visando aumentar a remoção de sólidos em suspensão e matéria orgânica, na remoção de fósforo e no condicionamento de lodos.

Quando o objetivo é promover um aumento na remoção de sólidos em suspensão e DBO, uma alternativa é aplicar o coagulante no decantador primário. Essa alternativa é particularmente adequada quando a vazão é intermitente ou com grande variação, quando há a presença de resíduos industriais que possam interferir com a etapa de tratamento biológico ou quando a estação está trabalhando com vazão ou carga maior que a que foi utilizada no projeto. (EPA, 1979).

A remoção de fósforo do efluente de estações de tratamento de esgotos (ETE's) tem recebido atenção desde a década 60. O controle desse nutriente no efluente descartado por estações de tratamento de esgotos é importante, pois esse elemento acelera os processos de eutrofização dos corpos d'água (METCALF & EDDY, 1995). Além disso, entre os vários fatores necessários para o crescimento de algas, o esse nutriente é um que pode ser controlado de forma viável economicamente (SINELLI, 2002).

Nos esgotos sanitários, o fósforo aparece na forma de fosfato, que pode ser classificado de acordo com as características físicas ou químicas. No primeiro caso, o fosfato é classificados em solúvel (ou dissolvido) e particulado (ou suspensão). Essas frações são separadas pela filtração em membrana 0,45  $\mu\text{m}$  (SEDLAK, 1991).

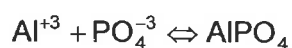
Em relação à classificação pelas características químicas, são divididos em ortofosfato, fosfato condensado (piro, meta e outros tipos de polifosfato) e fosfato orgânico. A forma predominante em que estará o fosfato é função do pH. (EPA, 1976)

Uma das possibilidades para a remoção do fósforo é através da adição de compostos químicos que se combinam com o fosfato, formando produtos insolúveis, que podem ser removidos por processos de separação de sólidos. A remoção de fósforo por precipitação química, principalmente com sais metálicos, tem se mostrado uma opção muito viável e amplamente utilizada, sendo de fácil aplicação e eficaz. (MARTIN e WILSON, 1994) e (GALARNEAU e GEHR, 1997).

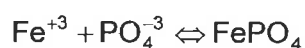
Algumas pesquisas vem estudando a realização da remoção de fósforo em estações de tratamento de esgotos pela aplicação direta do lodo de ETA no processo, opção que vem apresentando resultados satisfatórios (GALARNEAU e GEHR, 1997).

Alguns coagulantes que podem ser utilizados com o objetivo de promover a remoção de fósforo são o sulfato de alumínio, cloreto ou sulfato férrico, aluminato de sódio e cal. No caso dos coagulantes de sais metálicos, as reações que geram os produtos insolúveis são:

Alumínio:



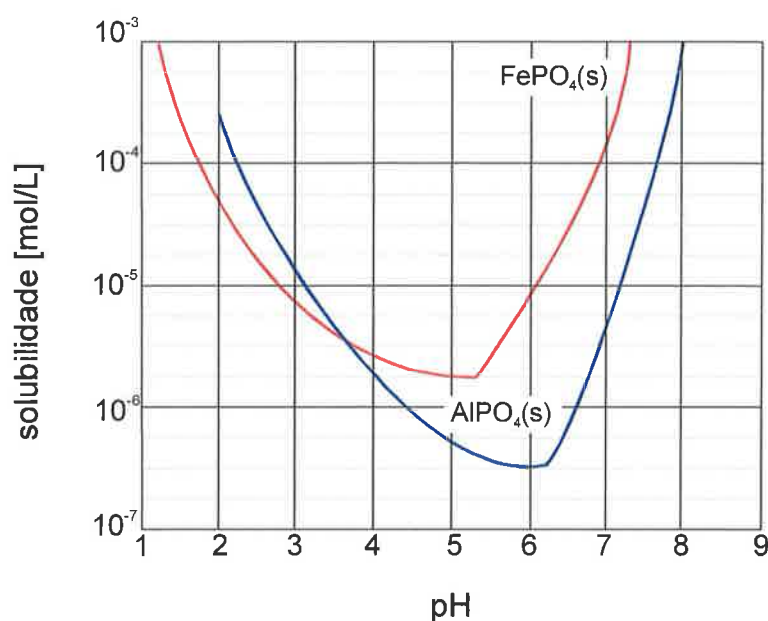
Ferro:



Além dessas espécies, da mesma forma como foi exposto no item 3.1.1, também ocorrerá a formação de precipitado de hidróxido metálico ( $\text{Al}(\text{OH})_3$  e  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) (METCALF & EDDY, 1995).

A Figura 3.13 apresenta o diagrama de solubilidade para os fosfato férrico e de alumínio. Pode ser observado que para o fosfato férrico ( $\text{FePO}_4$ ) a mínima

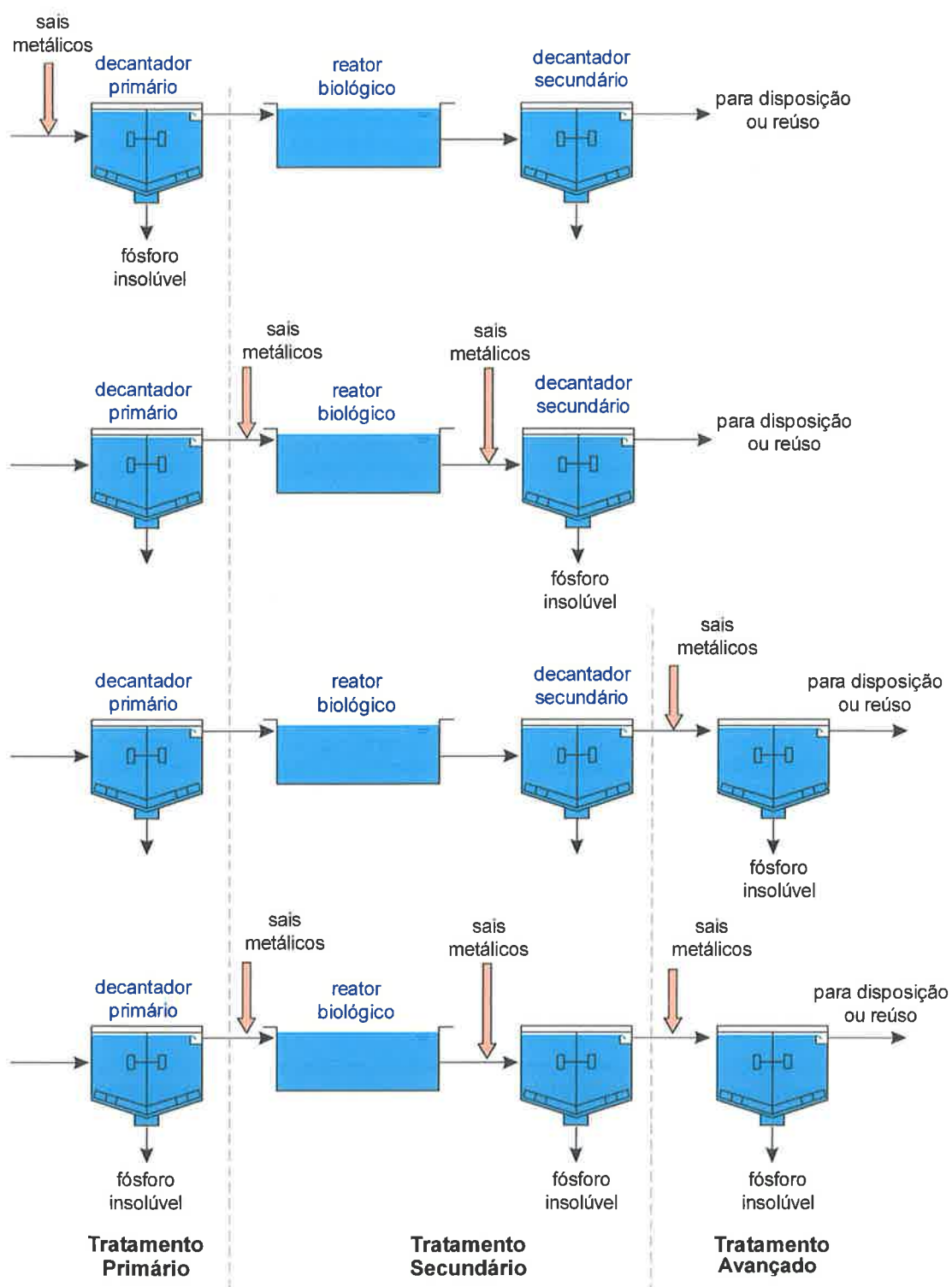
A Figura 3.13 apresenta o diagrama de solubilidade para os fosfato férrico e de alumínio. Pode ser observado que para o fosfato férrico ( $\text{FePO}_4$ ) a mínima solubilidade acontece para pH de aproximadamente 5,5, e, para o fosfato de alumínio, com pH de aproximadamente 6,5, com solubilidade menor que o precipitado formado a partir do ferro.



**Figura 3.13 – Diagrama de Solubilidade do  $\text{FePO}_4$  e  $\text{AlPO}_4$**

Os sais metálicos são mais eficientes na remoção de ortofosfato, moléculas com apenas um átomo de fósforo, que de polifosfato e fosfato orgânico. Por esse motivo, em geral é mais adequado que a adição dos sais metálicos ocorra após o tratamento biológico (quando parte do fósforo orgânico já foi convertido a ortofosfato).

No caso de sistemas de lodo ativado, várias configurações podem ser adotadas, como as ilustradas na Figura 3.14 (METCALF & EDDY, 1995).



**Figura 3.14 – Configurações Possíveis para Remoção de Fósforo**

Quando a aplicação ocorre na etapa de tratamento primário, ocorre a formação de espécies insolúveis, tanto de hidróxidos quanto com o fosfato, pela reação com o ortofosfato. O fósforo orgânico e o polifosfato são removidos por outros

mecanismos, como adsorção nos flocos formados pela precipitação dos hidróxidos metálicos. (METCALF & EDDY, 1995) e (GALARNEAU e GEHR, 1997).

Nesse caso, além da remoção de fósforo, há um aumento na remoção de sólidos em suspensão e DBO (demanda bioquímica de oxigênio). A formação dos precipitados de hidróxido metálico também melhora a eficiência dos decantadores secundários, quando os sais metálicos são aplicados no tratamento secundário. Para que se obtenham resultados satisfatórios, em geral, a dosagem de sais de alumínio ou de ferro necessária é alta, e, portanto, a produção de lodo é alta. (METCALF & EDDY, 1995) e (SINELLI, 2002).

A solubilidade do fósforo é função do pH, sendo que a menor solubilidade ocorre com pH de 6,3, mas, no caso da utilização de sais de alumínio, a eficiência do sistema é adequada para a faixa de pH entre 5,5 e 7. Esses valores de pH são compatíveis com a maioria dos tratamentos biológicos, portanto é viável a aplicação no tratamento secundário. (METCALF & EDDY, 1995).

Sinelli (2002) ressaltou a viabilidade da associação do sistema anaeróbio (como reatores UASB – reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo) com o físico-químico. Essa combinação pode ser feita por meio da adição do coagulante no afluente ao reator anaeróbio ou como um pós tratamento para o efluente (SANTOS, 2001).

Esse arranjo é interessante, pois os reatores UASB são eficientes na remoção de matéria orgânica e sólidos em suspensão, mas tem efeito reduzido sobre a concentração de macronutrientes (como nitrogênio e fósforo). Portanto, os processos físico-químicos podem ser utilizados para que sejam atingidos os limites necessários para a destinação final do efluente, removendo DBO e sólidos em suspensão residuais e nutrientes. (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994).



Segundo Van Haandel e Lettinga (1994), no reator UASB as substâncias orgânicas são mineralizadas e permanecem principalmente as formas inorgânicas (ortofosfatos e polifosfatos no caso do fósforo).

Sinelli (2002) relata resultados de remoção de SST da ordem de 95%, em ensaios tipo *jar-test* utilizando dosagens de 50 a 70 mg/L de cloreto férrico como coagulante para pós-tratamento de efluentes de reator UASB (reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo).

Em ensaios pilotos, onde era encaminhado efluente de reator UASB para sistema de tratamento físico-químico composto por tanques de mistura e decantador, foram apresentados resultados onde a remoção de fósforo total foi da ordem de 90%. Para a DQO, foram apresentados resultados de eficiência de remoção de 20% a 75% e de sólidos em suspensão total de 18% a 95%. Também foi utilizado como coagulante o cloreto férrico. (SINELLI, 2002).

Outra etapa em que podem ser utilizados coagulantes é na fase de tratamento do lodo. O lodo gerado em ETE's, na maioria das vezes, precisa passar por uma etapa de desaguamento para redução de volume. Para que essa etapa possa ser realizada de forma satisfatória, é necessário realizar o condicionamento, visando desestabilizar as partículas, permitindo que se agreguem em flocos, facilitando a separação sólido-líquido. Esse condicionamento pode ser realizado pela adição de sais de ferro ou alumínio.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Coleta das Amostras de Lodo

Nos ensaios foram utilizados lodos oriundos da Estação de Tratamento de Água do Guarauá (ETA Guarauá) e da Estação de Tratamento de Rio Grande (ETA Rio Grande), ambas localizadas na Região Metropolitana de São Paulo e operadas pela SABESP.

Essas duas ETA's fazem parte do total de 8 sistemas produtores da RMSP, que possui capacidade total de  $71 \text{ m}^3/\text{s}$  (SABESP, 2004b). A localização desses sistemas está indicada na Figura 4.1.

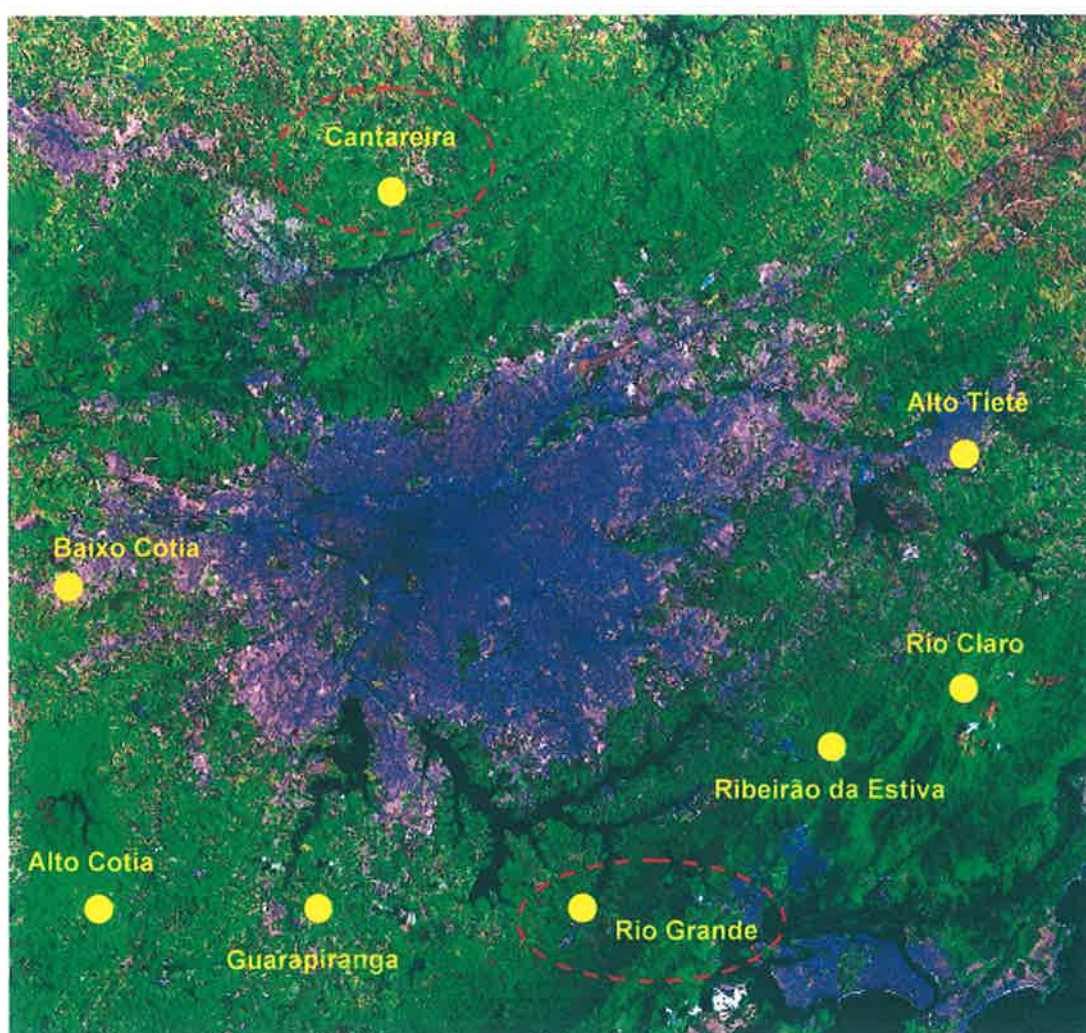


Figura 4.1 – Sistemas Produtores da RMSP

A ETA Guarauá (Figura 4.2) faz parte do sistema Cantareira, que é o maior sistema produtor dos 8 apresentados. Os mananciais desse sistema são os Rios Jaguari, Jacareí, Cachoeira, Atibainha e Juqueri. A ETA Guarauá opera com vazão de  $33 \text{ m}^3/\text{s}$ , ou seja 46% da capacidade total dos sistemas da RMSP (SABESP, 2004b).



**Figura 4.2 – Vista da ETA Guarauá**

Esse sistema abastece 8,8 milhões de pessoas, distribuídas nas zonas norte, central, parte da leste e oeste da capital e nos municípios de Franco da Rocha, Francisco Morato, Caieiras, Osasco, Carapicuíba, São Caetano do Sul e parte dos municípios de Guarulhos, Barueri, Taboão da Serra e Santo André (SABESP, 2004b).

A ETA Rio Grande (Figura 4.3) faz parte do sistema com mesmo nome e opera com vazão da ordem de  $5,3 \text{ m}^3/\text{s}$ , abastecendo 1,2 milhão de pessoas em Diadema, São Bernardo do Campo e parte de Santo André. O sistema produtor Rio Grande utiliza como manancial um braço da Represa Billings (SABESP, 2004b).



**Figura 4.3 – Vista da ETA Rio Grande**

Essas duas ETA's foram escolhidas por apresentarem vantagens para a obtenção do lodo. Na ETA Guaraú, os decantadores são equipados com sistema de remoção de lodo, como pode ser visto na Figura 4.4.



**Figura 4.4 – ETA Guaraú: Vista dos Decantadores e Floculadores**

O lodo é coletado nos poços de visita onde convergem as tubulações de descarga dos decantadores (Figura 4.5), onde é possível se obter um lodo fresco e com teor de sólidos relativamente elevado.



**Figura 4.5 – ETA Guaraú: Local de Coleta de Lodo**

Na ETA Rio Grande também existe um sistema de remoção contínua de lodo, que permite que seja realizada a coleta (Figura 4.6). O lodo é removido por sucção e encaminhado a canais ao lado dos decantadores. A coleta foi realizada em caixa para onde são encaminhados os lodos de todos os decantadores (Figura 4.7).



**Figura 4.6 – ETA Rio Grande: Sistema de Remoção de Lodo dos Decantadores**



**Figura 4.7 – ETA Rio Grande: Ponto de Coleta de Lodo**

A ETA Guaraú utiliza como coagulante o sulfato de alumínio, e, baseado em condições econômicas, em alguns períodos utiliza também sulfato férrico combinado com o sulfato de alumínio.

Na ETA Rio Grande é utilizado sulfato férrico como coagulante. Na Figura 4.8 pode-se ver o ponto de aplicação do coagulante e cal (para ajuste de pH).



**Figura 4.8 – ETA Rio Grande: Ponto de Aplicação do Coagulante**

Na Tabela 4.1 são apresentadas algumas características da água bruta utilizada nessas ETA's e algumas características dos processos.



Tabela 4.1 – Características das ETA's

Parâmetro	ETA Guaraú	ETA Rio Grande
<b>Características da água bruta</b>		
turbidez (UNT)	3,1 <sup>1</sup>	4,5 <sup>2</sup>
cobre (mg/L) <sup>1</sup>	nd	0,03
manganês (mg/L) <sup>1</sup>	0,04	0,06
<b>Características do processo</b>		
vazão (m <sup>3</sup> /s) <sup>3</sup>	33 m <sup>3</sup> /s	5,3 m <sup>3</sup> /s
coagulante <sup>2</sup>	sulfato de alumínio sulfato férrico	sulfato férrico

nd: não detectado

Fontes consultadas:

<sup>1</sup> CETESB, 2004 (valores médios de 6 análises nos pontos de captação dos reservatórios)

<sup>2</sup> SABESP ETA Rio Grande e ETA Guaraú

<sup>3</sup> SABESP, 2004b

Nas duas ETA's o lodo foi coletado em bombonas de 20 L e levado ao Laboratório de Saneamento prof. Lucas Nogueira Garcez, do Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da USP, onde foram realizados os ensaios.

## 4.2 Regeneração do Coagulante

### 4.2.1 DESCRIÇÃO DO ENSAIO

Nos ensaios foi realizada a regeneração ácida e não alcalina, pois, conforme apresentado anteriormente, estudos anteriores indicaram ser esse o procedimento mais eficaz. O ácido utilizado foi o ácido sulfúrico, por ser o mais utilizado nas investigações apresentadas na literatura, e por apresentar custo inferior ao ácido clorídrico, que também foi considerado eficiente em outras pesquisas (AWWA, 1991).

O procedimento básico adotado para a realização dos ensaios de regeneração consiste nas seguintes etapas:

- um béquer de 500 mL é preenchido com o lodo a ser ensaiado;

- é adicionado o ácido sulfúrico ao lodo e mantido sobre agitação por um período pré-determinado. Durante essa etapa é monitorado o pH da mistura ao longo do tempo;
- após completado o tempo de ensaio, são retiradas duas amostras;
- uma amostra é filtrada em papel de filtro nº 40 ou nº 42 e posteriormente em membrana 0,45  $\mu\text{m}$  (Figura 4.9) e submetida à análise de ferro ou alumínio e em alguns casos metais (análises realizadas conforme descrito no item 4.3);
- a outra amostra é utilizada para a determinação das concentrações de sólidos em suspensão totais (SST), fixos (SSF) e voláteis (SSV).



**Figura 4.9 – Equipamento para Filtração do Lodo Acidificado**

Em cada ensaio foram adotadas condições específicas, conforme descrito no item seguinte.

#### 4.2.2 DEFINIÇÃO DE CONDIÇÕES PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Inicialmente, foram realizados sete ensaios preliminares (P1 a P7) para se adquirir familiaridade com a técnica a ser utilizada. Esses ensaios também tiveram como propósito fornecer subsídios para definição de algumas condições para a realização dos ensaios. Foram estudadas a concentração do ácido a ser utilizado e a metodologia para a definição da quantidade de ácido a ser adicionada.

Para definição da concentração do ácido, foram realizados quatro ensaios preliminares (P1 a P4), os dois primeiros com ácido 0,1N e os dois seguintes com ácido 5N. A Tabela 4.2 apresenta as condições de realização dos ensaios.

**Tabela 4.2 – Condição de Realização dos Ensaios Preliminares P1 a P4**

ensaio	data de realização	ETA	data de coleta do lodo	ácido	pH de acidificação
P1	08/03/03	Guaraú	08/03/03	0,1N	3,58
P2	08/03/03	Guaraú	08/03/03	0,1N	3,43
P3	15/03/03	Rio Grande	15/03/03	5N	2,22
P4	15/03/03	Guaraú	15/03/03	5N	2,04

A escolha para realização dos ensaios P3 e P4 com ácido 5N se baseou nos resultados dos ensaios P1 e P2.

Em relação à metodologia utilizada para a definição da quantidade de ácido a ser adicionada, nos primeiros oito ensaios (P1 a P7 e R1), inicialmente a adição do ácido era realizada gradualmente e era acompanhado o pH da solução, até que se atingisse o valor desejado.

Nos ensaios seguintes, a quantidade de ácido foi determinada anteriormente aos ensaios de regeneração, por meio de ensaios de titulação, realizados com um volume de lodo de 250 mL, e adição de ácido até o pH desejado. Assim, nos ensaios de regeneração o volume de ácido adicionado foi o dobro do determinado no ensaio de titulação, e aplicado em uma única vez.

#### 4.2.3 ESTUDO DA REGENERAÇÃO DE COAGULANTE EM ENSAIO DE BANCADA

Utilizando as condições de ensaio definidas nos itens anteriores, foram realizados ensaios visando obter melhor entendimento do processo de regeneração.

Inicialmente foram realizadas três séries de ensaios, uma com o lodo da ETA Guaraú e uma com lodo da ETA Rio Grande, com condições recomendadas na bibliografia. As condições adotadas para a realização desses ensaios estão apresentadas na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3 – Condições Adotadas para a Realização dos Ensaios 1 a 3**

ensaio	data	proveniência do lodo	pH de acidificação	tempo de acidificação
G1	09/08/2003	ETA Guaraú	2,4	30'
R1	07/06/2003	ETA Rio Grande	2,4	30'
G2	12/08/2003	ETA Guaraú	2,3	30'
R2	28/06/2003	ETA Rio Grande	2,3	30'
G3	06/09/2003	ETA Guaraú	2,4	30'
R3	09/09/2003	ETA Rio Grande	2,2	30'

Posteriormente, foram realizados ensaios visando estudar a cinética da reação de solubilização dos hidróxidos e a influência do pH nos ensaios, conforme descrito a seguir.

- *Estudo da Cinética*

O estudo da cinética é fundamental, pois o tempo de contato estabelecido é o que determina o volume do reator necessário para a acidificação. Os primeiros ensaios foram conduzidos com tempo de 30 minutos, pois, de acordo com várias pesquisas, após esse período provavelmente já teria sido atingido o equilíbrio (ASCE, 1996) e (AWWA, 1991).

O objetivo de estudar a cinética foi verificar como varia a concentração do metal no coagulante regenerado em relação ao tempo de contato, e determinar um tempo que proporcione resultados adequados, levando em consideração também que, quanto maior o tempo, maior será o custo com o reator para a acidificação.

Para isso, foram realizadas duas séries de ensaios, uma com lodo da ETA Rio Grande e outra com lodo da ETA Guaraú. Os ensaios foram realizados com volume de ácido fixo, pré-determinado em ensaio de titulação para cada lodo, e para cada seqüência foram ensaiados três tempos de acidificação diferentes. Foram testados intervalos de tempo de 15, 30 e 45 minutos. A Tabela 4.4 resume as condições de realização dos ensaios.

**Tabela 4.4 – Ensaios Realizados com Tempo Variável (1)**

ETA Rio Grande  
 data de coleta: 11/10/03  
 coagulante: sulfato férrico  
 dosagem de coagulante: 16,5 ppm

Ensaio	tempo (min)	pH
R4A	0	9,2
R4B	15	2,4
R4C	30	2,4
R4D	45	2,4

ETA Guaraú  
 data de coleta: 02/11/03  
 coagulante: sulfato alumínio  
 dosagem de coagulante: 7 ppm

Ensaio	tempo (min)	pH
G4A	0	5,8
G4B	15	2,5
G4C	30	2,5
G4D	45	2,4

Posteriormente, baseado nos resultados dos ensaios intitulados R4 e G4, foram realizados mais duas seqüências de ensaios, com diferentes tempos de mistura. As condições dos ensaios estão colocadas na Tabela 4.5.

**Tabela 4.5 – Ensaio Realizados com Tempo Variável (2)**

ETA Rio Grande  
 data de coleta: 24/01/04  
 coagulante: sulfato férrico  
 dosagem de coagulante: 16,7 ppm

Ensaio	tempo (min)	pH
R5A	0	9
R5B	05	2,5
R5C	10	2,6
R5D	15	2,6

ETA Guaraú  
 data de coleta: 24/01/04  
 coagulante: sulfato alumínio / sulfato férrico  
 dosagem de coagulante: 5 ppm / 2,5 ppm

Ensaio	tempo (min)	pH
G5A	0	5,5
G5B	05	2,3
G5C	10	2,4
G5D	15	2,4

- *Influência do pH*

Com o tempo definido nos ensaios colocados anteriormente, foram realizados ensaios com diferentes valores de pH. Nos estudos pesquisados, é citado que a faixa de pH mais adequada é de 1 a 3, dependendo de características do lodo (AWWA, 1991). O objetivo desses estudos foi avaliar qual o pH ótimo para os lodos que estão sendo estudados. O pH também é um parâmetro importante do ponto de vista econômico, pois esse valor irá determinar a quantidade de ácido necessária para a operação do sistema.

Para isso, foram realizadas duas séries de ensaios, uma com o lodo de cada ETA, variando o valor do pH. A Tabela 4.6 apresenta as condições de realização dos ensaios.

**Tabela 4.6 – Ensaio Realizados com pH Variável**

ETA Rio Grande  
 data de coleta: 24/01/2004  
 coagulante: sulfato férrico  
 dosagem de coagulante: 13 pm  
 tempo: 10 minutos

Ensaio	pH
R6A	2
R6B	2,6
R6C	5

ETA Guaraú  
 data de coleta: 24/01/2004  
 coagulante: sulfato de alumínio / sulfato férrico  
 dosagem de coagulante: 5 ppm / 2,5 ppm  
 tempo: 10 minutos

Ensaio	pH
G6A	2
G6B	3
G6C	3,6

### 4.3 Caracterização do Coagulante Obtido

Em todos os ensaios que foram realizados um dos principais parâmetros para a avaliação da regeneração do coagulante foi a qualidade do coagulante obtido. Ela foi avaliada considerando três aspectos: análise da concentração do metal no coagulante, análise da concentração de contaminantes e pela sua aplicação em ensaios em escala de bancada simulando etapas de sistemas de tratamento de esgotos.

#### 4.3.1 ANÁLISE DA CONCENTRAÇÃO DO METAL DE INTERESSE (ALUMÍNIO OU FERRO) NO COAGULANTE

Inicialmente, buscaram-se metodologias para a execução de análises de ferro e alumínio que pudessem ser realizadas no Laboratório de Saneamento. Para isso foram testadas as metodologias apresentadas nas normas técnicas ANSI/AWWA B403-93: *Aluminum Sulfate – Liquid, Ground or Lump* e ANSI/AWWA B406-92: *AWWA Standard for Ferric Sulfate*, para análise de alumínio e ferro, respectivamente.

As duas metodologias são métodos colorimétricos. As análises foram realizadas no laboratório para coagulantes regenerados, comerciais e técnicos (solução gerada no laboratório).

Posteriormente, as análises passaram a ser realizadas no IPEN, no Centro de Química e Meio Ambiente (CQMA), em espectrômetro de emissão com fonte de plasma induzido.

#### 4.3.2 ANÁLISE DA CONCENTRAÇÃO DE CONTAMINANTES NO COAGULANTE:

Os metais consistem um dos principais grupos de contaminantes que podem ser encontrados em coagulantes regenerados. Portanto, em algumas amostras de coagulantes regenerados foram analisadas as concentrações de outros metais além de alumínio e ferro.

Os compostos a serem analisados foram escolhidos baseado nos dados bibliográficos dos metais encontrados em maiores concentrações e com maior frequência (AWWA, 1991). A seguir estão relacionados os compostos analisados além de ferro e alumínio:

- manganês
- zinco
- cromo
- cádmio
- níquel
- cobre
- chumbo

As amostras que foram analisadas para esses metais são as relacionadas abaixo:

- R2
- R8
- G2
- R9
- R7
- R10
- G7

As análises foram realizadas no IPEN, no Centro de Química e Meio Ambiente (CQMA), em espectrômetro de emissão com fonte de plasma induzido.



### 4.3.3 ENSAIOS EM ESCALA DE BANCADA

Após a determinação de condições para a regeneração de coagulante como tempo e pH, foram realizados ensaios com o objetivo de gerar um volume de coagulante que permitisse a realização de ensaios de bancada utilizando esses coagulantes regenerados.

Foram realizados ensaios tipo *jar-test* simulando processos físico-químicos para remoção de fósforo de efluentes de reatores UASB. Foi utilizado o efluente do reator UASB instalado no Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH), no campus da Universidade de São Paulo na capital.

Os ensaios foram realizados com o coagulante regenerado e com coagulante comercial, permitindo uma análise comparativa. Somente foi utilizado o coagulante regenerado a partir do lodo da ETA Rio Grande. Não foi utilizado o coagulante obtido a partir do lodo da ETA Guaraú, pois essa ETA vem utilizando no tratamento coagulantes a base de ferro e alumínio simultaneamente, e, portanto, o coagulante regenerado também apresentava concentrações significativas dos dois compostos. Com isso, não haveria como fazer uma análise comparativa entre o coagulante regenerado e o coagulante comercial.

As condições adotadas para a obtenção dos coagulantes e para a realização dos ensaios tipo *jar-test* estão colocados nas Tabelas 4.7 e 4.8.

**Tabela 4.7 – Condições para Obtenção dos Coagulantes Regenerados**

ensaio	data	pH de acidificação	tempo de acidificação
R7	01/05/2004	2	10'
R8	15/05/2004	2,5	10'
R9	05/06/2004	2,3	10'
R10	12/06/2004	2,1	10'

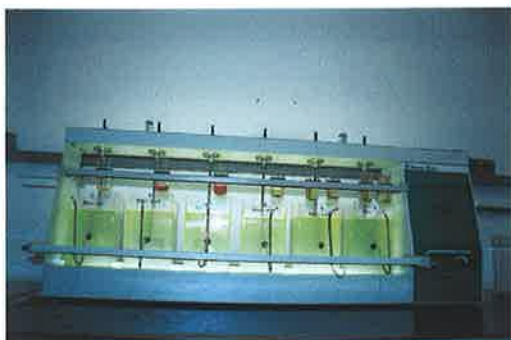
**Tabela 4.8 – Condições de Realização dos Ensaios tipo *jar-test***

ensaio	data	dosagens (mgFe/L)	gradiente e tempo		
			mistura rápida	floculação	sedimentação
R7	08/05/2004	10, 30, 60 (com.) 5, 14, 28 (reg.)			6 min
R8	23/05/2004	10, 25, 40		5 min – 60rpm	18 min
R9	10/06/2004	10, 30, 50 (com.) 20, 61, 101 (reg.)	30s, 300rpm	5 min – 40rpm 5 min – 20rpm	10 min
R10	19/06/2004	10, 40, 70 (com.) 5, 19, 33 (reg.)			10 min

com.: coagulante comercial

reg.: coagulante regenerado

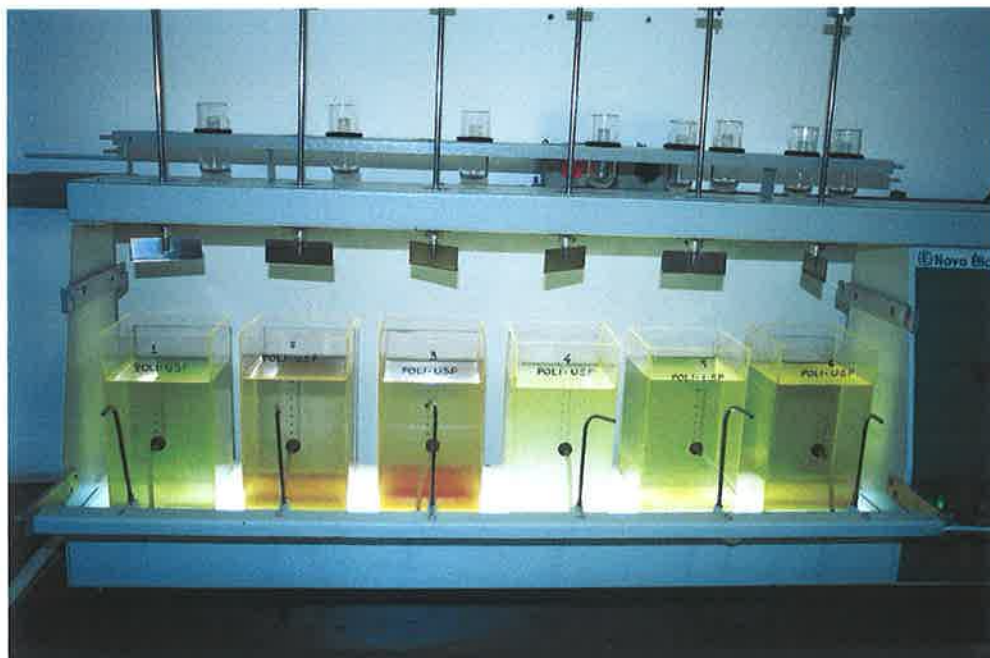
O procedimento adotado para a realização dos ensaios está ilustrado na Figura 4.10.



1 - arranjo preparado para o início do ensaio



2 -coagulação e floculação



3 - sedimentação

**Figura 4.10 – Etapas de Realização de *Jar-test* (fotos do *jar-test* 10)**

As dosagens aplicadas em alguns ensaios não foram as mesmas para os coagulantes regenerado e comercial pois os ensaios *jar-test* foram realizados antes dos laudos do IPEN com a análise de metais dos coagulantes serem obtidos. Portanto, a concentração do coagulante regenerado foi estimada para que fosse possível a determinação dos volumes de coagulantes a serem aplicados no *jar-test*.

Essa concentração foi estimada utilizando a redução na concentração de sólidos, como será discutido no item 5.1.2.

Os parâmetros analisados nas amostras coletadas em todos os jarros e no efluente do UASB foram:

- turbidez
- SST, SSF e SSV
- DQO
- pH
- Alcalinidade

Além disso, nas duas amostras que apresentaram melhores resultados para cada coagulante (avaliado por análise visual e resultados de DQO) e no efluente do UASB também foram realizadas análises para os seguintes parâmetros:

- fósforo (total e solúvel)
- DBO

As análises foram realizadas seguindo os procedimentos determinados em *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA e WEF, 1995).

#### **4.4 Caracterização do Lodo Resultante**

Para a avaliação do lodo resultante após a acidificação, foi considerada a redução da massa total.

A redução total de massa foi avaliada pela variação da concentração de sólidos em suspensão no lodo acidificado (SSA) e não acidificado (SS0). Esse parâmetro foi avaliado em todos os ensaios realizados.

As análises de sólidos em suspensão totais, fixos e voláteis foram realizadas seguindo procedimento padrão (APHA, AWWA e WEF, 1995).

Somente nos primeiros ensaios (P1 a P6) foram realizadas medidas de teor de sólidos total conforme metodologia padrão (APHA, AWWA e WEF, 1995). Os resultados são apresentados no item 5.3..

## 5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesse item serão apresentados e discutidos os resultados obtidos na parte de avaliação técnica da regeneração de coagulantes, conforme metodologia definida no item 4.

### 5.1 Regeneração do Coagulante

#### 5.1.1 CONDIÇÕES DE REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Conforme exposto no item 4.2.2, a concentração do ácido a ser utilizada foi definida com base nos ensaios P1 a P4. A Tabela 5.1 apresenta os volumes de ácido adicionados e os valores de pH atingidos.

**Tabela 5.1 – Ensaio Preliminares P1 a P4**

ensaio	data de realização	ETA	concentração do ácido	volume de ácido (mL)	pH de acidificação
P1	08/03/03	Guaraú	0,1N	250	3,58
P2	08/03/03	Guaraú	0,1N	100	3,43
P3	15/03/03	Rio Grande	5N	50	2,22
P4	15/03/03	Guaraú	5N	48	2,04

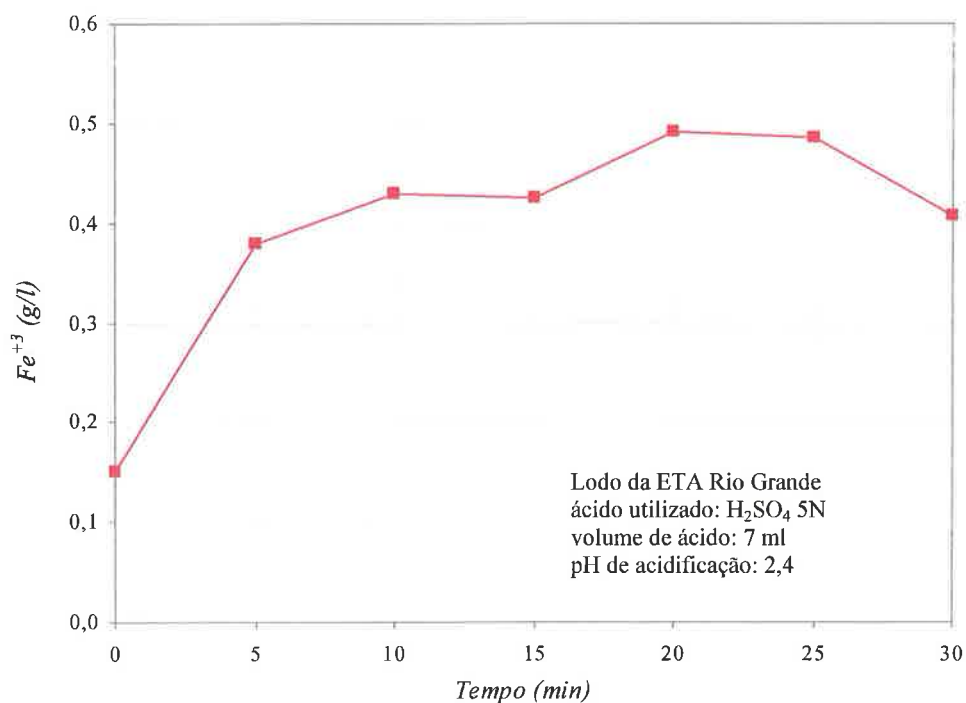
Observando os resultados, pode-se perceber que os volumes de ácido adicionados eram muito elevados quando a concentração do ácido era 0,1N. Considerando-se que o volume de lodo era de 500 mL, chegaram a ser necessários 250 mL de ácido, o que corresponde a 50% do volume de lodo. Portanto era inviável trabalhar com ácido nessa concentração, principalmente quando se pensa em uma operação em escala real, onde os custos de instalações para o manuseio desse ácido seriam muito elevados.

Portanto, passou-se a utilizar o ácido 5N, sendo que os volumes obtidos com esse ácido foram muito mais adequados.

Em relação à forma de determinação do volume de ácido a ser aplicado, nos ensaios P1 a P7, e R1, quando o ácido foi aplicado gradualmente e o pH monitorado, foi observado que o tempo necessário para se atingir o pH desejado era muito alto, da ordem de 25 minutos. No ensaio R1 foram coletadas amostras a cada cinco minutos (tempo contado a partir do término da adição do ácido), e analisadas para ferro pelo método colorimétrico. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.2. e na Figura 5.1.

**Tabela 5.2 – Resultados Obtidos no Ensaio R1**

tempo de ensaio (min)	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ g/L
0	0,54
5	1,36
10	1,54
15	1,52
20	1,76
25	1,74
30	1,46



**Figura 5.1 – Resultados do Ensaio R1**

Pode-se observar que não foi registrada variação significativa da concentração de ferro entre 5 e 30 minutos. Isso pode ser justificado considerando que devido ao grande intervalo de tempo necessário para a adição de ácido, é provável que a reação tenha atingido o equilíbrio antes mesmo do término da adição de ácido.

Portanto, esse procedimento para a adição de ácido foi considerado inadequado, e nos ensaios seguintes optou-se por definir antecipadamente o volume de ácido a ser adicionado.

#### *5.1.2 ESTUDO DA REGENERAÇÃO DE COAGULANTE EM ENSAIO DE BANCADA*

Foram realizados vários ensaios buscando caracterizar o processo de acidificação dos lodos de ETA's visando a regeneração de coagulante e determinação de condições ideais. Para isso, foram enfocadas as influências do tempo e do pH de acidificação nos resultados obtidos.

Para analisar os resultados obtidos e determinar as condições mais adequadas para a realização da regeneração do coagulante com os lodos que estão sendo estudados, foram considerados como indicadores da qualidade do processo as características do coagulante e as características do lodo.

Assim, foram analisadas as relações entre as condições de ensaio adotadas e as características do coagulante obtidas e as características do lodo resultante.

Os principais parâmetros relacionados à operação de um sistema de regeneração monitorados nos ensaios são o tempo, o pH de acidificação e a quantidade de ácido adicionada. Em relação ao coagulante, os parâmetros mais importantes são a concentração dos sais metálicos e a concentração de contaminantes. Já em relação ao lodo, a principal vantagem que pode ser obtida com o processo de acidificação é a redução da sua quantidade, que foi avaliada pela redução de massa total.

A redução de massa de lodo foi calculada pela equação 8 apresentada na seqüência:

$$\text{redução} = \frac{M_0 - M_A}{M_0} = \frac{SS_0 - SS_A}{SS_A} \quad (8)$$

onde:  $M_0$ : massa antes da acidificação;

$M_A$ : massa após a acidificação

$SS_0$ : concentração de sólidos em suspensão antes da acidificação;

$SS_A$ : concentração de sólidos em suspensão após a acidificação;

Os ensaios 1 a 3 foram realizados utilizando condições sugeridas pela bibliografia, conforme descrito na metodologia. Os resultados obtidos estão colocados na Tabela 5.3.

**Tabela 5.3 – Resultados Obtidos nos Ensaios 1 a 3**

Ensaio	Tempo de mistura min	pH de acidificação	SS		Concentração de Al g/L	Concentração de Fe g/L
			inicial mg/L	final		
G1*	30	2,4	-	-	-	-
R1*	30	2,4	2515	1724	-	-
G2	30	2,3	19635	15255	0,5900	1,1810
R2	30	2,3	6368	4658	0,0800	0,3640
G3	30	2,4	4358	2773	0,1663	0,3093
R3*	30	2,2	-	-	0,0046	0,6939

\* Devido à problemas na execução dos ensaios, não foram determinados alguns parâmetros.

#### • *Estudo da Cinética*

Conforme apresentado na metodologia, foram realizados ensaios buscando obter subsídios para uma melhor compreensão da cinética das reações de acidificação.

Os ensaios que visaram obter dados para a avaliação do efeito do tempo de mistura nas características do coagulante e do lodo foram os ensaios R4 e G4, e,



posteriormente, os ensaios R5 e G5, com tempos diferentes dos utilizados nos ensaios 4. As características de realização desses ensaios estão na Tabela 5.4.

**Tabela 5.4 – Condições de Realização dos Ensaios com Tempo Variável**

ETA	data de realização	Ensaio	tempo (min)	pH	
Rio Grande	11/10/03	R4	A	0	9,2
			B	15	2,4
			C	30	2,4
			D	45	2,4
Guaraú	02/11/03	G4	A	0	5,8
			B	15	2,5
			C	30	2,5
			D	45	2,4
Rio Grande	24/01/04	R5	A	0	9
			B	05	2,5
			C	10	2,6
			D	15	2,6
Guaraú	24/01/04	G5	A	0	5,5
			B	05	2,3
			C	10	2,4
			D	15	2,4

As Tabelas 5.5 e 5.6 apresentam os resultados obtidos nos ensaios 4 e 5, para a concentração de Fe e Al e de concentração de sólidos em suspensão.

**Tabela 5.5 – Resultados Obtidos no Ensaio R4**

ETA – Rio Grande  
 data de coleta: 11/10/03  
 coagulante: sulfato férrico  
 pH inicial = 9,2

Ensaio	Tempo de mistura min	pH de acidificação	SS		Concentração de Fe g/L	Concentração de Al g/L
			total mg/L	fixos		
R4-A	não acidificado		6365	4635	<1,4E-4	0,0000339
R4-B	15	2,4	2859	1622	1,241	0,00437
R4-C	30	2,4	2690	1500	1,382	0,00426
R4-D	45	2,4	2840	1625	1,296	0,00413

**Tabela 5.6 – Resultados Obtidos no Ensaio G4**

ETA – Guaraú

data de coleta: 02/11/03

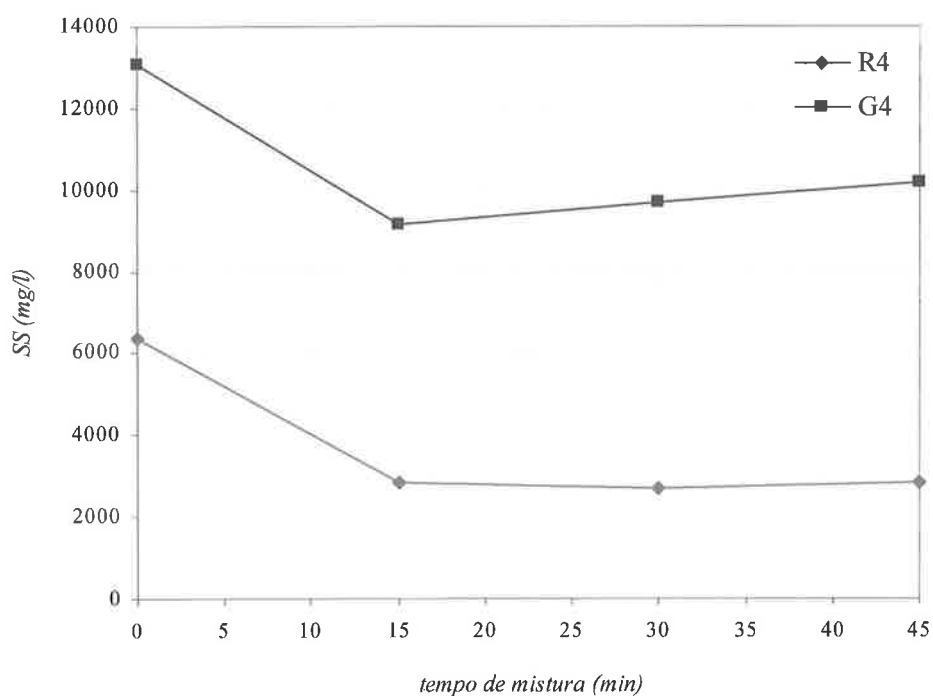
coagulante: sulfato alumínio

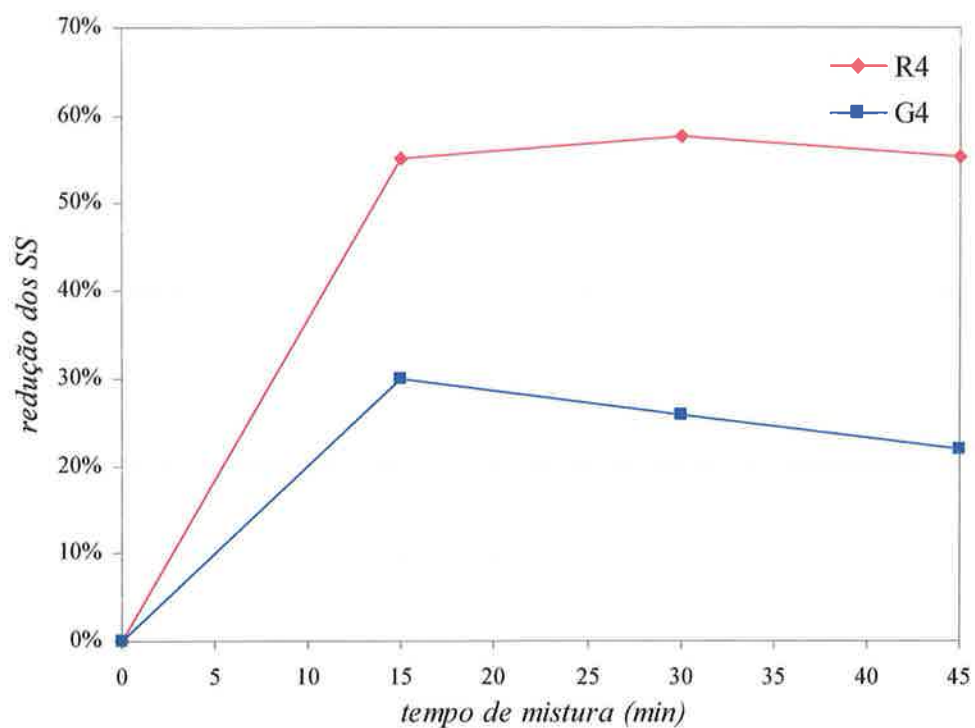
pH inicial = 5,8

Ensaio	Tempo de mistura min	pH de acidificação	SS		Concentração de Fe g/L	Concentração de Al g/L
			total mg/L	fixos		
G4-A	não acidificado		13075	8430	<1,4e-4	<8,5e-6
G4-B	15	2,5	9150	5640	0,115	0,9061
G4-C	30	2,5	9710	6260	0,1351	0,838
G4-D	45	2,4	10190	6510	0,149	0,8565

O tempo de agitação do lodo acidificado foi relacionado com os resultados obtidos de redução de sólidos em suspensão no lodo e com a concentração de Al ou Fe no coagulante regenerado.

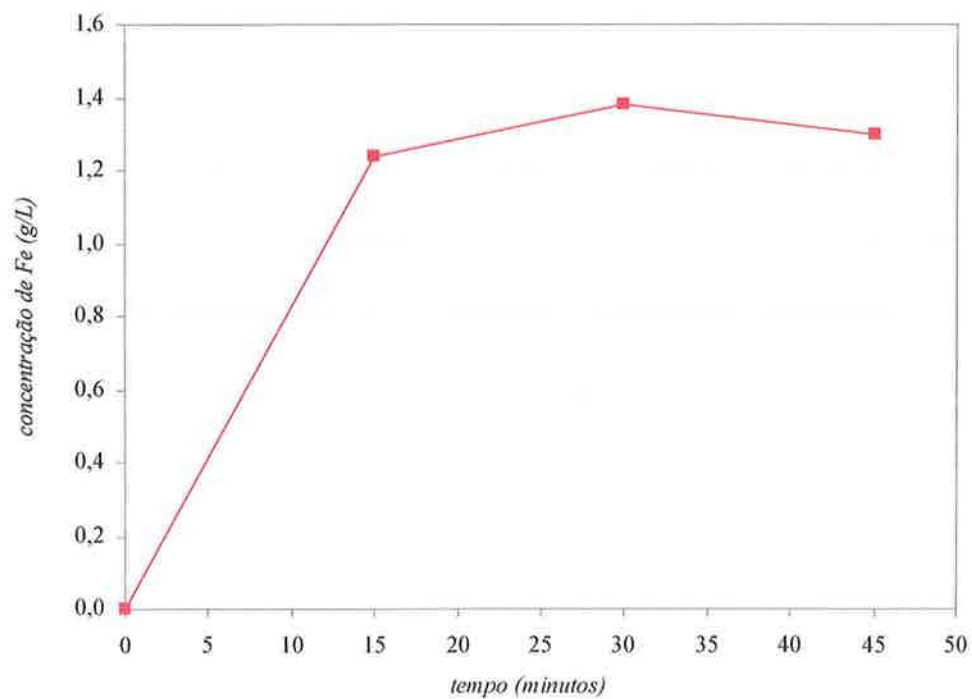
As Figuras 5.2 e 5.3 ilustram os resultados obtidos nos ensaios R4 e G4, em relação à concentração de sólidos em suspensão.

**Figura 5.2 – Ensaio R4 e G4: Efeito do Tempo de Mistura na concentração de SS**

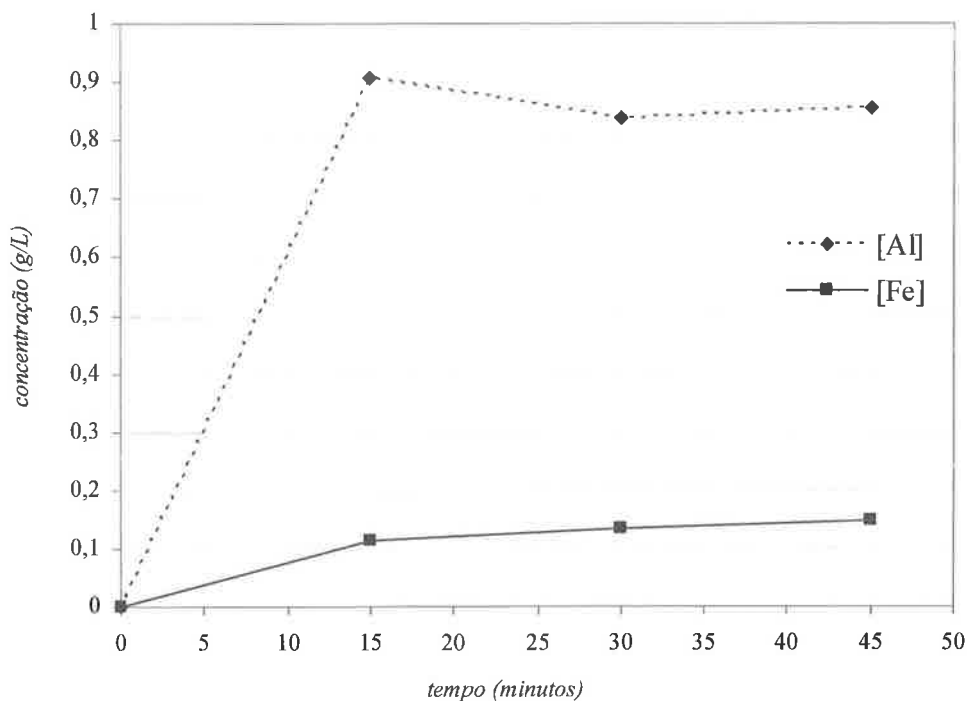


**Figura 5.3 – Ensaio R4 e G4: Efeito do Tempo de Mistura na Redução dos SS**

Os resultados obtidos nesses ensaios em relação à concentração de Al e Fe estão apresentados na Figura 5.4 e 5.5.



**Figura 5.4 – Ensaio R4: Efeito do Tempo de Mistura na Concentração de Fe**



**Figura 5.5 – Ensaio G4: Efeito do Tempo de Mistura nas Concentrações de Fe e Al**

Pode-se observar que a redução mais significativa da concentração de sólidos em suspensão, 30 e 55% para os lodos da ETA Guaraú e Rio Grande, respectivamente, ocorreu após um tempo de 15 minutos. A concentração de Al e Fe nos dois lodos apresentou comportamento semelhante à redução da concentração de SS, crescendo significativamente nos primeiros 15 minutos e permanecendo praticamente constante nos minutos seguintes.

No entanto, somente com esses resultados não era possível avaliar como ocorria a variação da concentração de sólidos e da concentração de Al e Fe nos 15 minutos iniciais. Portanto, foram realizados os ensaios R5 e G5, buscando detalhar o comportamento nos 15 minutos iniciais. Os resultados obtidos nesses ensaios estão colocados nas Tabelas 5.7 e 5.8.

**Tabela 5.7 – Resultados Obtidos no Ensaio R5**

ETA – Rio Grande  
 data de coleta: 11/10/03  
 coagulante: sulfato férrico  
 pH inicial = 9

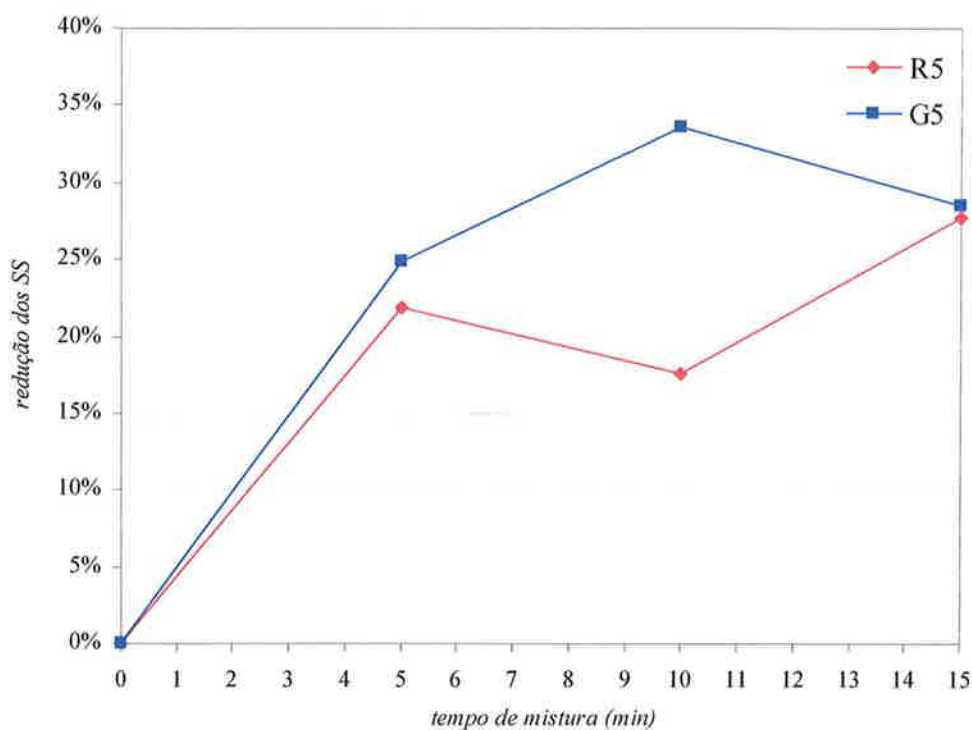
Ensaio	Tempo de mistura min	pH de acidificação	SS		Concentração de Fe g/L	Concentração de Al g/L
			total mg/L	fixos		
R5-A	não acidificado		3053	2040	na	na
R5-B	05	2,5	2743	1594	0,2786	1,34E-02
R5-C	10	2,6	2780	1680	0,2378	3,60E-02
R5-D	15	2,6	2507	1473	0,2638	6,70E-03

**Tabela 5.8 – Resultados Obtidos no Ensaio G5**

ETA – Guaraú  
 data de coleta: 02/11/03  
 coagulante: sulfato alumínio / sulfato férrico  
 pH inicial = 5,5

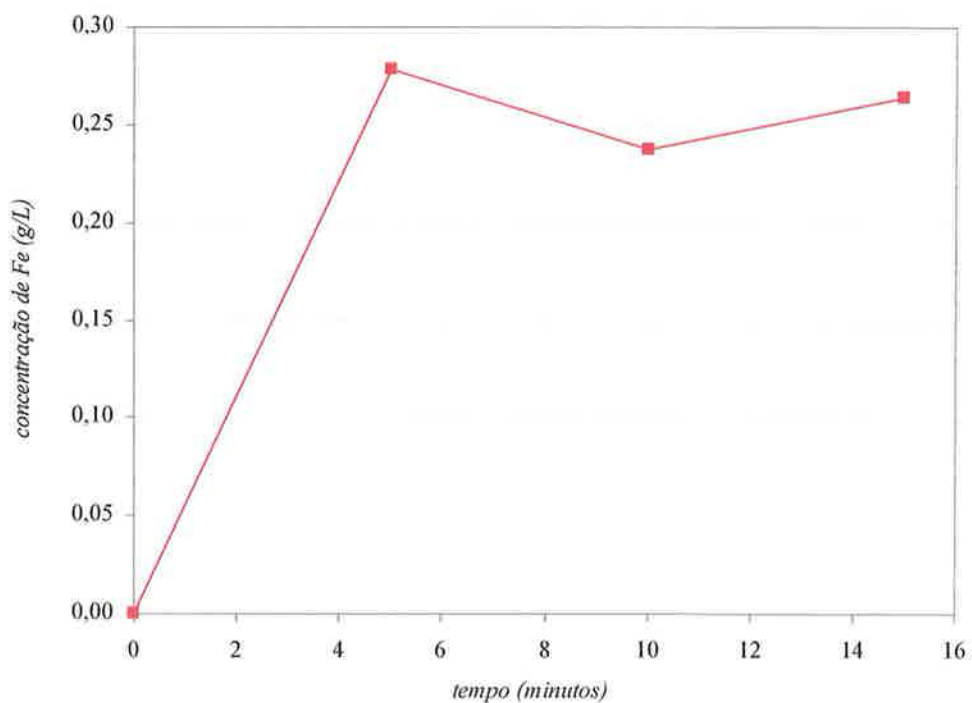
Ensaio	Tempo de mistura min	pH de acidificação	SS		Concentração de Fe g/L	Concentração de Al g/L
			total mg/L	fixos		
G5-A	não acidificado		11520	7660	na	na
G5-B	05	2,3	8650	5480	0,7453	0,4943
G5-C	10	2,4	7650	4830	4,97	1,4505
G5-D	15	2,4	8240	5230	1,6175	0,7075

Os resultados obtidos em relação à concentração de sólidos em suspensão estão apresentados na Figura 5.6.

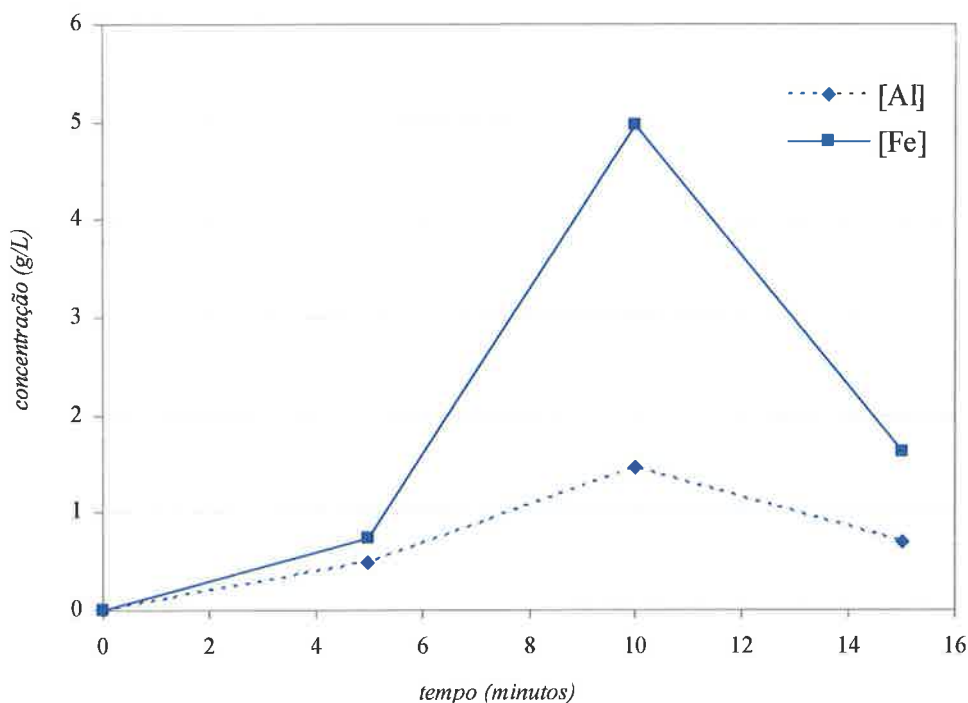


**Figura 5.6 – Ensaio R5 e G5: Efeito do Tempo de Mistura na Redução dos SS**

Nas Figuras 5.7 e 5.8 estão apresentados os resultados dos ensaios R5 e G5 em relação à concentração de Al e Fe no coagulante regenerado.



**Figura 5.7 – Ensaio R5: Efeito do Tempo de Mistura na Concentração de Fe**



**Figura 5.8 – Ensaio G5: Efeito do Tempo de Mistura na Concentração de Fe e Al**

Os resultados de redução da concentração de sólidos em suspensão indicam que a reação é rápida, acontecendo principalmente nos cinco minutos. Nesse período ocorre uma redução de 78,6% e 73,37% da máxima observada para os lodos da ETA Rio Grande e Guaraú, respectivamente.

Esse mesmo comportamento pode ser observado no ensaio R5, na Figura 5.7 que relaciona o tempo de mistura com a concentração. Nesse ensaio, após os cinco minutos iniciais a concentração praticamente permanece constante. Já no ensaio G5 a concentração de ferro apresentou maior aumento entre 5 e 10 minutos.

Portanto, foi concluído que a reação é rápida, sendo que nos ensaios R5 e G5 verificou-se nos cinco minutos iniciais a maior parte da reação já ocorreu. Optou-se por fixar o tempo em 10 minutos considerando que esse período de tempo foi suficiente para que ocorresse a reação em todos os ensaios.

Além disso, esse tempo foi considerado adequado do ponto de vista de instalações, não implicado em volumes muito elevados para o reator. Apesar do tempo de 5

minutos ter sido adequado no ensaio de bancada R5, não foi adotado tempo inferior a 10 minutos, pois isso não ocorreu em todos os ensaios (como no ensaio G5) e em instalações reais provavelmente não se terá condições de mistura iguais às que são obtidas em escala de bancada.

É interessante observar que os lodos das duas ETA's qualitativamente apresentaram comportamento semelhante em relação ao tempo de acidificação, sendo o intervalo de 10 minutos considerado adequado para o lodo das duas ETA's.

- *Influência do pH*

Após a realização desses ensaios, foram realizados ensaios com diferentes valores de pH nos ensaios R6 e G6. Nesses ensaios o tempo de mistura foi mantido fixo em 10 minutos, conforme definido baseado nos resultados dos ensaios anteriores. As características de realização e os resultados obtidos estão colocados nas Tabelas 5.9 e 5.10.

**Tabela 5.9 – Resultados Obtidos no Ensaio R6**

ETA – Rio Grande  
 data de coleta: 24/01/2004  
 coagulante: sulfato férrico  
 tempo: 10 minutos  
 pH inicial = 8,3

Ensaio	Tempo de mistura min	pH de acidificação	SS		Concentração de Fe g/L	Concentração de Al g/L
			total	fixos		
			mg/L			
R6-A	10	2	1280	548	1,06	7,41E-03
R6-B	10	2,6	2810	1820	0,032	5,47E-03
R6-C	10	5	3390	2335	0,00014	2,94E-04
R6-D	não acidificado		3560	2465	na	na

na: não analisado



**Tabela 5.10 – Resultados Obtidos no Ensaio G6**

data de coleta: 24/01/2004

coagulante: sulfato de alumínio / sulfato férrico

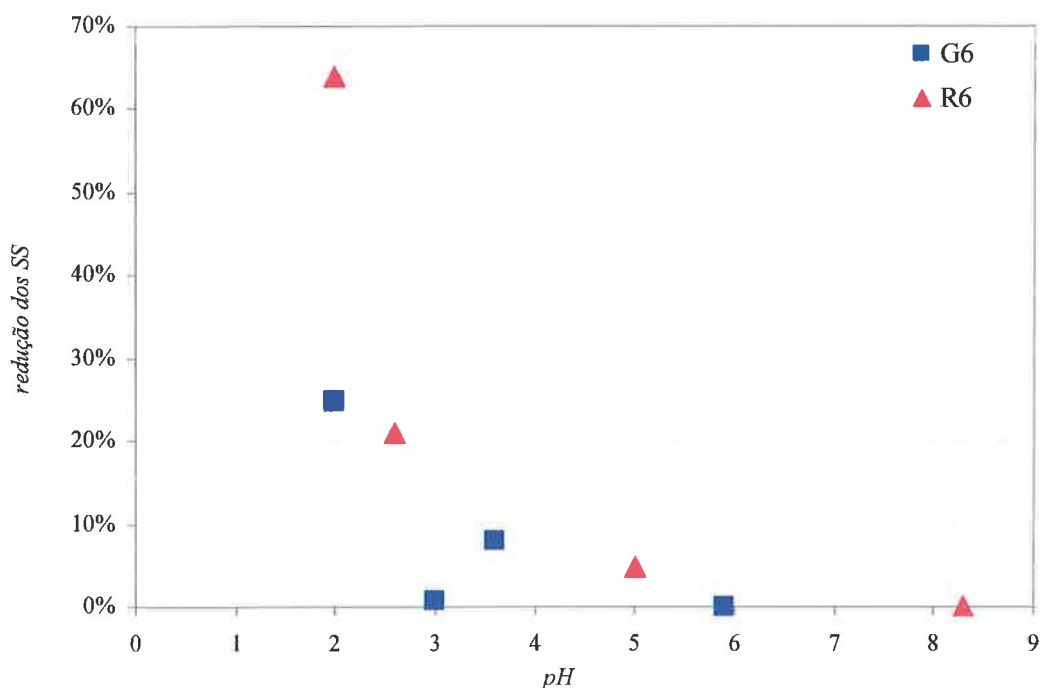
tempo: 10 minutos

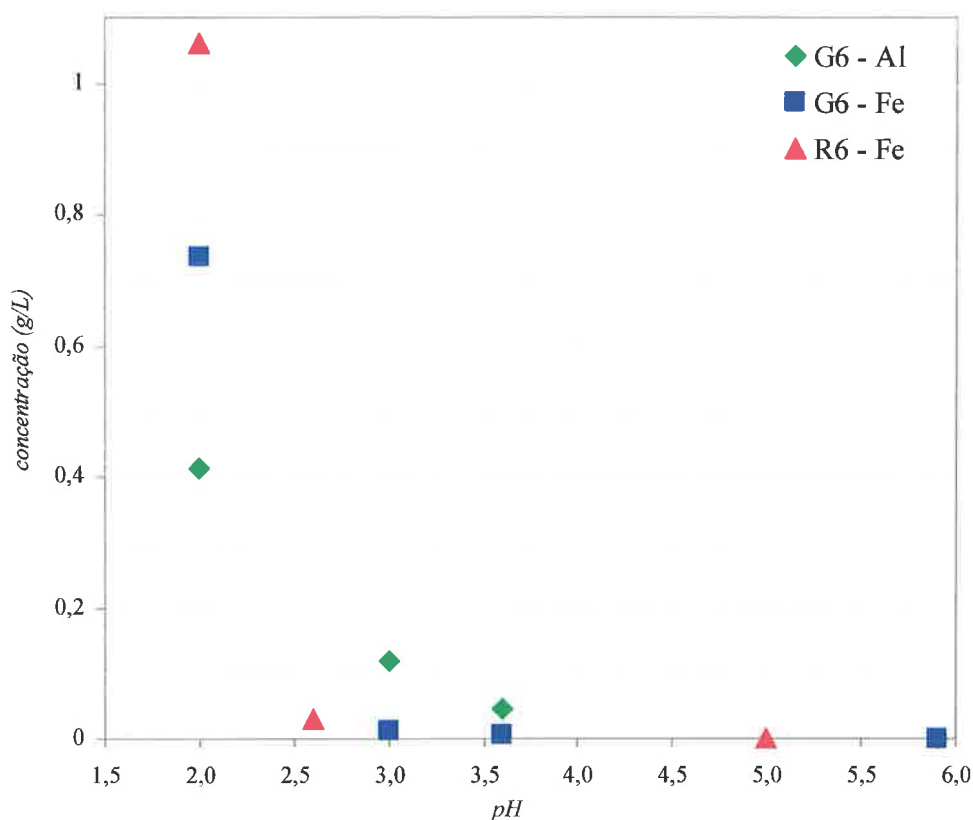
pH inicial = 5,9

Ensaio	Tempo de mistura min	pH de acidificação	SS		Concentração de Fe g/L	Concentração de Al g/L
			total mg/L	fixos		
G6-A	10	2	6860	4460	0,736	0,4127
G6-B	10	3	9080	6060	0,0129	0,1188
G6-C	10	3,6	8410	5660	0,00732	0,0469
G6-D	não acidificado		9140	5935	na	na

na: não analisado

Os resultados obtidos em relação à concentração de sólidos em suspensão e às concentrações de Fe e Al são apresentados nas Figuras 5.9 e 5.10 respectivamente.

**Figura 5.9 – Ensaios G6 e R6: Efeito do pH na Redução da Concentração de Sólidos em Suspensão**



**Figura 5.10 – Ensaio G6 e R6: Efeito do pH nas Concentrações de Fe e Al**

Observando as Figuras elaboradas com os resultados dos ensaios R6 e G6 pode-se perceber que o efeito do pH na redução da concentração de sólidos em suspensão e nas concentrações de Fe e Al no coagulante regenerado são muito semelhantes. Os melhores resultados (maior redução de SS e maior concentração dos metais de interesse) são obtidos com pH próximo de 2, ocorrendo uma queda significativa da eficiência, de 71 a 90% para as concentrações de Fe e Al e 67 a 97% para a redução de SS, com um pequeno aumento do pH, entre 2,6 e 3.

Além disso, durante a execução dos ensaios foi observado que o volume de ácido necessário para se atingir valores de pH inferiores a 2 era muito elevado, o que inviabilizaria a acidificação com valores de pH menores que 2.

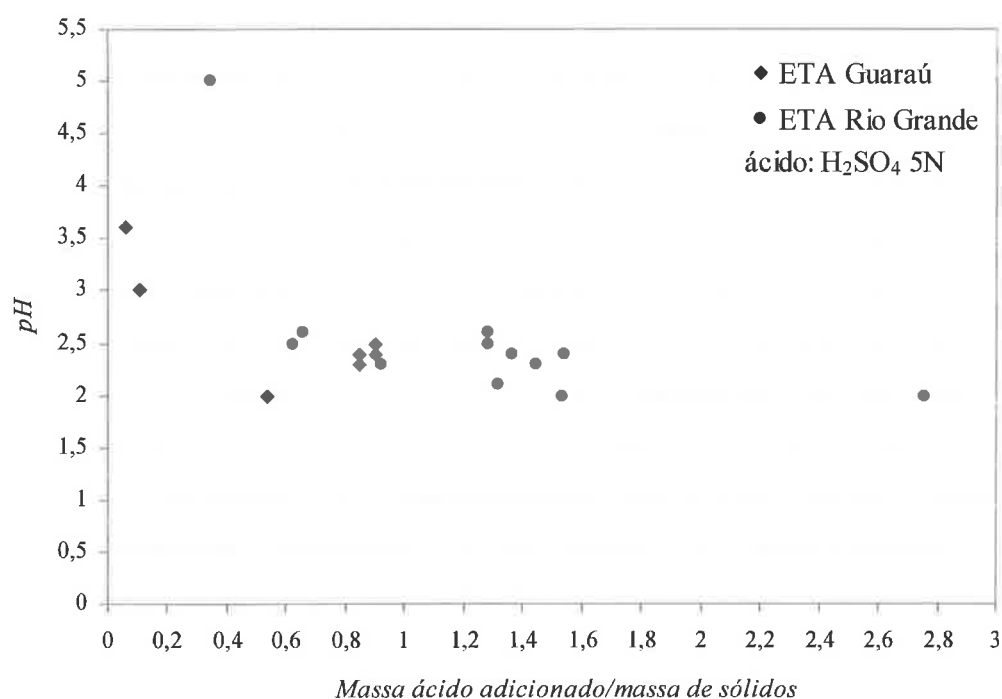
Portanto, foi concluído que o pH ideal para a acidificação é em torno de 2, uma vez que com esse valor foram obtidos bons resultados. Além disso, foi verificada a inadequação da acidificação com pH superior a 2, devido à queda significativa da

eficiência, e inferior a 2 devido à grande necessidade de ácido necessária para atingir esse valor.

Da mesma que foi observado em relação ao tempo de acidificação, o comportamento dos lodos da ETA Rio Grande e da ETA Guaraú em relação ao pH foi semelhante, sendo o pH recomendado como ideal o mesmo para os lodos oriundos de qualquer uma das ETA's estudadas.

- *Relação entre a Quantidade de Ácido Adicionado e o pH*

Uma relação importante do ponto de vista operacional e econômico é a relação entre a massa de ácido adicionada e o pH do lodo. Na Figura 5.11 são apresentados os resultados obtidos, para os lodos da ETA Guaraú e ETA Rio Grande.



**Figura 5.11 – Relação entre o pH e a Massa de Ácido Adicionada por Unidade de Massa de Sólidos em Suspensão**

O volume de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, utilizado em cada ensaio foi convertido para massa de ácido, considerando que o peso equivalente do ácido sulfúrico é 49 g e que a solução era 5 N, e portanto, sua concentração era de 245 g/L.

Para possibilitar a comparação dos resultados entre lodos com diferentes concentrações de sólidos, a massa de ácido  $H_2SO_4$  foi dividida pela massa de sólidos em suspensão total no lodo antes da acidificação. A massa de sólidos foi utilizada para essa padronização considerando que pela teoria a respeito da regeneração de coagulante, o ácido reage com os precipitados de hidróxidos metálicos, que são indicados pelos sólidos em suspensão.

Pela figura, pode-se observar que, em geral, a acidificação do lodo da ETA Guaraú demandou menos ácido por massa de sólidos que o lodo da ETA Rio Grande. Considerando a estequiometria das reações, seria esperado que no lodo da ETA Guaraú a massa de ácido necessária fosse maior, uma vez que nesse lodo deve haver a presença de hidróxidos de alumínio em conjunto com os de ferro, e pela relação estequiométrica, esses hidróxidos consomem uma massa maior de ácido.

Portanto, o que deve estar influenciando na relação entre a quantidade de ácido e o pH são outros compostos presentes no lodo que também exercem demanda pelo ácido além dos hidróxidos.

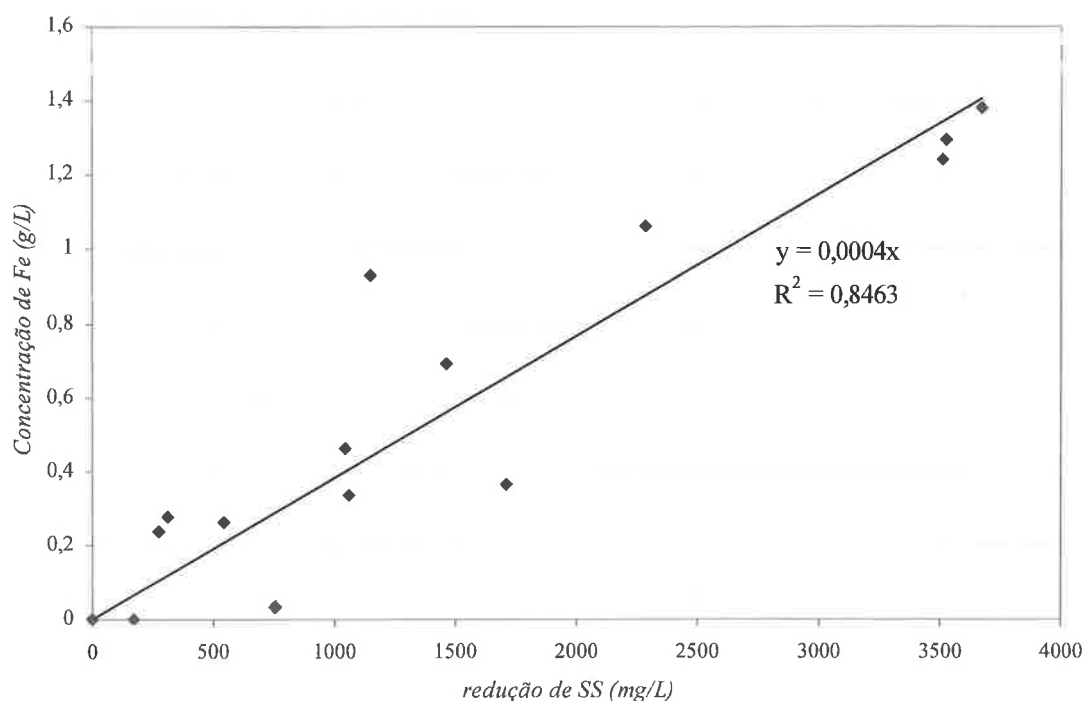
Comparando os valores obtidos para o lodo da ETA Rio Grande da relação entre a massa de ácido adicionado e a massa de sólidos com os valores previstos pela estequiometria da reação, observa-se que em geral os valores para a obtenção de pH relativamente baixos (que propiciaram maiores concentrações de ferro, e, portanto, mais próximos da situação de dissolução total dos hidróxidos metálicos, o que é assumido no equacionamento), situaram-se acima do valor previsto de  $0,91 \text{ kg } H_2SO_4 / \text{kg } Fe(OH)_3 \cdot 3H_2O$ . Isso também é um indicador da presença significativa de outros compostos no lodo que exercem demanda pelo ácido.

Ressalta-se que nos ensaios a relação foi estabelecida entre a massa de ácido e a massa de sólidos em suspensão totais, não havendo como distinguir quanto dessa massa é realmente de hidróxidos e quanto é de partículas provenientes da água bruta. Portanto, as relações entre as massas de ácido adicionado e as massas de hidróxidos são ainda maiores que as indicadas na Figura 5.11.

- *Relação entre a Concentração de Ferro ou Alumínio e a Concentração de Sólidos em Suspensão*

Conforme colocado anteriormente, na maior parte dos ensaios observou-se que qualitativamente os resultados de redução da concentração de sólidos e concentração de metais (Fe ou Al) variavam de forma semelhante com as condições de ensaio. Considerando isso, buscou-se uma relação entre os valores da concentração de sólidos de suspensão e concentração de Al ou Fe. Foram elaboradas figuras e estabelecidas relações lineares entre SST e a concentração de Al ou Fe.

As Figuras 5.12, 5.13 e 5.14 mostram os resultados obtidos para o lodo da ETA Rio Grande e da ETA Guaraú, para Fe e Al respectivamente.



**Figura 5.12 – Ensaio com Lodo da ETA Rio Grande: Redução de SS X Concentração de Fe**

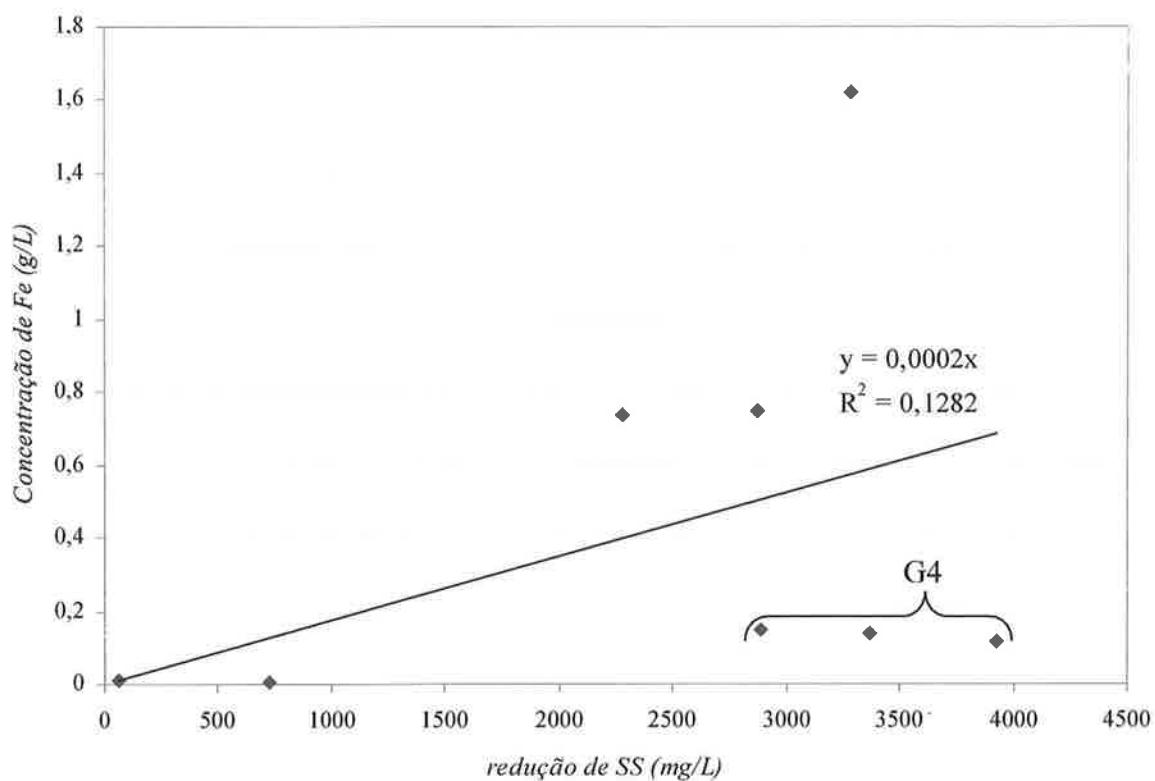


Figura 5.13 – Ensaio com Lodo da ETA Guaraú: Redução SS X Concentração de Fe

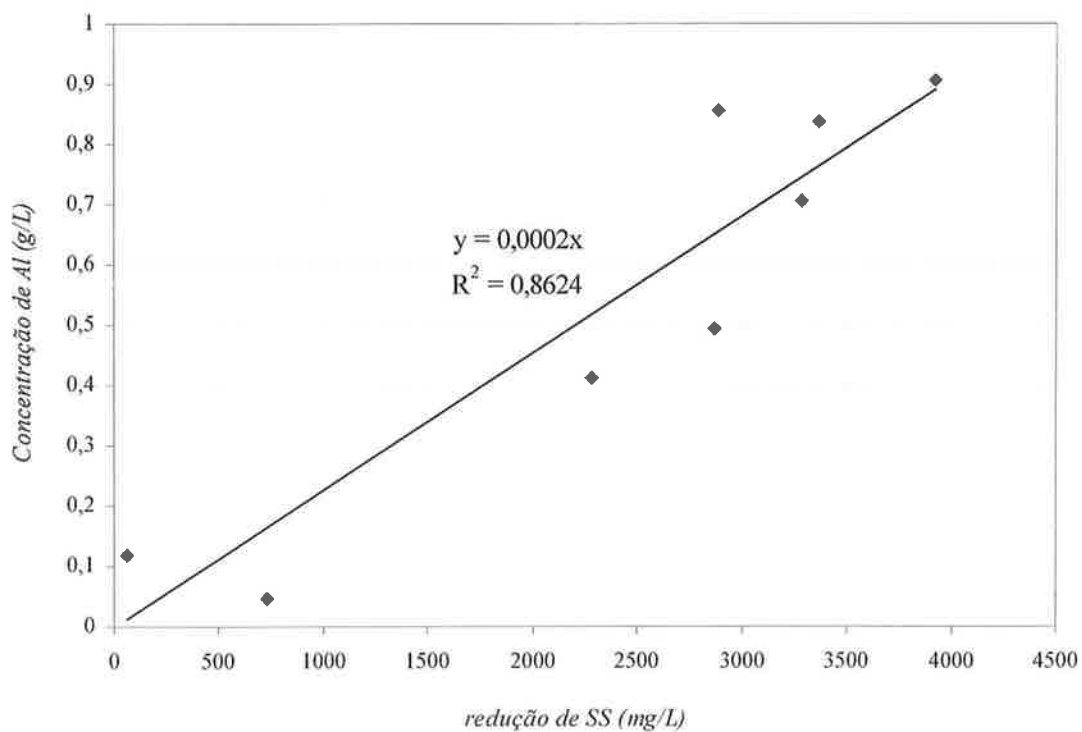


Figura 5.14 – Ensaio com Lodo da ETA Guaraú: Redução SS X Concentração de Al

Nas Figuras anteriores pode ser observado que para o lodo da ETA Rio Grande e da ETA Guaraú em relação ao alumínio os dados apresentaram distribuição aproximadamente linear, com coeficiente de correlação  $R^2$  apresentando valores próximos de 1, indicando uma boa adequação dos dados ao modelo de equação linear utilizado.

No entanto, essa relação linear entre a redução da concentração de sólidos e a concentração de metal não ocorreu para o lodo da ETA Guaraú em relação ao ferro. Isso pode ter acontecido pois o lodo da ETA Guaraú contém concentrações significativas de alumínio e ferro juntos, o que dificulta a análise dos resultados, pois existem outras reações envolvidas.

Por exemplo, na Figura 5.13 pode-se perceber que todas as amostras do ensaio G4, realizado com diferentes tempos de mistura, apresentaram aproximadamente a mesma concentração de ferro, independente da redução da concentração de sólidos observada. No dia que foi coletado o lodo para a realização desse ensaio o único coagulante em uso na ETA Guaraú era o sulfato de alumínio e, portanto, as concentrações de ferro não são significativas, devendo ser proveniente da água bruta, do coagulante de alumínio ou residual do processo de outros dias da operação em que tenha sido utilizado algum coagulante com ferro. Excluindo-se os dados do ensaio G4 da análise, o coeficiente de correlação aumenta para 0,8.

Nos ensaios com lodo da ETA Guaraú, excluindo-se os dados do ensaio G4, a equação relacionando a redução de sólidos em suspensão com a concentração de ferro passa a ser  $y = 4.10^{-4}x$ . Portanto, pode ser observado também que a relação entre a concentração de ferro e a redução da concentração de sólidos em suspensão (dada pela equação na Figura 5.12 para o lodo da ETA Rio Grande) foram aproximadamente as mesmas para os lodos da ETA Guaraú e Rio Grande, o que pode ser um indício que essa relação não varia muito com o lodo. No entanto, os dados disponíveis são insuficientes para que se possa afirmar isso.

Esse comportamento, caracterizado por uma relação linear entre a redução da concentração de sólidos em suspensão e a concentração no coagulante pode ser empregado no caso da eventual utilização em escala real da regeneração de coagulante. Uma vez que a determinação das concentrações de Fe e Al no coagulante é muito mais complexa, ou seja, exige equipamentos mais sofisticados, nem sempre presentes em ETA's existentes, que a determinação de sólidos em suspensão, cujo procedimento de determinação é extremamente difundido e realizado usualmente, a operação diária de um sistema de regeneração poderia se basear nos resultados de sólidos em suspensão.

## ***5.2 Caracterização do Coagulante***

A avaliação do coagulante regenerado foi feita de forma comparativa, avaliando o coagulante regenerado em relação aos coagulantes comerciais. Os aspectos considerados para a avaliação comparativa foram três: as concentrações de alumínio e ferro; as concentrações de contaminantes e as eficiências dos dois tipos de coagulantes (regenerado e comercial) em ensaios pilotos para tratamento físico-químico de efluente de reator UASB. Esses aspectos são avaliados em detalhes nos itens seguintes.

### ***5.2.1 ANÁLISE DA CONCENTRAÇÃO DO METAL DE INTERESSE (ALUMÍNIO OU FERRO) NO COAGULANTE***

Inicialmente as análises para determinação da concentração de metais foram realizadas por métodos colorimétricos, conforme descrito na metodologia. Os resultados obtidos para coagulantes comerciais e técnicos estão descritos na Tabela 5.11.



**Tabela 5.11 – Resultados de Análises de Metais por Métodos Colorimétricos**

metal	tipo de coagulante	valor esperado	valor obtido
ferro	comercial	940 mg/l Fe <sup>+3</sup>	720 mg/l Fe <sup>+3</sup>
			407 g/l Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>
alumínio	comercial	580 g/l Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	397 g/l Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>
			390 g/l Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>
			366 g/l Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>
			390 g/l Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>
	técnico	10 g/l Al <sup>+3</sup>	17,76 g/l Al <sup>+3</sup>
			17,17 g/l Al <sup>+3</sup>
			15,94 g/l Al <sup>+3</sup>
			16,52 g/l Al <sup>+3</sup>

Pode ser observado na tabela apresentada que os resultados obtidos não foram muito próximos aos esperados. Como surgiu a possibilidade de realizar as análises de ferro e alumínio por um método mais preciso, em espectrômetro de emissão com fonte de plasma induzido, no IPEN, no Centro de Química e Meio Ambiente (CQMA), as tentativas de realização das análises por essas metodologias colorimétricas foram descartadas.

Os resultados das análises para Fe e Al obtidos nos ensaios estão apresentados nas tabelas 5.12 e 5.13, para os lodos da ETA - Guaraú e ETA - Rio Grande, respectivamente.

**Tabela 5.12 – Resultados das Análises de Fe e Al nos Coagulantes Obtidos a Partir do Lodo da ETA – Guaraú**

Ensaio	acidificação		Concentrações em g/L	
	pH	tempo	Al	Fe
<b>G1</b>	2,4	30'	-	-
<b>G2</b>	2,3	30'	0,59	1,181
<b>G3</b>	2,4	30'	0,1663	0,3093
<b>G4</b>				
G4-A	sem acidificação		<8,5E-6	<1,4E-4
G4-B	2,5	15'	0,9061	0,115
G4-C	2,5	30'	0,838	0,1351
G4-D	2,4	45'	0,8565	0,149
<b>G5</b>				
G5-A	sem acidificação		na	na
G5-B	2,3	05'	0,4943	0,7453
G5-C	2,4	10'	1,4505	4,97
G5-D	2,4	15	0,7075	1,6175
<b>G6</b>				
G6-A	2	10'	0,4127	0,736
G6-B	3	10'	0,1188	0,0129
G6-C	3,6	10'	0,0469	0,00732
G6-D	sem acidificação		na	na

na: não analisado

**Tabela 5.13 – Resultados das Análises de Fe e Al nos Coagulantes Obtidos a Partir do Lodo da ETA – Rio Grande**

Ensaio	acidificação		Concentrações em g/L	
	pH	tempo	[Fe]	[Al]
<b>R1</b>	2,4	30'	na	na
<b>R2</b>	2,3	30'	0,364	0,08
<b>R3</b>	2,2	30'	0,6939	0,0046
<b>R4</b>				
R4-A	sem acidificação		<1,4e-4	0,0000339
R4-B	2,4	15'	1,241	0,00437
R4-C	2,4	30'	1,382	0,00426
R4-D	2,4	45'	1,296	0,00413
<b>R5</b>				
R5-A	sem acidificação		na	na
R5-B	2,5	05'	0,2786	1,34E-02
R5-C	2,6	10'	0,2378	3,60E-02
R5-D	2,6	15	0,2638	6,70E-03
<b>R6</b>				
R6-A	2,0	10'	1,06	7,41E-03
R6-B	2,6	10'	0,032	5,47E-03
R6-C	5,0	10'	0,00014	2,94E-04
R6-D	sem acidificação		na	na
<b>R7</b>	2	10'	0,4624	1,63E-03
<b>R8</b>	2,5	10'	0,3345	2,45E-03
<b>R9</b>	2,3	10'	0,9305	7,05E-03
<b>R10</b>	2,1	10'	0,69	2,26E-03

na: não analisado

As concentrações de Fe determinadas nos coagulantes regenerados foram comparadas com os valores estabelecidas por clientes e fabricantes nacionais (coagulante comercial), apresentados no item 3.2.1.

Os valores das concentrações de Al obtidas nos ensaios com lodo da ETA Rio Grande não foram utilizadas para a comparação pois esses coagulantes regenerados continham ferro e alumínio devido às características de operação da ETA, não sendo possível elaborar uma comparação com os coagulantes comerciais.

Nos ensaios realizados com lodo da ETA Rio Grande e condições próximas às determinadas como ideais, ou seja, pH próximo de 2 e tempo de mistura de 10 minutos, foram determinados os valores máximo, mínimo, média e o desvio padrão das concentrações de Fe obtidas. Os valores estão colocados na Tabela 5.14.

**Tabela 5.14 – Comparação entre as Concentrações de Fe no Coagulante Regenerado e no Coagulante Comercial**

- Condições de realização dos ensaios considerados: lodo ETA Rio Grande, pH  $\approx$  2, tempo de mistura  $\geq$  10'
- Ensaios considerados: R2, R3, R4B, R4C, R4D, R5B, R5C, R5D, R6A, R7, R8, R9 e R10
- Concentrações de Fe:

	Coagulante regenerado	Coagulante comercial
<b>mínima</b>	0,0238%	12,24%
<b>máxima</b>	0,1382%	10,84%
<b>média</b>	0,0710%	11,73%
<b>desvio padrão</b>	0,0426%	0,394%

obs.: foi considerada densidade de 1000 g/L

Pela Tabela anterior pode-se perceber claramente que as concentrações obtidas no coagulante regenerado são muito inferiores, da ordem de 100 vezes, às exigidas por consumidores e atingidos por fabricantes de sulfato de alumínio.

Ressalta-se que os valores do coagulante comercial apresentados são específicos para o uso em tratamento de águas para abastecimento, uso que não está sendo considerado para o coagulante regenerado. Portanto, apesar das concentrações serem relativamente baixas, isso não significa que o coagulante regenerado não possa ser utilizado para outras finalidades.

### 5.2.2 ANÁLISE DA CONCENTRAÇÃO DE CONTAMINANTES NO COAGULANTE:

Os compostos avaliados que foram considerados como contaminantes do coagulante foram outros metais além de ferro, no caso da ETA Rio Grande, e ferro e alumínio para a ETA Guaraú. Os metais analisados são os listados na seqüência.

- manganês
- zinco
- cromo
- cádmio
- níquel
- cobre
- chumbo

As amostras geradas nos ensaios R2, G2, R7, G7, R8, R9 e R10 foram analisadas para esses metais. Os resultados obtidos para as amostras analisadas estão colocados na Tabela 5.15.

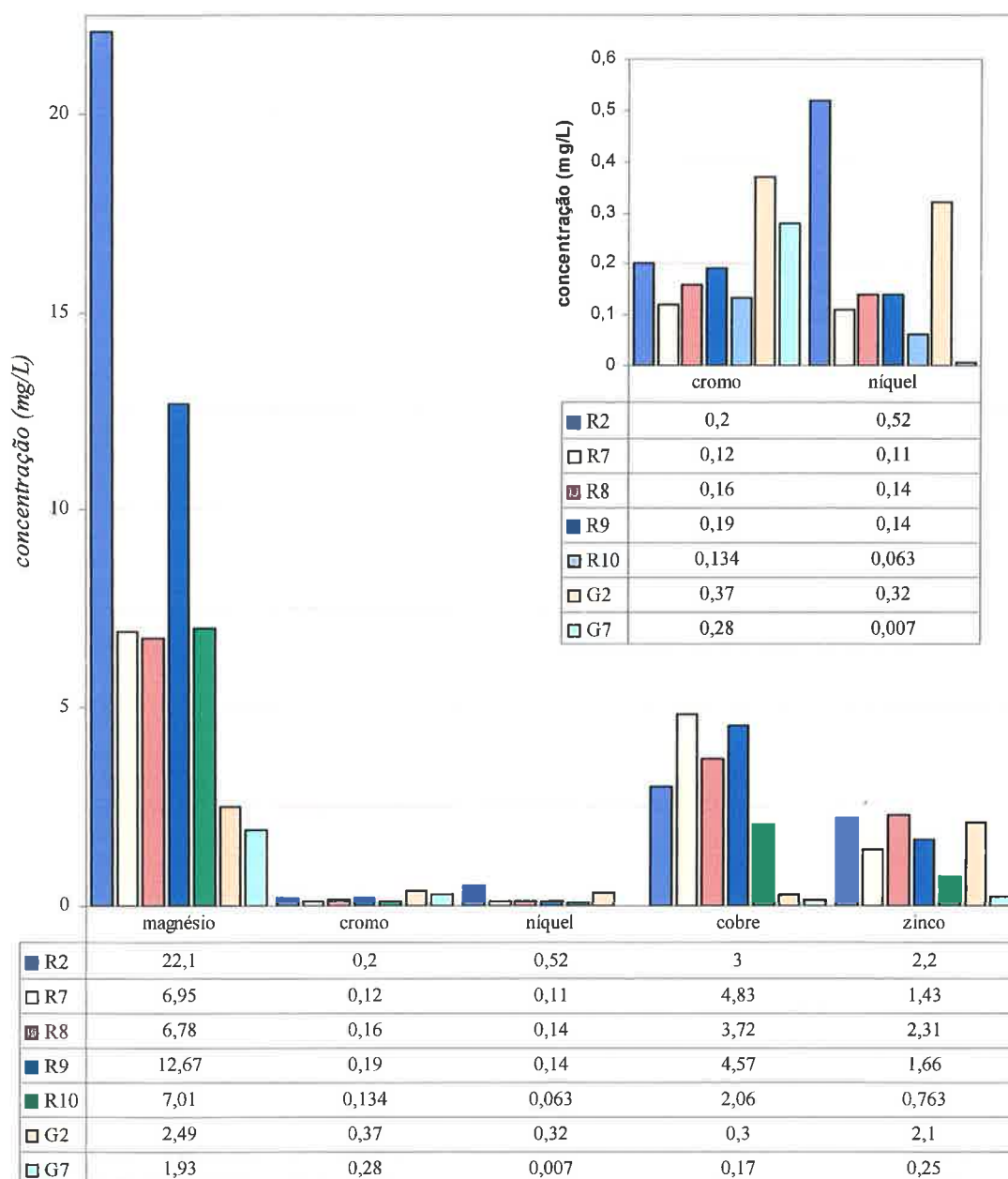
**Tabela 5.15 – Resultados das Análises de Metais**

ensaio	data	magnésio	cromo	níquel	cobre	zinco	cádmio	chumbo
R2	28/06/03	22,1	0,2	0,52	3	2,2	< 0,003	na
G2	12/08/03	2,49	0,37	0,32	0,3	2,1	< 0,003	na
R7	01/05/04	6,95	0,12	0,11	4,83	1,43	< 0,003	0,002
G7	15/05/04	1,93	0,28	0,007	0,17	0,25	< 0,003	0,005
R8	15/05/04	6,78	0,16	0,14	3,72	2,31	0,004	0,005
R9	05/06/04	12,67	0,19	0,14	4,57	1,66	< 0,003	na
R10	16/06/04	7,01	0,134	0,063	2,06	0,763	< 0,003	na

concentrações em mg/L

na: não analisado

Na Figura 5.15 estão apresentados os resultados obtidos, com exceção dos valores obtidos para cádmio e chumbo. As concentrações obtidas de cádmio foram inferiores ao limite de detecção para todas as amostras com exceção da amostra gerada no ensaio R8. Já os valores de chumbo não foram apresentados por esse composto ter sido analisado somente nas amostras geradas nos ensaios R7, G7 e R8.



**Figura 5.15 – Concentrações de Contaminantes nos Coagulantes Regenerados**

Pela Figura 5.15, pode-se observar que o composto observado em maiores concentrações foi o magnésio, com valores variando de 22,1 a 1,93 mg/L. Além disso, na Figura pode ser observado claramente nos parâmetros magnésio, cobre e cromo há uma relação entre a fonte do lodo utilizado e as características do coagulante.

Ou seja, para o magnésio e cobre, as concentrações nos coagulantes regenerados obtidos no lodo da ETA Guaraú são da ordem de 80 e 93% menores que no coagulante gerado a partir do lodo da ETA Rio Grande. Por outro lado, as concentrações de cromo são aproximadamente 50% maiores nos coagulantes gerados com lodo da ETA Guaraú.

Para os compostos níquel e zinco não é possível identificar nenhum tipo de relação com a fonte do lodo, isso talvez poderia ser melhor avaliado com um número maior de amostras.

Uma justificativa possível para esses fatos observados é que essas diferenças sejam causadas pelas diferenças de qualidade dos mananciais. A princípio, o manancial da ETA Guaraú é mais protegido que o da ETA Rio Grande e, portanto, teria uma ocorrência menor de contaminantes no lodo.

Outra justificativa possível seria que a contaminação encontrada no coagulante regenerado não é oriunda da água bruta, e sim dos coagulantes utilizados no tratamento. Com isso, as diferenças encontradas poderiam ter sido geradas pelas diferenças na qualidade dos coagulantes utilizados nas duas ETA's.

O mais provável é que as duas justificativas apresentadas ocorram simultaneamente, influenciando nas concentrações encontradas nos coagulantes regenerados. No entanto, com os dados disponíveis não é possível avaliar quais das duas é preponderante.

Para comparar os resultados obtidos com os valores dos coagulantes comerciais, foi feita uma relação entre a concentração dos contaminantes e a concentração de Fe. A comparação foi realizada considerando somente os resultados dos ensaios realizados com lodo da ETA Rio Grande pois a ETA Guaraú estava utilizando dois coagulantes diferentes, um a base de ferro e outro a base de alumínio, quando foi feita a coleta dos lodos. Os resultados obtidos estão na Tabela 5.16, onde também são apresentados os valores para coagulantes comerciais.

**Tabela 5.16 – Razão entre a Concentração do Contaminante e a Concentração de Fe, para Coagulantes Comerciais e Regenerados**

	data	alumínio	cromo	chumbo	cádmio
<i>Coagulante Regenerado</i>					
R2	28/06/03	219,780	0,549	na	<0,00824
R7	01/05/04	3,525	0,260	0,004	<0,00649
R8	15/05/04	7,324	0,478	0,015	0,012
R9	05/06/04	7,577	0,204	na	<0,00322
R10	16/06/04	3,275	0,194	na	<0,00435
<i>Coagulante Comercial</i>					
KEMWATER		2,860	0,336	0,084	0,034
SABESP		2,860	0,421	0,084	0,042
CAGECE		2,860	0,336	0,336	0,034
COPASA		-	0,245	0,245	0,025
DAE JUNDIAÍ		2,860	0,421	0,421	0,042
KEMIRA KEMWATER		-	0,089	0,009	0,0004
PIRACICABA		2,860	0,421	0,421	0,042
SANASA		2,860	0,421	0,421	0,042
SOROCABA		-	0,421	0,421	0,042

valores em mg/g  
não analisado

Pode ser observado que as concentrações de contaminantes em geral são da mesma ordem de grandeza no coagulante regenerado e no estabelecido para os coagulantes comerciais. O único contaminante que sempre apareceu em maiores concentrações no coagulante regenerado foi o alumínio. O cromo, em alguns ensaios também apresentou valores mais elevados.

No entanto, se o coagulante regenerado fosse utilizado no tratamento de água, haveria uma tendência dessas concentrações irem aumentando com o número de recirculações, pois os contaminantes iriam se acumulando, como foi discutido anteriormente no item 3.4.4.

Os valores obtidos das concentrações indicam que do ponto de vista técnico provavelmente não existiriam restrições ao uso do coagulante regenerado para tratamento de esgotos sanitários, pois as concentrações estão muito próximas aos valores estabelecidos para o uso em tratamento de águas para abastecimento.



### 5.2.3 ENSAIOS EM ESCALA DE BANCADA

Conforme descrito no item 4.3.3, foram realizados 4 ensaios *jar-test* com efluente de reator UASB visando simular o tratamento físico químico do efluente desse reator. Os ensaios foram denominados R7, R8, R9 e R10. Como coagulantes foram utilizados coagulantes regenerados do lodo da ETA Rio Grande e um coagulante comercial para permitir a comparação.

Para a execução desses quatro ensaios de bancada tipo *jar-test* (R7, R8, R9 e R10), foi necessário gerar volumes suficientes de coagulante regenerado a partir de lodo da ETA Rio Grande para serem utilizados nesses ensaios. As condições de regeneração e os valores obtidos de concentração de sólidos e concentração de ferro estão apresentados na Tabela 5.17.

**Tabela 5.17 – Ensaios para Geração de Coagulante Regenerado**

Ensaio	acidificação		SS (mg/L)		[Fe]
	pH	tempo	inicial	final	(g/L)
<b>R7</b>	2	10'	1595	553	0,4624
<b>R8</b>	2,5	10'	2350	1288	0,3345
<b>R9</b>	2,3	10'	2035	887	0,9305
<b>R10</b>	2,1	10'	2043	584	0,6900

Os lodos acidificados desses ensaios foram filtrados dando origem aos coagulantes utilizados nos ensaios. Conforme descrito no item metodologia, em cada ensaio em metade dos jarros foi utilizado coagulante comercial e na outra metade coagulante regenerado.

As amostras foram analisadas para os parâmetros turbidez, SST, SSF e SSV, DQO, pH e alcalinidade, além de DBO e fósforo (total e solúvel) em algumas amostras escolhidas. Os resultados estão apresentados nas Tabelas 5.18 a 5.21.

Tabela 5.18 – Resultados do Ensaio R7

Jarro	coagulante	dosagem mgFe/L	SST mg/L	SSV mg/L	DQO mg/L	DBO mg/L	alcalinidade (mgCaCO <sub>3</sub> /L)-pH=4,5	pH	turbidez UNT	Ptotal mg/L	Psolúvel mg/L
0	-	0	96	84	455	231	118	7,03	na	7,254	6,4203
1	comercial	10	92	70	434	na	100	6,75	na	na	na
2	comercial	30	28	25	274	115	68	6,33	na	1,979	0,2189
3	comercial	60	10	9	236	120	16	6,06	na	0,426	0,0004
4	regenerado	5	106	94	417	na	106	6,74	na	na	na
5	regenerado	14	94	76	400	187	78	6,44	na	5,653	0,6456
6	regenerado	28	74	46	277	142	52	6,34	na	3,215	0,0007

Tabela 5.19 – Resultados do Ensaio R8

Jarro	coagulante	dosagem mgFe/L	SST mg/L	SSV mg/L	DQO mg/L	DBO mg/L	alcalinidade (mgCaCO <sub>3</sub> /L)-pH=4,5	pH	turbidez UNT	Ptotal mg/L	Psolúvel mg/L
0	-	0	130	106	137	52	226	7,03	74	10,269	4,4757
1	comercial	10	43	24	81	na	194	6,75	18	na	na
2	comercial	25	9	5,3	42	13	138	6,33	4,6	0,441	0,0145
3	comercial	40	5	2,7	36	9	78	6,06	2,7	0,414	0,0102
4	regenerado	10	19	12	75	na	194	6,74	14,1	na	na
5	regenerado	25	15	9	52	14	144	6,44	5,9	1,119	0,1630
6	regenerado	40	9	5	42	7	96	6,34	3,4	0,638	0,0150

na = não analisado

Tabela 5.20 – Resultados do Ensaio R9

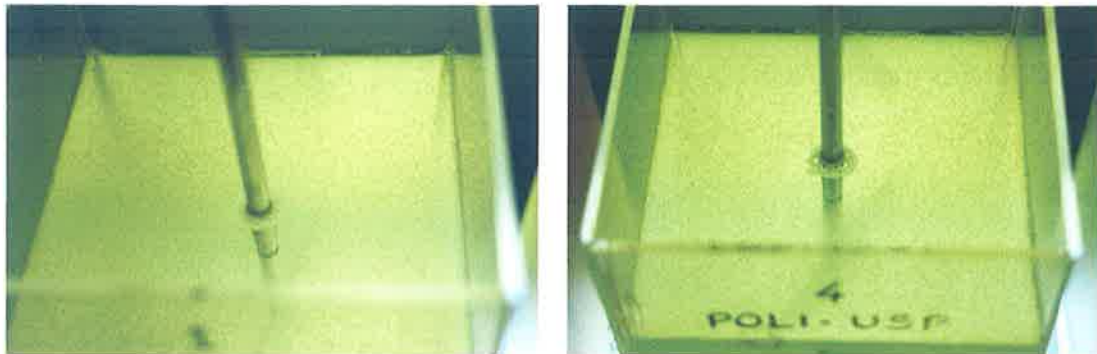
Jarro	coagulante	dosagem mgFe/L	SST mg/L	SSV mg/L	DQO mg/L	DBO mg/L	alcalinidade (mgCaCO3/L)-pH=4,5	pH	turbidez UNT	Ptotal mg/L	Psolúvel mg/L
0	-	0	106	88	227	44	122	7,01	63,5	18,712	6,3442
1	comercial	10	32	17	78	na	106	6,88	16,8	na	na
2	comercial	30	11	8,0	43	13	68	6,37	3,32	0,305	0,0044
3	comercial	50	12	5,0	35	9	32	5,88	3,54	0,057	0,0018
4	regenerado	20	26	15	na	na	92	6,68	10,9	na	na
5	regenerado	61	13	8	na	12	34	6,04	5,04	0,674	0,0022
6	regenerado	101	9	4	59	4	0	4,02	4,78	0,070	0,0024

Tabela 5.21 – Resultados do Ensaio R10

Jarro	coagulante	dosagem mgFe/L	SST mg/L	SSV mg/L	DQO mg/L	DBO mg/L	alcalinidade (mgCaCO3/L)-pH=4,5	pH	turbidez UNT	Ptotal mg/L	Psolúvel mg/L
0	-	0	80	65	181	45	260	7,03	51,3	6,665	6,5858
1	comercial	10	37	21	73	20	222	6,75	14,3	3,940	0,7036
2	comercial	40	6	4,0	35	12	116	6,33	2,89	0,388	0,0000
3	comercial	70	10	7,0	31	na	22	6,06	3,98	na	na
4	regenerado	5	47	36	100	na	240	6,74	25,2	na	na
5	regenerado	19	28	16	62	16	194	6,44	9,4	1,116	0,1121
6	regenerado	33	16	12	42	15	148	6,34	5,71	0,735	0,0079

na = não analisado

Durante a realização dos ensaios, foi observado que as etapas de coagulação e floculação ocorreram de forma adequada quando foram utilizados os dois tipos de coagulantes, ocorrendo a formação de flocos (Figura 5.16).

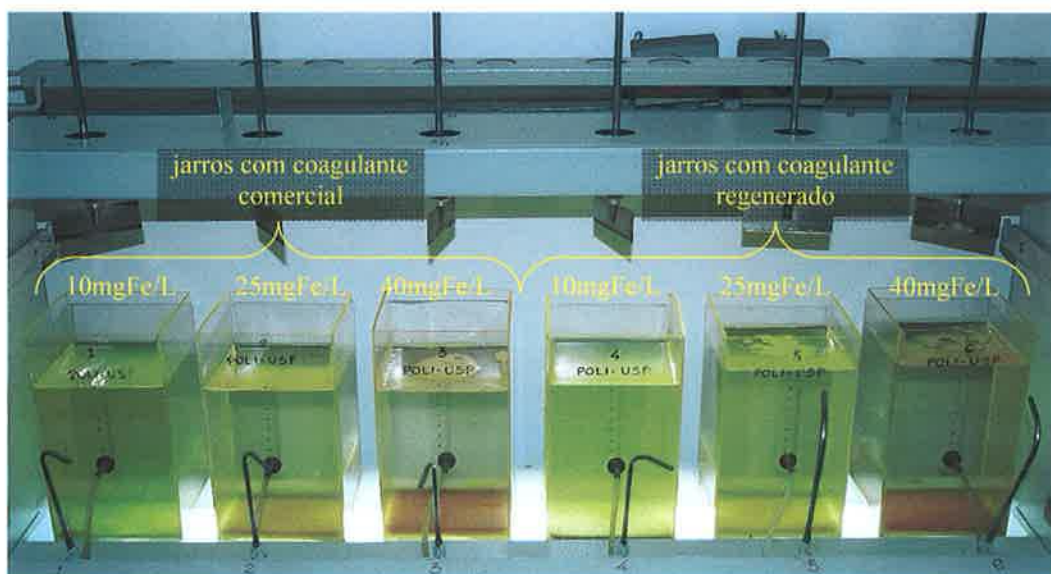


Jarro 1: coagulante comercial  
dosagem = 10 mg Fe/L

Jarro 4: coagulante regenerado  
dosagem = 10 mg Fe/L

**Figura 5.16 – Ensaio R8: Jar-Test - Floculação**

Além disso, foi possível verificar visualmente a similaridade entre os jarros onde foram aplicados coagulantes regenerado e comercial com as mesmas concentrações. Isso foi verificado nas diferentes etapas do ensaio, na coagulação e floculação, como colocado anteriormente e na sedimentação, quando foram observados a velocidade de sedimentação, a aparência do sobrenadante e o volume de lodo gerado. Nas Figuras 5.17 a 5.20 alguns desses aspectos podem ser verificados.



**Figura 5.17 – Ensaio R8: Jar-Test: Sedimentação**

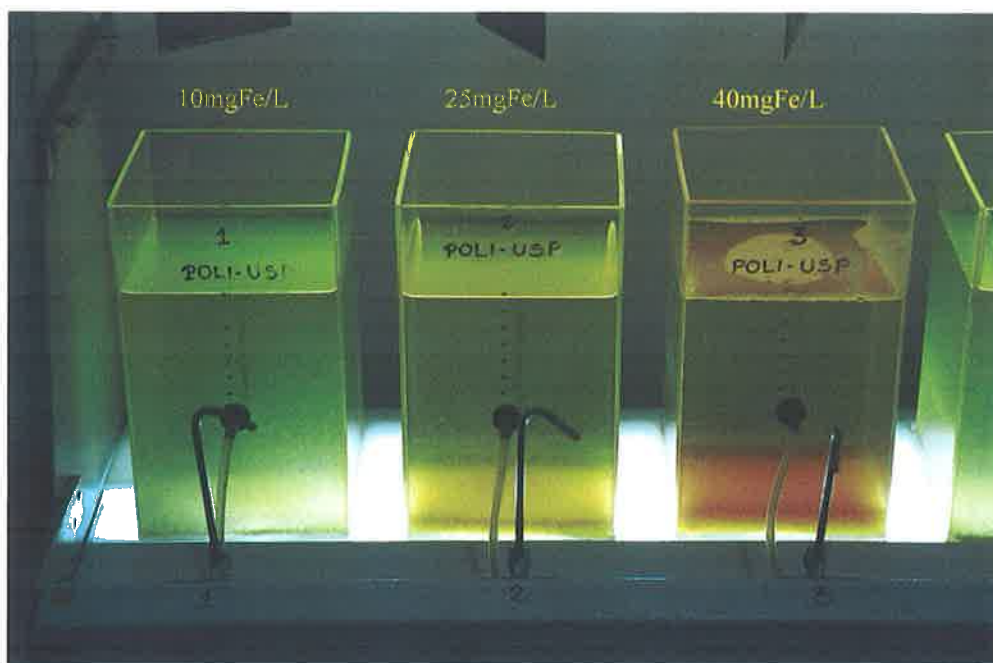


Figura 5.18 – Ensaio R8: *Jar-Test* – Sedimentação: Jarros com Coagulante Comercial

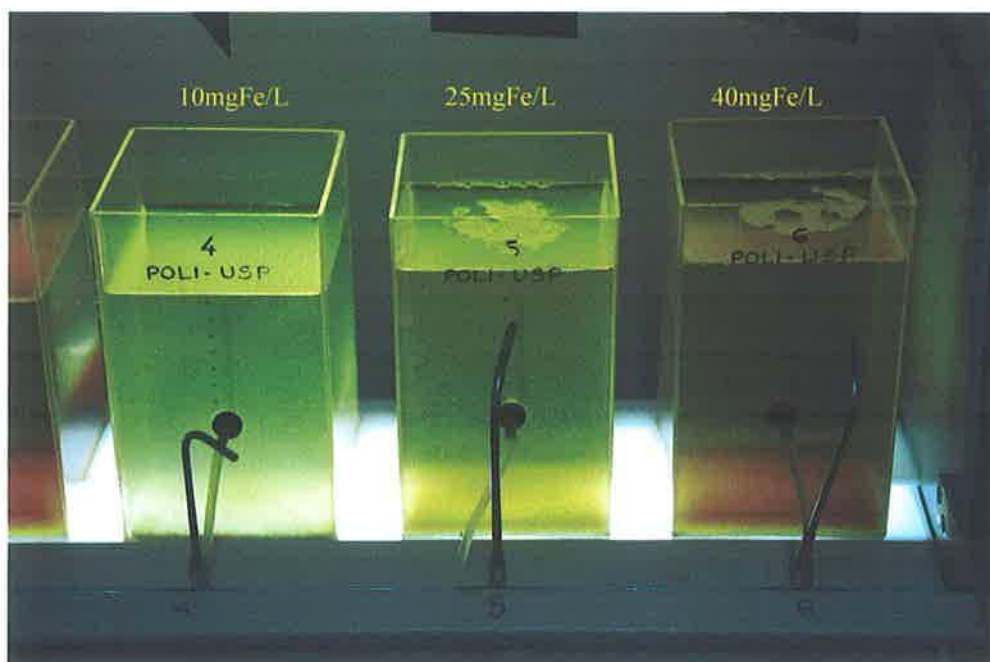
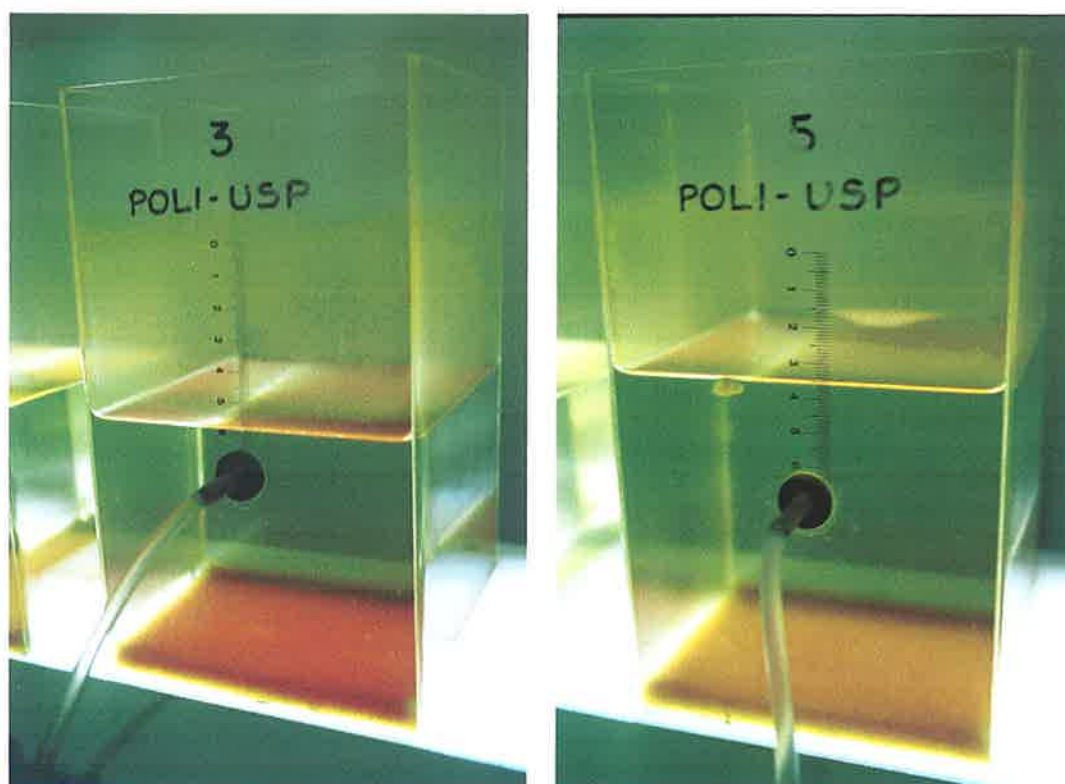


Figura 5.19 – Ensaio R8: *Jar-Test* – Sedimentação: Jarros com Coagulante Regenerado

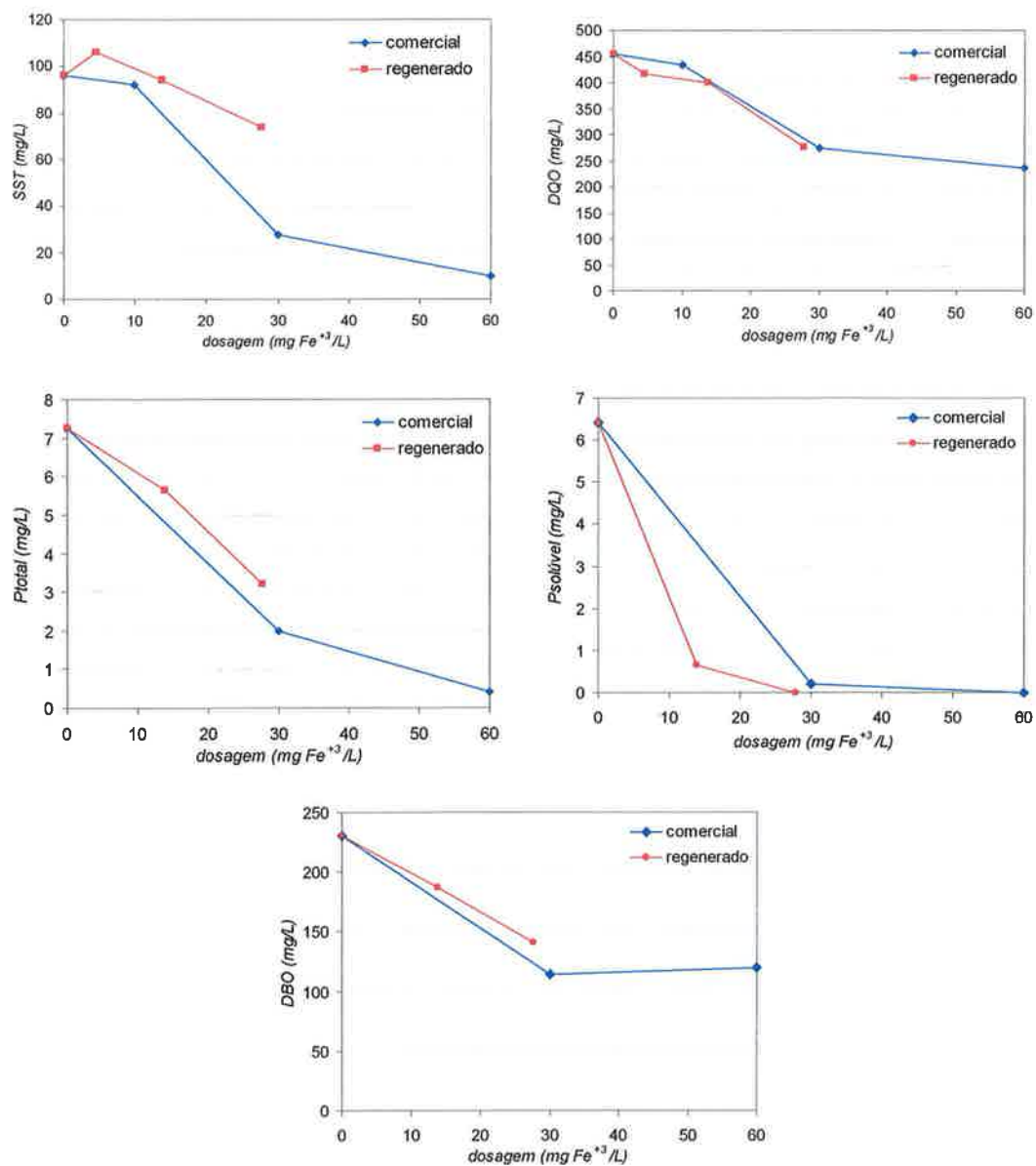


Jarro 3: coagulante comercial  
dosagem = 50 mg Fe/L

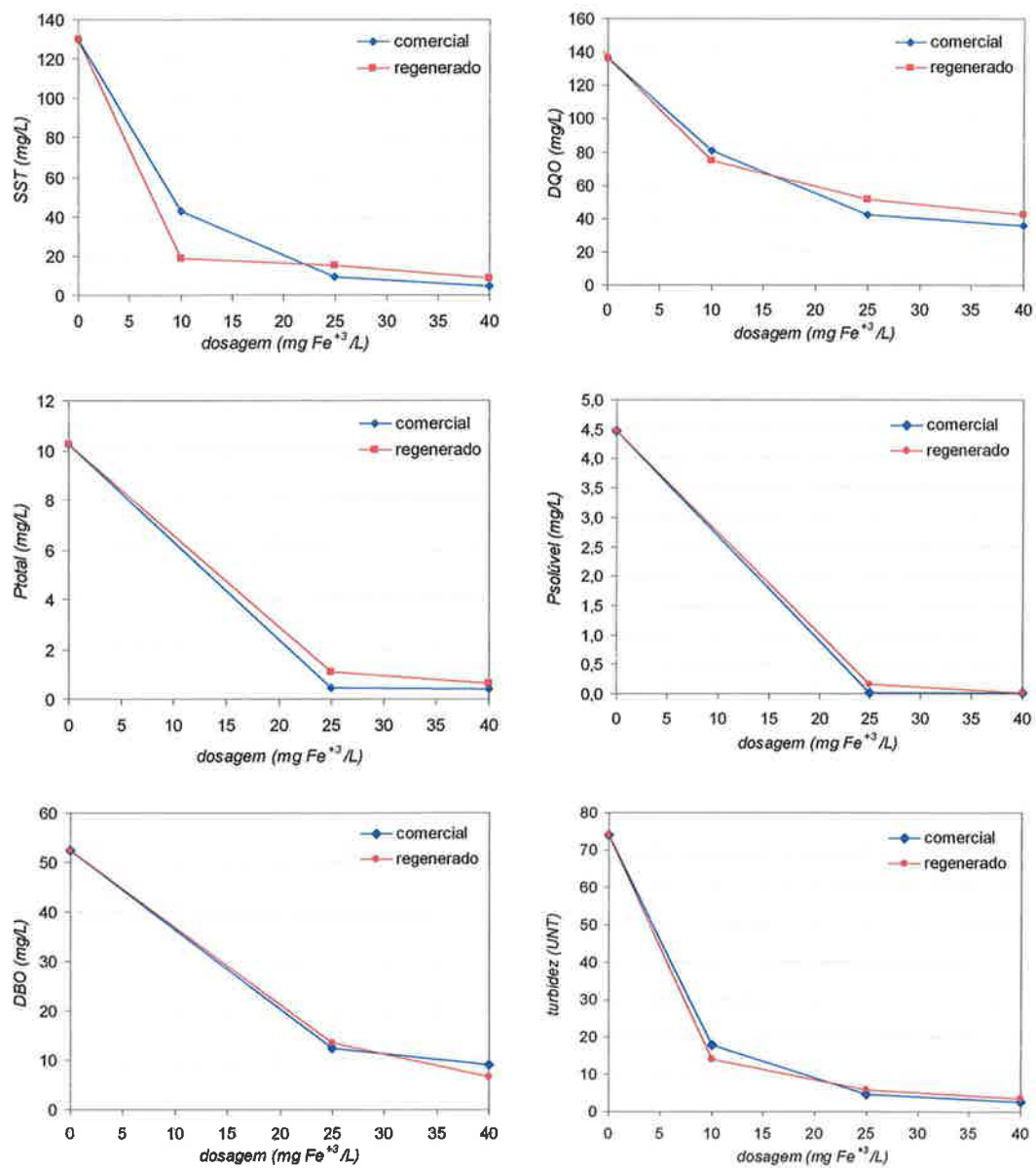
Jarro 5: coagulante regenerado  
dosagem = 61 mg Fe/L

**Figura 5.20 – Ensaio R9: Jar-Test – Sedimentação**

Os parâmetros utilizados para comparar o desempenho dos coagulantes regenerado e comercial foram sólidos em suspensão, DQO, DBO, turbidez, fósforo total e solúvel. Para permitir uma melhor visualização dos resultados, foram elaboradas as Figuras 5.21 a 5.24.



**Figura 5.21 – Resultados do Ensaio R7**



**Figura 5.22 – Resultados do Ensaio R8**



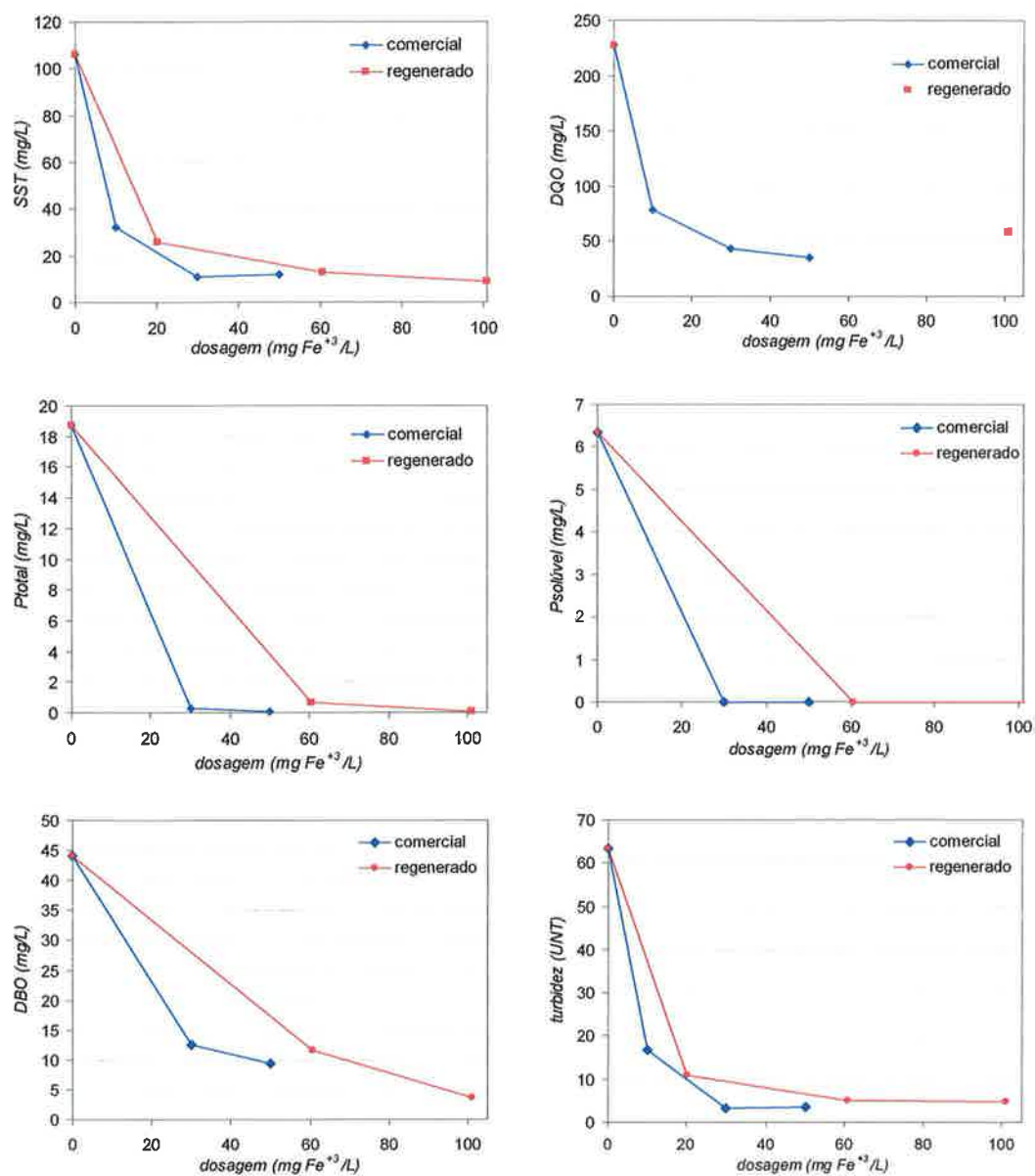
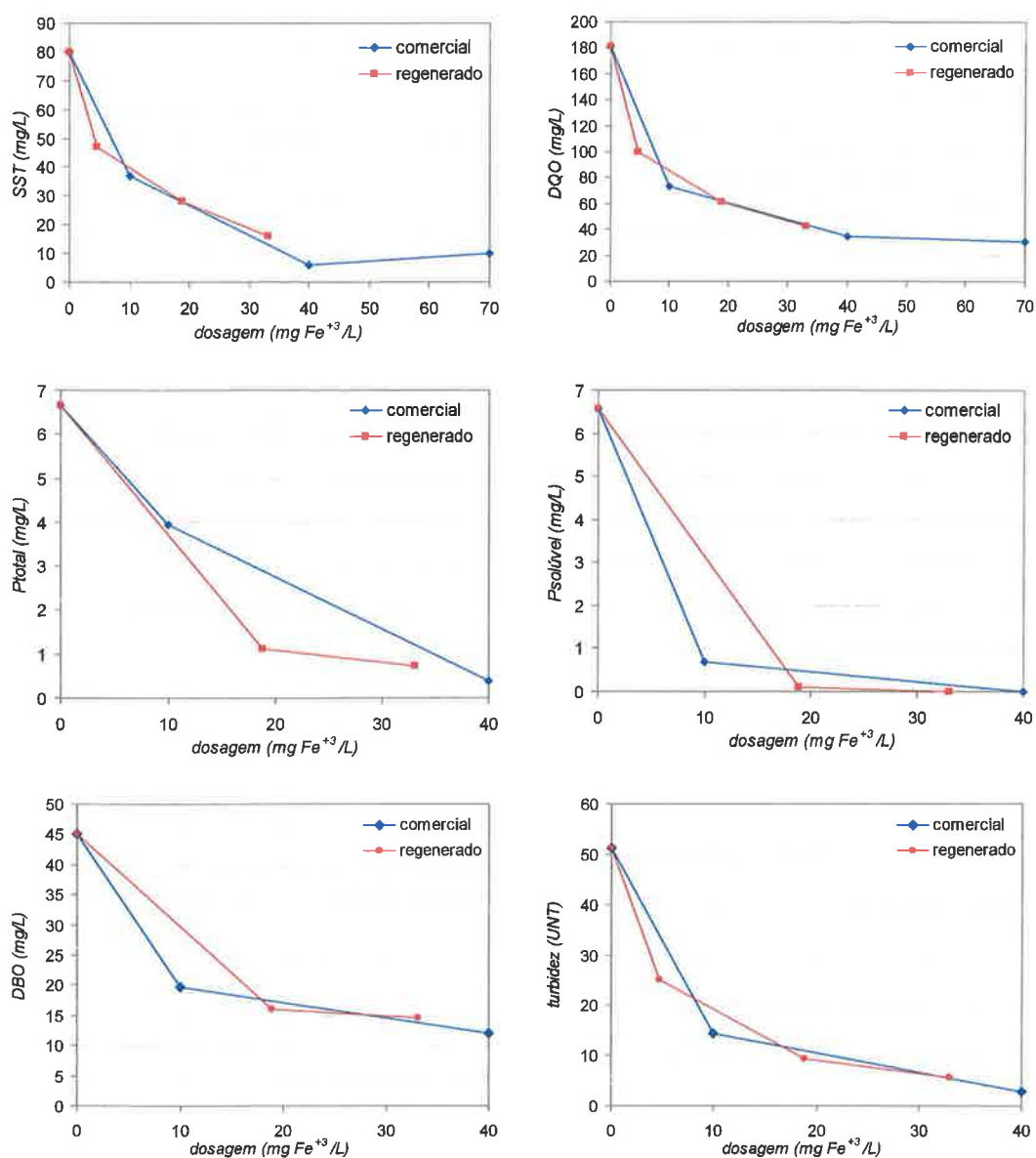


Figura 5.23 – Resultados do Ensaio R9



**Figura 5.24 – Resultados do Ensaio R10**

Pelas figuras apresentadas pode-se perceber que o coagulante regenerado teve uma eficácia muito próxima ao do coagulante comercial, sendo obtidos resultados muito semelhantes. Com os dois coagulantes foram obtidos resultados satisfatórios, com reduções significativas de SST, DQO, DBO, turbidez, fósforo total e solúvel, da ordem de 90% em boa parte dos ensaios.

No primeiro ensaio realizado, R7, aparentemente o coagulante regenerado não tinha o mesmo desempenho que o coagulante comercial, principalmente na remoção de SST. No entanto, isso não foi observado nos ensaios seguintes, portanto o resultado obtido nesse ensaio para SST não foi considerado relevante, sendo que provavelmente devem ter ocorrido problemas na realização dos procedimentos, como na homogeneização das amostras separadas para análise.

Portanto, baseado nos ensaios realizados com o efluente de reator UASB, o coagulante regenerado apresentou desempenho equivalente ao do coagulante comercial, em relação à remoção dos parâmetros monitorados.

### 5.3 Caracterização do Lodo Resultante

Inicialmente, a caracterização do lodo foi realizada pelo teor de sólidos total, e foram obtidos os seguintes resultados, expressos na Tabela 5.22.

**Tabela 5.22 – Resultados Obtidos de Teor de Sólidos**

ensaio	ETA	teor de sólidos totais	
		lodo não acidificado	lodo acidificado
P5	Guaraú	2,28 %	2,98 %
P6	Rio Grande	2,28 %	3,11 %

Pelos resultados apresentados, pode-se observar que houve um aumento do teor de sólidos totais quando houve a acidificação, resultado contrário ao que seria esperado. A explicação encontrada para isso foi que estaria ocorrendo um aumento dos sólidos dissolvidos, pela aplicação do ácido.

Nos ensaios seguintes, passou-se a realizar análises de sólidos em suspensão, sendo que os resultados obtidos estão apresentados nas Tabelas 5.23 e 5.24, para os lodos da ETA Guaraú e ETA Rio Grande, respectivamente.

**Tabela 5.23 – Resultados das Análises das Concentrações de Sólidos em Suspensão nos Ensaio com Lodo da ETA Guaraú**

Ensaio	acidificação		SS totais (mg/L)		SS fixos (mg/L)	
	pH	tempo	inicial	final	inicial	final
<b>G1</b>	2,28-2,55	30'	na	na	na	na
<b>G2</b>	2,14-2,47	30'	19635	15255	na	na
<b>G3</b>	2,36-2,5	30'	4358	2773	na	na
<b>G4</b>						
G4-A	sem acidificação		13075	-	8430	-
G4-B	2,47-2,55	15'	13075	9150	8430	5640
G4-C	2,4-2,51	30'	13075	9710	8430	6260
G4-D	2,3-2,43	45'	13075	10190	8430	6510
<b>G5</b>						
G5-A	sem acidificação		11520	-	7660	-
G5-B	2,33-2,38	05'	11520	8650	7660	5480
G5-C	2,29-2,4	10'	11520	7650	7660	4830
G5-D	2,34-2,4	15'	11520	8240	7660	5230
<b>G6</b>						
G6-A	2,05	10'	9140	6860	5935	4460
G6-B	2,4-3,13	10'	9140	9080	5935	6060
G6-C	3,05-3,59	10'	9140	8410	5935	5660
G6-D	sem acidificação		9140		5935	-

na = não analisado

**Tabela 5.24 – Resultados das Análises das Concentrações de Sólidos em Suspensão nos Ensaio com Lodo da ETA Rio Grande**

Ensaio	acidificação		SS totais (mg/L)		SS fixos (mg/L)	
	pH	tempo	inicial	final	inicial	final
<b>R1</b>	2,4-2,47	30'	2515	1724	1791	1036
<b>R2</b>	2,26-2,44	30'	6368	4658	na	na
<b>R3</b>	2,36-2,5	30'	na	na	na	na
<b>R4</b>						
R4-A	sem acidificação		6365	-	4635	-
R4-B	2,41-2,44	15'	6365	2859	4635	1623
R4-C	2,37-2,41	30'	6365	2690	4635	1500
R4-D	2,43-2,44	45'	6365	2840	4635	1625
<b>R5</b>						
R5-A	sem acidificação		3053	-	2040	-
R5-B	2,54-2,59	05'	3053	2743	2040	1594
R5-C	2,68-2,63	10'	3053	2780	2040	1680
R5-D	2,6	15	3053	2507	2040	1473
<b>R6</b>						
R6-A	2,01-1,95	10'	3560	1280	2465	548
R6-B	2,46-2,74	10'	3560	2810	2465	1820
R6-C	4,74-5,16	10'	3560	3390	2465	2335
R6-D	sem acidificação		3560	-	2465	-
<b>R7</b>	2	10'	1595	553	1090	210
<b>R8</b>	2,5	10'	2350	1288	1645	714
<b>R9</b>	2,3	10'	2035	887	965	563
<b>R10</b>	2,1	10'	2043	584	1396	256

na = não analisado

O lodo resultante do processo de acidificação foi analisado de forma comparativa, confrontando os dados de caracterização do lodo acidificado com os dados do lodo não acidificado. A característica que foi utilizada para a comparação foi a redução de massa.

A equação utilizada para o cálculo da redução de massa foi apresentada no item 5.1.2 (eq. (8)). Nas Tabelas 5.25 e 5.26 são apresentados os resultados de redução de massa obtidos nos ensaios realizados.

**Tabela 5.25 – Redução de SST: Ensaios com Lodo da ETA Guaraú**

Ensaio	condições de acidificação		redução de SST
	pH	tempo	
<b>G2</b>	2,3	30'	22,31%
<b>G3</b>	2,4	30'	36,35%
<b>G4</b>			
G4-A	sem acidificação		-
G4-B	2,5	15'	30,02%
G4-C	2,5	30'	25,74%
G4-D	2,4	45'	22,07%
<b>G5</b>			
G5-A	sem acidificação		-
G5-B	2,3	05'	24,91%
G5-C	2,4	10'	33,59%
G5-D	2,4	15	28,47%
<b>G6</b>			
G6-A	2	10'	24,95%
G6-B	3	10'	0,66%
G6-C	3,6	10'	7,99%
G6-D	sem acidificação		-

**Tabela 5.26 – Redução de SST: Ensaios com Lodo da ETA Rio Grande**

Ensaio	condições de acidificação		redução de SST
	pH	tempo	
<b>R1</b>	2,4	30'	31,45%
<b>R2</b>	2,3	30'	26,85%
<b>R3</b>	2,2	30'	-
<b>R4</b>			
R4-A	sem acidificação		-
R4-B	2,4	15'	55,08%
R4-C	2,4	30'	57,74%
R4-D	2,4	45'	55,38%
<b>R5</b>			
R5-A	sem acidificação		-
R5-B	2,5	05'	10,18%
R5-C	2,6	10'	8,95%
R5-D	2,6	15	17,90%
<b>R6</b>			
R6-A	2,0	10'	64,04%
R6-B	2,6	10'	21,07%
R6-C	5,0	10'	4,78%
R6-D	sem acidificação		-
<b>R7</b>	2,0	10'	65,31%
<b>R8</b>	2,5	10'	45,19%
<b>R9</b>	2,3	10'	56,43%
<b>R10</b>	2,1	10'	71,43%

Considerando os ensaios realizados com condições similares às que foram definidas anteriormente como ideais, que são pH próximo de 2 e tempo de mistura mínimo de 10 minutos, foram calculados os valores médios de redução da concentração de sólidos em suspensão. Para o lodo da ETA Guaraú a redução média da concentração de sólidos em suspensão foi de 28%, com desvio padrão de 5%. Já para o lodo da ETA Rio Grande o valor médio foi 53%, com desvio padrão de 14%.

Considerando a equação para estimativa da redução da massa de lodo, apresentada e discutida no item 3.4.2 (eq. 7), foram calculadas para o lodo de dois dias da ETA Rio Grande qual seria a redução esperada. A eq. (7) que foi utilizada é rerepresentada na seqüência.

$$\text{redução(\%)} = \frac{2,88 \cdot D_{\text{Fe}}}{2,88 \cdot D_{\text{Fe}} + \text{SST} + A} \cdot 100 \quad (7)$$

onde:  $D_{\text{Fe}}$ : dosagem de sais de ferro, expressa como Fe em mg/L;

SST: concentração de sólidos em suspensão totais na água bruta em mg/L;

A: sólidos de outros produtos utilizados.

Os dados de entrada utilizados na equação, a dosagem de ferro e a turbidez da água bruta, foram obtidos na ETA Rio Grande, para os dias 10/10/2003 e 23/01/2004, datas quando foram coletados os lodos para os ensaios R4 e R5. A concentração de sólidos em suspensão foi aproximada considerando que o seu valor é 1,5 vezes a turbidez (AWWA, 1999; Fernandes et al, 2003). A Tabela 5.27 apresenta os valores de entrada e os valores calculados.

**Tabela 5.27 – Redução de SS Observada e Esperada**

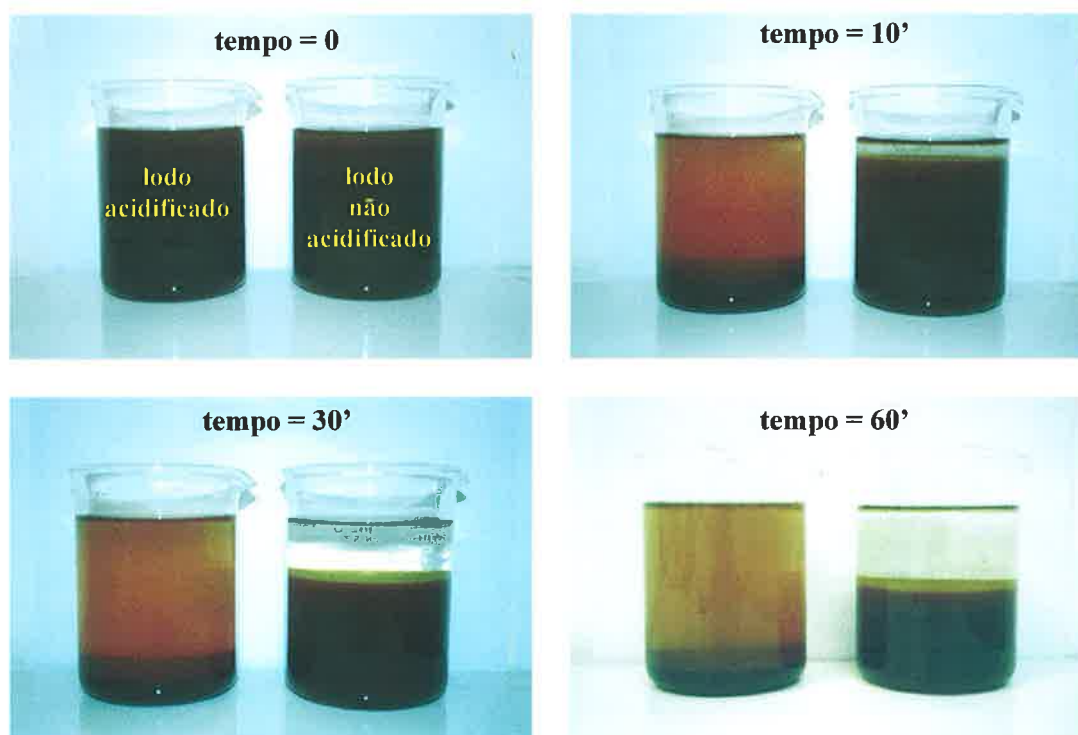
Ensaio	condições de acidificação		redução observada	$D_{\text{Fe}}$ (mg/L)	turbidez da água bruta	redução calculada
	pH	tempo				
<b>R4</b>						
R4-B	2,4	15'	55,08%	4,7	4,66	65,9%
R4-C	2,4	30'	57,74%			
R4-D	2,4	45'	55,38%			
<b>R5</b>						
R5-B	2,5	05'	10,18%	3,7	4,25	62,6%
R5-C	2,6	10'	8,95%			
R5-D	2,6	15	17,90%			

Para o ensaio R4 os valores de redução dos SST foram pouco inferiores aos valores teóricos calculados. Isso era esperado, uma vez que a equação utilizada se baseia no conceito que todo o ferro adicionado pelo coagulante se precipita na ETA e com a acidificação todo o ferro é solubilizado. Dificilmente isso acontece na prática. Além disso, no cálculo o valor do SST na água bruta foi estimado, podendo haver diferenças.

Já no ensaio R5 os valores de redução de massa observados foram muito inferiores ao esperado, um indício que a acidificação não ocorreu de forma adequada. Isso pode ter acontecido por alguns fatores, como pH relativamente elevado e tempos de mistura menores.

Portanto, considerando que a redução média obtida nos ensaios com o lodo da ETA Rio Grande foi de 53% e a esperada próxima de 66%, e admitindo que não ocorreram variações muito significativas na concentração de sólidos em suspensão da água bruta e na dosagem de sulfato férrico aplicada durante o período de realização dos ensaios, pode-se concluir que em geral é observado comportamento similar ao verificado no ensaio R4.

A redução de massa também pode ser observada visualmente pela comparação dos lodos acidificado e não acidificado. Para permitir a visualização, dois béqueres foram preenchidos com lodo do ensaio R9, um com o lodo não acidificado e o outro acidificado, e deixados em repouso por um período de 60 minutos (Figura 5.25).



**Figura 5.25 – Ensaio R9: Béqueres com Lodos Acidificado e Não Acidificado**



Foi observado que após esse período, nos dois béqueres ocorreu a separação de fases, com sedimentação do lodo. No béquer com lodo acidificado o volume de lodo foi significativamente menor que no outro béquer, o que pode ser explicado pela redução de massa observada, de 56%.

## 6. AVALIAÇÃO ECONÔMICA

Buscando verificar a viabilidade econômica da tecnologia de regeneração de coagulantes, foi desenvolvida uma avaliação econômica, que é apresentada nesse item.

A avaliação econômica se baseou na consideração de implantação do sistema de regeneração em uma ETA já existente. Ou seja, foi considerada uma situação inicial, com uma ETA convencional sem sistema de regeneração de coagulante e uma situação final, a qual considera a mesma ETA com a inclusão do sistema de regeneração, composto por uma unidade de acidificação.

A diferença do custo de operação da ETA, decorrente da unidade de acidificação, foi utilizado para calcular o custo do coagulante regenerado. Esse custo foi comparado com o custo de coagulantes comerciais disponíveis no mercado e, dessa maneira, foi avaliado se existem benefícios econômicos na realização da regeneração de coagulante.

Também foi possível fazer previsões sobre em quais situações a regeneração se torna viável economicamente e em quais ela não é viável, por meio da variação de diferentes parâmetros. Esse procedimento permite a identificação dos principais fatores condicionantes da viabilidade econômica da regeneração de coagulante.

É importante ressaltar algumas das premissas que foram adotadas para a execução dessa avaliação, que estão apresentadas abaixo:

- As condições de operação da ETA foram aproximadas das existentes na ETA Rio Grande, uma vez que foi utilizado o lodo dessa ETA na parte experimental;
- As condições de regeneração assumidas foram as obtidas nos ensaios realizados em laboratório, cujos resultados foram apresentados anteriormente;
- Foi considerado que o coagulante regenerado será utilizado no tratamento de esgotos.

### 6.1 Metodologia

Foi definido que na situação inicial há uma ETA operando com um sistema convencional, utilizando sulfato férrico como coagulante. Essa ETA gera uma quantidade de lodo que necessita ser encaminhada à disposição final. As etapas de tratamento da fase sólida que compõem essa ETA na situação inicial são:

- Condicionamento do lodo: para permitir o desaguamento do lodo de forma adequada é necessário realizar o condicionamento desse lodo, de forma a facilitar a agregação das partículas em flocos. Será adotado como hipótese que esse condicionamento ocorre em reator tipo mistura rápida, utilizando um polímero catiônico.
- Desaguamento: o desaguamento tem como objetivo aumentar o teor de sólidos do lodo, atingindo os padrões estabelecidos por aterros sanitários e também para reduzir o seu volume, e conseqüentemente o custo de transporte e disposição. O desaguamento na ETA será assumido como sendo realizado por filtro prensa de placas, ou outro equipamento mecânico.
- Transporte: o lodo gerado na ETA, após as etapas de condicionamento e desaguamento precisa ser transportado até o local de disposição final.
- Destinação Final: será considerado que a destinação final do lodo utilizada nessa ETA é a disposição em aterros sanitários.

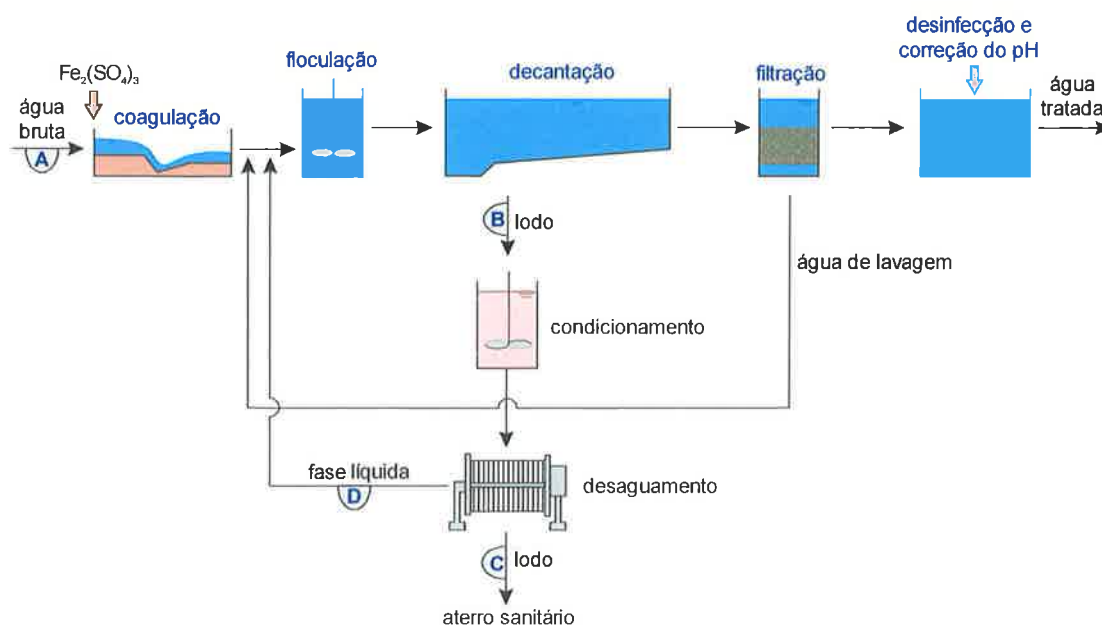
Não foi considerada a existência de uma unidade para o adensamento do lodo pois a parte experimental foi realizada com o lodo não adensado, então não haveria como realizar a avaliação econômica considerando que o lodo tivesse sido adensado, pois isso certamente causaria alterações em alguns parâmetros, como a concentração de ferro no coagulante regenerado.

A implantação de um sistema de regeneração de coagulantes implica basicamente na instalação de uma unidade adicional à esse sistema, constituída por um tanque de acidificação. Ou seja, anteriormente à etapa de condicionamento será considerada a instalação de um reator tipo mistura completa, onde será feita a acidificação do lodo. O coagulante regenerado será separado do lodo na etapa de desaguamento.

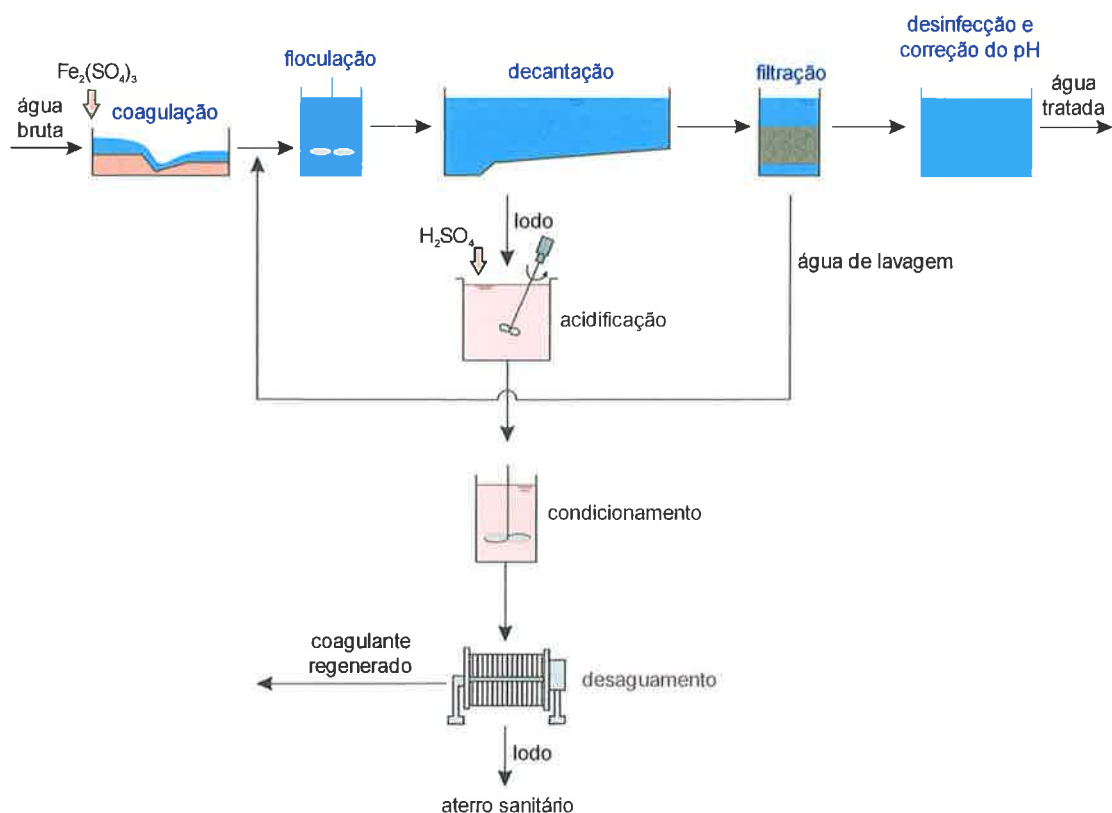
Portanto, foi assumido que as demais instalações do sistema de tratamento da fase sólida não sofrem alterações que juntas sejam capazes de gerar diferenças de custo significativas. Essa hipótese é uma simplificação, uma vez que seriam esperadas alterações nas unidades posteriores à acidificação pois ocorre uma redução do teor de sólidos do lodo, podem ocorrer diferenças nas propriedades de desidratabilidade do lodo e a diminuição do pH do lodo, em decorrência da etapa de acidificação, também poderia implicar em necessidade de alterações nas instalações existentes.

Foi considerado que o sistema de regeneração opera com as condições ótimas determinadas na parte experimental. Para essas condições já foram determinadas estimativas da redução de massa do lodo e consumo de ácido.

As Figuras 6.1 e 6.2 ilustram os arranjos da ETA antes e após a instalação do sistema de regeneração, respectivamente.



**Figura 6.1 – Situação Inicial: ETA Sem Sistema para Regeneração de Coagulante**



**Figura 6.2 – Situação Final: ETA Com Sistema para Regeneração de Coagulante**

Foram considerados dois cenários, detalhados nos itens abaixo:

- **Cenário 1:** Foi assumido como hipótese que uma outra empresa receba gratuitamente o lodo da ETA para fazer a regeneração e retorne para ETA os resíduos restantes. Esse cenário calcula a viabilidade para essa empresa realizar esse serviço, e, portanto, nesse cenário não são consideradas as reduções de custos decorrentes da redução de lodo.
- **Cenário 2:** Foram consideradas as reduções de custo de transporte e disposição final resultantes da massa e volume de lodo. Esse cenário representa, por exemplo, que a própria operadora da ETA implante o sistema de regeneração de coagulantes

Para cada um dos cenários, foi possível obter o custo adicional para operação do sistema, e, considerando a estimativa de produção do coagulante, foi obtido o custo de produção do coagulante. Esses custos foram calculados pelas equações 9 e 10, para os cenários 1 e 2, respectivamente.

Cenário 1:

$$\text{Custo} = \frac{Q_a \cdot A}{Q_c \cdot C} \quad (9)$$

Cenário 2:

$$\text{Custo} = \frac{Q_a \cdot A - (T + D) \cdot (M_{LI} - M_{LF})}{Q_c \cdot C} \quad (10)$$

onde: Custo: custo de produção do coagulante regenerado (R\$ / kg Fe);

$Q_a$ : vazão de ácido utilizado na regeneração (ton / dia);

A: custo do ácido (R\$ / ton);

T: custo de transporte do lodo (R\$ / ton);

D: custo de disposição do lodo (R\$ / ton);

$M_{LI}$ : massa de lodo gerada antes da instalação do sistema de regeneração (ton / dia);

$M_{LF}$ : massa de lodo gerada após a instalação do sistema de regeneração (ton / dia);

$Q_c$ : vazão de coagulante regenerado produzida ( $m^3$  / dia);

C: concentração de ferro no coagulante regenerado (kg Fe /  $m^3$ );

As variáveis que compõem essas equações podem ser agrupadas em três grupos:

- *Grupo 1: Variáveis não relacionadas diretamente às condições de operação:* São as variáveis que não variam com as características da ETA e operação ou não do sistema de regeneração. São elas: A, T, e D.
- *Grupo 2: Variáveis relativas à operação da ETA sem o sistema de regeneração de coagulante:* São as variáveis dependentes das características da ETA considerada, sem o sistema de regeneração em operação. A única variável da equação nesse grupo é  $M_{LI}$ .
- *Grupo 3: Variáveis relativas à operação da ETA com o sistema de regeneração de coagulante:* São as variáveis dependentes das características da ETA

considerada, com o sistema de regeneração em operação. As variáveis que compõem esse grupo são  $Q_a$ ,  $C$ ,  $M_{LF}$  e  $Q_C$ .

Para a obtenção das variáveis relacionadas a operação da ETA, foi necessário determinar as características de operação da ETA considerada. Foi considerada uma ETA operando nas mesmas condições da ETA Rio Grande, pois os resultados obtidos com o lodo dessa ETA serviram de base para a avaliação econômica.

Para isso, foi realizado um balanço de massa considerando como dados de entrada os valores indicados na Tabela 6.1. Alguns desses valores foram obtidos na ETA Rio Grande, e outros estimados.

**Tabela 6.1 – Dados de Entrada Utilizados no Balanço de Massa**

<b>parâmetro</b>	<b>valor adotado</b>
vazão *	5 m <sup>3</sup> /s
turbidez média da água bruta *	4,5 UNT
coagulante *	sulfato férrico
dosagem de coagulante *	15 mg/L
SST na água bruta	6,75 mg/L
Porcentagem da água de lavagem utilizada na ETA	3 %
Massa de hidróxido precipitado por massa de coagulante	0,895
Taxa de captura de sólidos nos decantadores	90 %
Taxa de captura de sólidos nos filtros	100 %
Taxa de captura de sólidos no sistema de desaguamento	95 %
Teor de sólidos em suspensão no lodo produzido nos decantadores *	0,33 %
Teor de sólidos total no lodo desidratado	22 %
Massa específica do lodo proveniente dos decantadores	1000 kg/m <sup>3</sup>
Massa específica do lodo desidratado	1060 kg/m <sup>3</sup>

\* dados obtidos diretamente na ETA Rio Grande, os demais dados foram estimados

O teor de sólidos em suspensão na água bruta foi estimado considerando uma relação entre sólidos em suspensão e a turbidez de 1,5 (AWWA, 1999) e (FERNANDES e FERREIRA FILHO, 2003). A massa de hidróxido precipitada por massa de coagulante foi obtida assumindo que todo o ferro presente no coagulante, na forma de  $Fe_2(SO_4)_3$ , se precipita como hidróxido na forma  $Fe(OH)_3$ .

Posteriormente, esses cálculos foram refeitos alterando alguns parâmetros, tais como vazão de operação da ETA e custo do ácido sulfúrico. Com isso, foi possível visualizar quais são as variáveis que interferem de forma mais significativa no custo do coagulante regenerado, e, conseqüentemente, na viabilidade econômica da regeneração de coagulante.

## 6.2 Apresentação e Análise dos Resultados Obtidos

### 6.2.1 OBTENÇÃO DAS VARIÁVEIS DE CÁLCULO

- *Grupo 1: Variáveis não relacionadas diretamente às condições de operação*

O custo do ácido sulfúrico foi fornecido pela Kemwater Brasil. Foi fornecida uma série histórica dos valores para o ácido sulfúrico Polyline, com concentração de 98%, desde junho de 2002. O valor fornecido para maio de 2004 foi R\$ 372,70/ton.

De acordo com SABESP (2004b), o custo médio para transporte e disposição de lodos de ETA's na RMSP, independente da distância a ser percorrida, é de R\$ 60,00/ton, baseado em previsões de custos de empresas que prestam esses serviços.

**Tabela 6.2 – Resumo dos Valores das Variáveis do Grupo 1**

variável	valor obtido
A	R\$ 372,70/ton
T + D	R\$ 60,00/ton

- *Grupo 2: Variáveis relativas à operação da ETA sem o sistema de regeneração de coagulante*

Considerando os dados de funcionamento da ETA Rio Grande apresentados no item anterior, foi realizado balanço de massa para definição da massa de lodo gerada antes da instalação do sistema de regeneração. Os resultados obtidos no balanço de massa estão apresentados na Tabela 6.3.



**Tabela 6.3 – Balanço de Massa: Valores Obtidos**

via*	parâmetro	valor calculado
A	Vazão líquida de entrada na ETA	432000,00 m <sup>3</sup> /dia
	Vazão sólida de entrada na ETA	2916,00 kg/dia
-	Massa sólida introduzida pela massa de hidróxido precipitada	5815,07 kg/dia
B	Vazão líquida dos decantadores ao sistema de condicionamento	2297,65 m <sup>3</sup> /dia
	Vazão sólida dos decantadores ao sistema de condicionamento	9190,60 kg/dia
	Volume de lodo úmido gerado no sistema de desaguamento	37,44 m <sup>3</sup> /dia
C	Massa de sólidos secos gerada no sistema de desaguamento	8731,07 kg/dia
	Massa de sólidos úmidos gerada no sistema de desaguamento	39686,66 kg/dia
D	Vazão líquida proveniente do sistema de desaguamento	2266,69 m <sup>3</sup> /dia
	Vazão sólida proveniente do sistema de desaguamento	459,53 kg/dia

\* ver Figura 6.1

Com esses resultados foi definida a massa de lodo gerada antes da instalação do sistema de regeneração, correspondente a massa de sólidos úmida gerada no sistema de desaguamento de 39686,66 kg/dia ou 39,7 ton/dia.

**Tabela 6.4 – Resumo dos Valores das Variáveis do Grupo 2**

variável	valor obtido
M <sub>LI</sub>	39,7 ton/dia

- *Grupo 3: Variáveis relativas à operação da ETA com o sistema de regeneração de coagulante*

Para obtenção da vazão de ácido sulfúrico a ser empregada no sistema de regeneração de coagulante foi considerado que o sistema deve operar com pH de aproximadamente 2, que foi determinado como um valor adequado para que ocorra a regeneração. A vazão de ácido utilizada no sistema de regeneração de coagulante foi obtida considerando uma relação entre a massa de ácido adicionada (massa de H<sub>2</sub>(SO)<sub>4</sub>) e a massa de sólidos em suspensão no lodo de 1,35, a média dos valores obtidos com o lodo da ETA Rio Grande nos ensaios (Figura 5.11).

Considerando uma concentração de sólidos em suspensão de 3300 mg/L no lodo dos decantadores, a massa de ácido sulfúrico pode ser calculada conforme apresentado nas equações 11 e 12.

$$M_{\text{ÁCIDO}} = 1,35 \cdot \text{SS} \quad (11)$$

$$M_{\text{ÁCIDO}} = 1,35 \cdot 3300 = 4455 \text{ mg/L} \quad (12)$$

sendo:  $M_{\text{ÁCIDO}}$  = massa de ácido;

SS = concentração de sólidos em suspensão no lodo dos decantadores.

Uma vez que o ácido considerado tem concentração de 98%, a vazão da solução de ácido sulfúrico necessária é:  $Q_{\text{ÁCIDO}} = 4455/0,98 = 4546 \text{ mg/L}$  ou  $\text{g/m}^3$ . A vazão de lodo dos decantadores é, conforme apresentado na Tabela 6.3,  $2297,65 \text{ m}^3/\text{dia}$ .

Assim:

$$Q_a = 4546 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \cdot 2297,65 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} = 1,04 \cdot 10^7 \text{ g/dia} = 10445 \text{ kg/dia} = 10,4 \text{ ton/dia} \quad (13)$$

A concentração de ferro no coagulante regenerado adotada foi a média obtida nos ensaios realizados com lodo da ETA Rio Grande, apresentada no item 5.2.1, de 0,0710% ou 0,71 g/L.

Nos resultados dos ensaios realizados em laboratório, foi obtida uma redução na concentração de sólidos em suspensão de 53%. Portanto, foi adotado que a massa de sólidos secos gerada no sistema de desaguamento teve essa mesma redução. Assumindo que a concentração de sólidos em suspensão no lodo após o desaguamento é a mesma que antes da instalação do sistema de regeneração do coagulante, a massa de sólidos úmidos gerados no sistema de desaguamento também tem a mesma redução, de 53%.

Uma vez que a massa de lodo gerada antes da implantação do sistema de regeneração ( $M_{L1}$ ) era de 39686,66 kg/dia, considerando a redução de 53%, tem-se:

$$M_{L,F} = M_{L,I} \cdot (1 - 0,53) \quad (14)$$

$$M_{L,F} = 39686,66 \cdot 0,47 \quad (15)$$

$$M_{L,F} = 18652,73 \text{ kg/dia} \quad (16)$$

$$M_{L,F} = 18,7 \text{ ton/dia} \quad (17)$$

O volume de coagulante regenerado produzido por unidade de tempo é equivalente à vazão líquida proveniente do sistema de desaguamento. Portanto:

$$Q_C = Q_{\text{desaguamento}} \quad (18)$$

$$Q_C = 2266,69 \text{ m}^3/\text{dia} \quad (19)$$

**Tabela 6.5 – Resumo dos Valores das Variáveis do Grupo 3**

variável	valor obtido
$Q_a$	10,4 ton/dia
$C$	0,71 kg/m <sup>3</sup>
$M_{L,F}$	18,7 ton/dia
$Q_C$	2266,69 m <sup>3</sup> /dia

### 6.2.2 COMPARAÇÃO ENTRE CUSTOS DO COAGULANTE COMERCIAL E REGENERADO

Considerando os valores obtidos para as variáveis e as equações estabelecidas para o cálculo do custo do coagulante regenerado para cada cenário, tem-se os custos obtidos para os cenários 1 e 2 conforme equações 20 a 25:

Cenário 1:

$$\text{Custo} = \frac{Q_a \cdot A}{Q_C \cdot C} \quad (20)$$

$$\text{Custo} = \frac{10,4 \cdot 372,70}{2266,69 \cdot 0,71} \quad (21)$$

$$\text{Custo} = 2,41 \text{ R\$/kgFe} \quad (22)$$

Cenário 2:

$$\text{Custo} = \frac{Q_a \cdot A - (T + D) \cdot (M_{Li} - M_{LF})}{Q_C \cdot C} \quad (23)$$

$$\text{Custo} = \frac{10,4 \cdot 372,70 - 60 \cdot (39,7 - 18,7)}{2266,69 \cdot 0,71} \quad (24)$$

$$\text{Custo} = 1,63 \text{ R\$/kgFe} \quad (25)$$

O custo do coagulante comercial foi fornecido pela Kemwater Brasil, sendo que em maio de 2004 o valor fornecido foi de R\$ 1,74/kgFe. Esse valor é 28% inferior ao calculado para o Cenário 1 e 6% maior que o valor obtido para o coagulante regenerado no Cenário 2.

Portanto, no Cenário 1, que não considerou as vantagens econômicas decorrentes da redução de lodo, a regeneração nas condições assumidas não seria viável economicamente.

Já no Cenário 2, que considera o reflexo econômico da redução do lodo, o custo do coagulante regenerado foi inferior ao do coagulante comercial, mas os valores foram muito próximos, indicando que a operação do sistema de regeneração de coagulante tem o potencial de ser viável economicamente. Ressalta-se que não foram considerados os custos de implantação do sistema de regeneração, de forma que em cada caso deve ser avaliado qual o tempo de retorno, ou seja, o intervalo de tempo necessário para que o investimento realizado na implantação seja recuperado.

Visando avaliar quais variáveis interferem significativamente no custo do coagulante regenerado, e, conseqüentemente, em que condições a regeneração de coagulante seria viável, foram feitas simulações alterando alguns parâmetros.

Observando a equação, pode-se verificar que uma das variáveis que interferem significativamente no custo do coagulante é o custo do ácido sulfúrico. Portanto, a viabilidade econômica dessa tecnologia ficaria altamente dependente da variação de preço desse produto. No entanto, isso provavelmente não ocorre, pois a viabilidade econômica depende da relação entre o custo do coagulante regenerado e o custo do

coagulante comercial, e como o ácido sulfúrico também é utilizado na fabricação do ácido sulfúrico comercial, essa relação torna-se pouco dependente desse parâmetro.

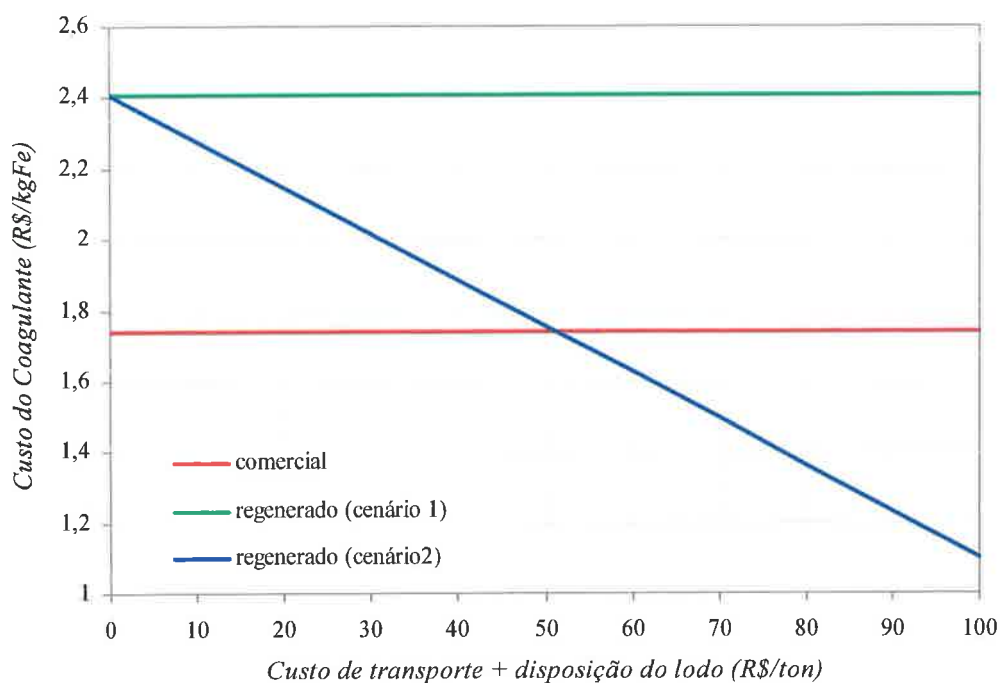
Uma alternativa seria que na regeneração do coagulante fosse utilizado um ácido sulfúrico de qualidade e custo inferior ao que é utilizado na fabricação do coagulante comercial. Isso seria aceitável do ponto de vista técnico considerando que o coagulante regenerado seria utilizado no tratamento de esgoto, sendo aceitável que fossem encontradas concentrações maiores de contaminantes no coagulante regenerado que no coagulante utilizado no tratamento de água para abastecimento.

Isso poderia tornar a regeneração do coagulante mais atrativa do ponto de vista econômico, inclusive tornando o Cenário 1 também viável economicamente. Para que isso acontecesse, seria necessário que o ácido sulfúrico tivesse uma redução de aproximadamente 28%, passando a custar R\$ 269,25.

A vazão da ETA foi alterada e todos os cálculos refeitos de maneira análoga aos apresentados anteriormente. As vazões utilizadas foram 5 m<sup>3</sup>/s (resultado já apresentado), 3 m<sup>3</sup>/s, 1 m<sup>3</sup>/s, 0,5 m<sup>3</sup>/s e 0,01 m<sup>3</sup>/s. Os valores obtidos para o custo do coagulante regenerado foram exatamente os mesmos, indicando que a vazão não interfere no custo do coagulante resultante da operação do sistema.

Esse resultado era esperado, pois o aumento da vazão implica em um aumento do consumo de ácido sulfúrico, o que resultaria no aumento do custo, mas também gera o aumento da produção de coagulante e da redução de lodo gerado. Ressalta-se que os custos decorrentes da implantação do sistema seriam distintos para ETA's com vazões diferentes, pois as dimensões das instalações necessárias para acidificação, como tanque de acidificação e bombas dosadoras, são proporcionais à vazão.

Considerando que os dois cenários apresentaram resultados distintos, uma variável que claramente interfere na viabilidade econômica é o custo de transporte e disposição do lodo. Alterando esse valor, obtém-se os valores de custo do coagulante regenerado para os Cenários 1 e 2, conforme indicado na Figura 6.3.



**Figura 6.3 – Variação do Custo do Coagulante com o Custo de Transporte e Disposição do Lodo (maio/04)**

Observando a Figura 6.3 percebe-se que o custo do coagulante regenerado pela simulação realizada no cenário 2 assume valor igual ao do coagulante comercial quando o custo de transporte e disposição do lodo é da ordem de R\$ 50,00/ton, e, para valores mais altos que esse a operação do sistema de regeneração se torna economicamente viável.

Portanto, essa é uma variável extremamente significativa na avaliação econômica, e, em cada caso específico essa variável pode assumir valores muito distintos, interferindo na viabilidade econômica da tecnologia de regeneração de coagulantes.

É importante lembrar que os resultados apresentados são específicos para as condições observadas na ETA Rio Grande, sendo que a tecnologia pode ser viável ou não dependendo das características da ETA, tais como qualidade da água bruta, tipo de coagulante, dosagem de coagulante e localização da ETA, que interfere no custo de transporte e disposição do lodo.

Portanto, a regeneração do coagulante pode ser viável economicamente ou não, dependendo das condições específicas de cada caso, pois em cada situação as variáveis técnicas relativas às condições de operação e as às variáveis econômicas como custo do ácido sulfúrico e de transporte e disposição do lodo serão distintas.

Mas, os resultados obtidos indicaram que a regeneração de coagulante pode ser viável, e isso justifica que seja considerada e estudada para cada caso específico, visando determinar onde pode ser aplicada de forma viável economicamente.

Além disso, mesmo que os benefícios econômicos não sejam muito significativos, deve se considerar que essa é uma alternativa ambientalmente adequada, uma vez que reduz a quantidade de resíduos e re-aproveita um recurso.

## 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS

Com essa pesquisa foram obtidas algumas conclusões relativas aos aspectos técnicos e econômicos da regeneração de coagulante pela acidificação de lodos de ETA's. Essas conclusões relativas a cada um desses aspectos embasaram o conclusão relativa ao principal objetivo dessa pesquisa, a determinação da viabilidade técnica e econômica de aplicação dessa tecnologia.

Em relação aos aspectos técnicos da regeneração de coagulante, destacam-se os seguintes aspectos:

- As condições para a regeneração do coagulante definidas como as ideais para os dois lodos estudados foram pH de aproximadamente 2 e tempo de acidificação de 10 minutos.
- Uma vez que no processo de acidificação os lodos apresentaram comportamento em relação aos parâmetros tempo de mistura e pH semelhante, independente da ETA onde foram coletados, possivelmente os parâmetros definidos como ideais para as ETA's Guaraú e Rio Grande especificamente, podem ser estendidos aos lodos de outras ETA's.
- A demanda de ácido para acidificação do lodo da ETA Rio Grande foi maior que a prevista pela relação estequiométrica, um indício da presença de outros compostos que exercem demanda pelo ácido.
- Foi observado que há uma relação linear entre a redução da concentração de sólidos em suspensão e a concentração no coagulante, e portanto a operação diária de um sistema de regeneração pode se basear nos resultados de SS.
- O coagulantes obtidos pela regeneração apresentaram concentrações de ferro da ordem de 100 vezes menores em relação aos valores usualmente presentes nos coagulantes comerciais.
- As concentrações de contaminantes obtidas nas análises dos coagulantes regenerados permitiram observar que os valores variavam significativamente com a ETA da onde foi retirado o lodo, provavelmente devido à diferenças na qualidade da água bruta e dos coagulantes utilizados, e, portanto, as concentrações de contaminantes devem ser avaliadas para cada caso específico.



- De modo geral, o coagulante regenerado a partir do lodo da ETA Rio Grande apresentou concentrações de contaminantes da mesma ordem de grandeza que os coagulantes comerciais, em relação à quantidade de ferro presente.
- O desempenho do coagulante regenerado nos ensaios com efluente de reator UASB foi equivalente ao obtido com coagulante comercial.
- Nas condições de regeneração ótimas determinadas, as reduções médias de sólidos em suspensão obtidas para o lodo da ETA Guaraú e ETA Rio Grande foram 28% e 53%, respectivamente.
- A redução da concentração de sólidos em suspensão obtida é um pouco inferior, aproximadamente 15%, que o valor teórico calculado.
- Sugere-se que em estudos futuros seja avaliada a influência da acidificação na etapa de desaguamento do lodo.

Assim, a regeneração de coagulante, para os lodos estudados, mostrou-se uma alternativa tecnicamente viável, gerando os benefícios que eram esperados, um coagulante que pode ter uso em sistemas de tratamento de esgotos sanitários e uma redução de lodo a ser encaminhado à disposição final significativa.

Também foi concluído que os dois lodos apresentaram comportamento diferente em alguns aspectos, como concentração de contaminantes e redução da massa. Portanto, há necessidade de estudos em escala de bancada ou escala piloto para determinação dessas variáveis para cada lodo.

Na etapa de estudo da avaliação econômica do uso dessa tecnologia, as conclusões obtidas foram:

- A economia na operação da ETA gerada pela redução de lodo decorrente da operação do sistema de regeneração é muito significativa no custo final do coagulante regenerado, considerando os custos de transporte e disposição de lodo na RMSP.
- O custo do ácido sulfúrico é um parâmetro importante no custo do coagulante regenerado, e, portanto, a utilização de um ácido de menor qualidade e custo

inferior pode ser uma boa alternativa para melhorar economicamente os benefícios resultantes da regeneração.

- A vazão da ETA não tem influência no custo do coagulante regenerado considerando os custos de operação do sistema de regeneração.
- Para as condições consideradas, o custo do coagulante regenerado foi 28% maior que o do coagulante comercial quando não foi considerada a redução de custos decorrente da redução de lodo.
- Considerando a redução dos custos propiciada pela redução de lodo, nas condições adotadas, o custo do coagulante regenerado foi 6% inferior ao custo do coagulante comercial.

Considerando todos esses aspectos apresentados anteriormente a regeneração de coagulante é uma alternativa tecnicamente viável, produzindo um coagulante que pode ter aplicação em sistemas que não tenham como objetivo o tratamento de águas para abastecimento, como no tratamento de esgotos sanitários. Além disso é uma alternativa que pode ser economicamente viável, dependendo de características específicas de cada caso.

Portanto, a principal conclusão desse trabalho é que foram apresentados argumentos que justificam que hoje em dia essa tecnologia seja considerada como uma alternativa potencialmente viável técnica e economicamente para o tratamento e reaproveitamento de lodo de ETA's.

Assim, recomenda-se que ETA's já em funcionamento ou em fase de projeto que estejam em busca de alternativas para o lodo gerado na etapa de tratamento, considerem essa alternativa, e avaliem a viabilidade de aplicação para a sua situação específica.

## 8. LISTA DE REFERÊNCIAS

ABNT. **Sulfato de Alumínio**. Norma técnica NBR 11176, EB-2005, out. 1989.

ALDEEB, A.A.; QASIM, S.R.; PUPPALA, A.J.; ANDERSON, C.F.. Physical and Engineering Properties of Treatment Plant Residuals and Disposal. American Water Works Association Journal, EUA, Vol. 95, nº08, ago. 2003.

ASCE, AWWA, EPA. **Management of Water Treatment Plant Residuals**. EUA: 1996.

APHA, AWWA, WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. EUA: 1995.

AWWA. **Water Treatment Plant Waste Management**. EUA: AWWA Research Foundation, 1987.

AWWA. **Coagulant Recovery: A Critical Assessment**. EUA: AWWA Research Foundation, AWWA, 1991.

AWWA. **AWWA Standard for Ferric Sulfate**. ANSI/AWWA B406-92, 1992.

AWWA. **AWWA Standard for Aluminum Sulfate – Liquid, Ground or Lump**. ANSI/AWWA B403-93, 1993.

AWWA. **AWWA Standard for Liquid Ferric Chloride**. ANSI/AWWA B407-93, 1993.

AWWA. **Water Quality and Treatment**. EUA: McGraw-Hill, 5ª edição, 1999.

- BISHOP, M.M.; CORNWELL, D.A.; ROLAN, A.T.; BAILEY, T.L.. Testing of Alum Recovery for Solids Reduction and Reuse. American Water Works Association Journal, EUA, Vol. 79, n°06, Jun. 1987.
- BISHOP, M.M.; CORNWELL, D.A.; ROLAN, A.T.; BAILEY, T.L.. Mechanical Dewatering of Alum Solids and Acidified Solids: An Evaluation. American Water Works Association Journal, EUA, Vol. 83, n°09, Setembro 1991.
- BOURGEOIS, J.C.; WALSH, M.E.; GAGNON, G.A.. Treatment of Drinking Water Residuals: Comparing Sedimentation and Dissolved Air Flotation Performance with Optimal Cation Ratios. Water Research, Grã Bretanha, Vol. 38, n°05, pg. 1173-1182, 2004.
- CEN. **Chemicals Used for Treatment of Water Intended for Human Consumption – Iron (III) Sulfate.** EN 890, 1996.
- CEN. **Chemicals Used for Treatment of Water Intended for Human Consumption – Aluminium Sulfate.** EN 878, 1997.
- CETESB. **Relatório de Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo - 2003.** São Paulo: 2004.
- CHEREMISINOF, P.N. **Process Engineering Handbook Series: Solids/Liquids Separation.** EUA: Technomic, 1995.
- CHUNG, N.K. “*Chemical Precipitation*”, in FREEMAN, H.M. **Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal.** EUA: McGraw-Hill Book Company, pg 7.21-7.31, 1989.
- CORNWELL, D.A.; LEE, R.G. Waste Stream Recycling: Its Effect on Water Quality. American Water Works Association Journal. EUA, Vol. 86, n°11, Nov. 1994.

- CORNWELL, D.A.; KOPPERS, H.M.M. (ed.). **Slib, Schlamm, Sludge**. EUA: AWWA Research Foundation/KIWA Ltd., 1990.
- El SAMRANI, A.G. et al. Clarification of Municipal Sewage with Ferric Chloride: The Nature of Coagulant Species. *Water Research*. Grã Bretanha, Vol. 38, n°03, pg. 756-768, 2004.
- EPA. **Wastewater Technology Fact Sheet: Chemical Precipitation**. EUA: 2000. Disponível em <[http://www.epa.gov/owm/mtb/chemical\\_precipitation.pdf](http://www.epa.gov/owm/mtb/chemical_precipitation.pdf)>. Acesso em 25/10/2004.
- EPA. **Chemical Aids Manual For Wastewater Treatment Facilities**. EUA: 1979.
- EPA. **Process Design Manual for Phosphorus Removal**. EUA: 1976.
- FERNANDES, A.N.; FERREIRA FILHO, S.S. **Balanço de Massa e Produção de Lodo da Estação de Tratamento de Água Alto da Boa Vista - SABESP**. in: 22° Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Santa Catarina, 2003.
- FERREIRA FILHO, S.S.; ALÉM SOBRINHO, P. **Considerações sobre o Tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. São Paulo: 1997.
- GALARNEAU, E.; GEHR, R. Phosphorous Removal From Wastewaters: Experimental and Theoretical Support for Alternative Mechanisms. *Water Research*. Grã Bretanha, Vol. 31, n°02, pg. 328-338, 1997.
- GEERTSEMA, W.S.; KNOCKE, W.R.; NOVAK, J.T.; DOVE, D. Long Term Effects of Sludge Application to Land. *American Water Works Association Journal*. EUA, Vol. 86, n° 11, Nov., 1994.

- GONÇALVES, R.F.; PIOTTO, Z.C.; RESENDE, M.B. **Influência dos Mecanismos de Coagulação da Água Bruta na Reciclagem de Coagulantes em Lodos de Estações de Tratamento de Água.** in: 19º Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Foz do Iguaçu, 1997.
- LUCAS, J.B.; DIHALA, T.A.; RENEAU, R.B.; NOVAK, J.T.; KNOCKE, W.R.. Alum Sludge Land Application and Its Effect in Plant Growth. American Water Works Association Journal. EUA, Vol. 86, nº11, Nov., 1994.
- MANDLOI, M.; CHAUDHARI, S.; FOLKARD, G. K. Evaluation of Natural Coagulants For Direct Filtration. Environmental Technology. Inglaterra, Vol. 25, nº04, pg. 481-489, 2004.
- MARTIN, R. F.; WILSON, T. E.. *“Design and Operation of Nutrient Removal Facilities in the U.S.”.* in HORAN, N.J.; LOWE, P.; STENTIFORD, E.I. **Nutrient Removal.** EUA: Technomic Publishing Company, 1994.
- MASIDES, J.; SOLEY, J.; MATA-ALVAREZ, J. A Feasibility Study of Alum Recovery in Wastewater Treatment Plants. Water Research. Grã Bretanha, Vol. 22, nº04, pg. 399-405, 1988.
- MASSCHELEIN, W. J.; DEVLEMINCK, R.; GENOT, J. The Feasibility of Coagulant Recycling by Alkaline Reaction of Aluminum Hydroxide Sludges. Water Research. Grã Bretanha, Vol. 19, nº11, pg. 1363-1368, 1985.
- McCURDY, K.; CARLSON, K.; GREGORY, D. Floc Morphology and Cyclic Shearing Recovery: Comparison of Alum and Polyaluminum Chloride Coagulants. Water Research. Grã Bretanha, Vol. 38, nº02, pg. 468-494, 2004.

METCALF & EDDY. **Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse.** EUA: McGraw-Hill, 3ª edição, 1995.

MOTA, G.; PATERNIANI, J.E.S. (orientador). **Eficiência da Semente de Moringa Oleifera como Coagulante em Tratamento de Água.** in: XII Congresso Interno de Iniciação Científica: Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 2004. Disponível em <<http://www.prp.unicamp.br/pibic/xiicongresso/LivroIC.pdf>>. Acesso em 08/10/2004.

PARSEKIAN, Marilu Pereira Serafim. **Análise e Proposta de Formas de Gerenciamento de Estações de Tratamento de Águas de Abastecimento Completo em Cidades de Porte Médio do Estado de São Paulo.** Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da USP. São Carlos, 1998.

PAVANELLI, G. **Eficiência de Diferentes Tipos de Coagulantes na Coagulação, Floculação e Sedimentação de Água com Cor ou Turbidez Elevada.** Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos da USP. São Carlos, 2001.

PETRUZELLI, D.; VOLPE, A.; LIMONI, N.; PASSINO, R.. **Coagulants Removal and Recovery from Water Clarifier Sludge.** Elsevier Science. Grã Bretanha, Vol. 34, nº 07, pg. 2177-2182, 2000.

PROSAB. **Pós-Tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios.** Belo Horizonte: Segrac Editora e Gráfica, 1ª edição, 2001a.

PROSAB. **Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final.** Curitiba: Suprema Gráfica e Editora, 1ª edição, 2001b.

- SANTOS, H.R. **Aplicação de Coagulantes no Afluente de Reator Anaeróbio de Leito Expandido Alimentado com Esgoto Sanitário**. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos da USP. São Carlos, 2001.
- SABESP. **RAP – Relatório Ambiental Preliminar: Aterro Exclusivo para Disposição de Lodo da ETA Taiaçupeba**. São Paulo, 2004a.
- SABESP. **Sistemas de Captação e Tratamento – Região Metropolitana de São Paulo**. Disponível em <<http://www.sabesp.com.br>>. Acesso em 13/10/2004b.
- SAWYER, C.N.; McCARTY, P.; PARKIN, G.F. **Chemistry for Environmental Engineering**. EUA: McGraw Hill, 4ª edição, 1994.
- SEDLAK, R. (ed.). **Phosphorus and Nitrogen Removal from Municipal Wastewater: Principles and Practice**. EUA: Lewis Publishers, 2ª edição, 1991.
- SILVA, T.S.S. **Estudo de Tratabilidade Físico-Química com Uso de Taninos Vegetais em Água de Abastecimento e Esgoto**. Dissertação (mestrado) - Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública. Rio de Janeiro, 1999. Disponível em <<http://portaldses.cict.fiocruz.br>>. Acesso em 08/10/2004.
- SINELLI, P.H. **Remoção de Fósforo de Efluente de Tratamento Anaeróbio por Processo Físico-Químico**. Dissertação (mestrado) - Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2002.
- SOUSA, J.T.; VAZOLLER, R.F.; FORESTI, E. Phosphate Removal in an UASB Reactor Treating Synthetic Substrate Simulating Domestic Sewage.



Brazilian Journal Of Chemical Engineering. Brasil, ABEQ, v.14, n.4, p.309 - 314, 1997. Disponível em  
<[http://www.scielo.br/scielo.php/script\\_sci\\_serial/pid\\_0104-6632/ing\\_en/nrm\\_isso](http://www.scielo.br/scielo.php/script_sci_serial/pid_0104-6632/ing_en/nrm_isso)>. Acesso em 09/11/2004.

VAN HAANDEL, A.C.; LETTINGA, G. **Anaerobic Sewage Treatment: A Practical Guide for Regions with a Hot Climate**. Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd., 1994.

WPCF. **Sludge Conditioning**. EUA: 1988.

WPCF. **Clarifier Design – Manual of Practice FD8**. EUA: 1985.

WPCF. **Nutrient Control Manual of Practice FD7 - Facilities Design**. EUA: 1983.

YUZHU, W.; MORITA, D.M. **Condicionamento de Lodo de Estação de Tratamento de Água: Estudo de Caso**. Boletim Técnico 34 da EPUSP, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. São Paulo, 1997.