

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**Escola de Engenharia**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais**

**AVALIAÇÃO DO REÚSO E TRATAMENTO DE ÁGUAS ÁCIDAS DE MINAS  
DE CARVÃO PELO MÉTODO NF-FADAT – NEUTRALIZAÇÃO,  
FLOCULAÇÃO E FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO DE ALTA TAXA**

**Aline Nogueira da Silveira**

**Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia**

**Porto Alegre**

**2009**

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**Escola de Engenharia**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais**

**AVALIAÇÃO DO REÚSO E TRATAMENTO DE ÁGUAS ÁCIDAS DE MINAS  
DE CARVÃO PELO MÉTODO NF-FADAT – NEUTRALIZAÇÃO,  
FLOCULAÇÃO E FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO DE ALTA TAXA**

**Aline Nogueira da Silveira**  
Engenheira Química

Trabalho realizado no Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental (LTM) do Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Tecnologia Mineral e Metalurgia Extrativa.

**Porto Alegre**

**2009**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Tecnologia Mineral e Metalurgia Extrativa e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Rubio

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ivo André Homrich Schneider – UFRGS – DEMET

Prof. Dr. Elvis Carissimi - ULBRA – Engenharia Ambiental

Prof. Dr. Alexandre Hahn Englert – UFRGS - DQI

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann  
Coordenador do PPGEM

Porto Alegre

2009

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Jorge Rubio, pela orientação, dedicação e pelo crescimento profissional proporcionado.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela completa infra-estrutura oferecida e qualidade de recursos, ao PPGEM, ao DEMIN e ao CNPq pelo apoio financeiro.

Ao Sindicato das Indústrias de Extração de Carvão do Estado de Santa Catarina (SIECESC), pela oportunidade de desenvolvimento do trabalho e fornecimentos de dados.

À Panamericana S.A. e a Floerger Brasil pelo fornecimento de materiais para o desenvolvimento dos estudos.

Aos colegas do Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental (LTM-UFRGS), pela amizade, apoio, sugestões e contribuições técnicas.

Ao meu pai (Alcemar), minha mãe (Oreci) e minha irmã (Caroline), pelo apoio e incentivo.

Ao Marcelo Bastos, por ter estado sempre ao meu lado, por toda a ajuda, compreensão e pelo amor.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>IV</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE ABREVIACÕES .....</b>	<b>X</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>XII</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XIV</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>4</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
3.1 DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS (DAM).....	5
3.1.1 A problemática da DAM.....	6
3.1.2 Controle da Drenagem Ácida de Minas.....	9
3.1.3 Métodos ativos de tratamento das águas ácidas da mineração .....	10
3.1.4 Princípios físico-químicos no tratamento de DAM por NF-FADAT.....	15
3.1.4.1 <i>Precipitação de metais versus pH</i> .....	15
3.1.4.2 <i>Floculação</i> .....	19
3.1.4.3 <i>Flotação por Ar Dissolvido</i> .....	21
3.2 A ÁGUA NO MUNDO.....	26
3.2.1 Conservação da Água .....	29
3.3 REÚSO DE ÁGUA.....	30
3.3.1 Histórico.....	30
3.3.2 A água de reúso e o ciclo hidrológico .....	34
3.3.3 Conceito de reúso de água .....	34
3.3.4 Constituintes da água de reúso .....	37
3.3.5 Reúso de água para fins não potáveis.....	39
3.3.5.1 <i>Fins agrícolas</i> .....	39
3.3.5.2 <i>Uso urbano</i> .....	41
3.3.5.3 <i>Fins industriais</i> .....	41
3.4 CRITÉRIOS PARA O REÚSO DE ÁGUA.....	42
3.4.1 Critérios Nacionais .....	42
3.4.2 Critérios Internacionais.....	49
3.4.2.1 <i>WHO</i> .....	49
3.4.2.2 <i>EUA</i> .....	52
3.4.2.3 <i>Japão</i> .....	57
3.4.2.4 <i>Espanha</i> .....	58
3.4.2.5 <i>Tunísia</i> .....	60
3.4.2.6 <i>Israel</i> .....	61

<b>4</b>	<b>EXPERIMENTAL</b> .....	<b>63</b>
4.1	MATERIAIS .....	63
4.1.1	Água ácida de mina de carvão - DAM .....	63
4.1.2	Reagentes .....	65
4.1.3	Equipamentos .....	66
4.2	METODOLOGIA .....	70
4.2.1	Estudos de neutralização de DAM – Consumo de cal.....	72
4.2.2	Precipitação química de íons metálicos – Efeito do pH .....	73
4.2.3	Precipitação química do ânion sulfato ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) .....	73
4.2.4	Floculação hidráulica dos precipitados.....	73
4.2.5	Hidrofobização dos flocos formados.....	74
4.2.6	Separação sólido-líquido por FADAT – Flotação por Ar Dissolvido de Alta Taxa .....	74
4.2.7	Sistema de coleta e preservação de amostras.....	74
4.2.8	Neutralização da DAM-SS16 após tratamento a pH 12 .....	75
4.2.9	Análise de contaminações orgânicas e biológicas.....	76
4.2.10	Verificação do teor de sólidos no lodo gerado pelo processo de tratamento NF-FADAT .....	76
4.2.11	Pré-avaliação econômica .....	77
4.3	TÉCNICAS ANALÍTICAS .....	77
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>79</b>
5.1	ESTUDO DE LABORATÓRIO .....	79
5.2	ESTUDO PILOTO DE TRATAMENTO DA DAM-SS16 PELO PROCESSO NF-FADAT .....	79
5.2.1	Estudo piloto de tratamento da DAM-SS16 a pH 7 .....	79
5.2.2	Estudo piloto de tratamento da DAM-SS16 a pH 9 .....	83
5.2.3	Estudo piloto de tratamento da DAM-SS16 a pH 12 .....	88
5.3	ANÁLISES DE CONTAMINAÇÕES ORGÂNICAS E BIOLÓGICAS.....	93
5.4	VERIFICAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS DO LODO GERADO NO TRATAMENTO DA DAM-SS16 PELO PROCESSO NF-FADAT .....	98
5.5	PRÉ-AVALIAÇÃO DE CUSTOS OPERACIONAIS DO PROCESSO NF- FADAT .....	100
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>102</b>

<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>104</b>
<b>8</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>106</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>107</b>
	<b>ANEXO - PUBLICAÇÕES ASSOCIADAS À DISSERTAÇÃO .....</b>	<b>113</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 DAM na região carbonífera de SC. Mina Esperança, Criciúma (Google Earth <sup>®</sup> , 2008).....	7
Figura 3.2 Localização dos distritos carboníferos da região sul do Brasil (a) e das bacias hidrográficas de Santa Catarina (b) (IBRAM /ANA, 2006; SIRHESC, 2009).....	8
Figura 3.3 Bacias de sedimentação de flocos de DAM tratada (NF) e detalhe do sistema de floculação (chicanas de fluxo hidráulico horizontal) – Capão da Roça, COPELMI/RS.....	11
Figura 3.4 Estação de tratamento de DAM da carbonífera Metropolitana (5-10 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> ) - Processo NF-FAD.....	12
Figura 3.5 Aspecto do lodo flotado e da água tratada pelo processo NF-FAD, Carbonífera Metropolitana S.A (SC). ....	12
Figura 3.6 (a) Estação de Tratamento de águas ácidas via FAD; (b) Aspecto do lodo flotado em células FAD. Carbonífera Metropolitana S.A. (SC). ....	13
Figura 3.7 Estação de tratamento de DAM (250 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> ) instalada na carbonífera Cooperminas (SC).....	13
Figura 3.8 Solubilidade de hidróxidos metálicos (BANDEIRA <i>et al</i> , 2004).....	18
Figura 3.9 Estágios dos mecanismos envolvidos na agregação de partículas por floculação. ....	21
Figura 3.10 Ascensão de microbolhas em meio aquoso e imagem digital de microbolhas medidas com o LTM-BSizer (RODRIGUES e RUBIO, 2007). ....	24
Figura 3.11 Fenômenos de colisão, adesão, nucleação e captura de partículas e agregados por microbolhas. (RODRIGUES e RUBIO, 2007).....	26
Figura 3.12 Estimativa de distribuição mundial para as principais atividades consumidoras de água (UNESCO, 2003).....	28
Figura 3.13 Eventos na evolução do saneamento e reúso de água (ASANO e LEVINE, 1996) .....	33
Figura 3.14 Ciclo hidrológico e reúso de água (ASANO e LEVINE, 1996).....	34
Figura 3.15 Reúso indireto não planejado da água (RODRIGUES, 2005).....	36
Figura 3.16 Reúso direto planejado da água (RODRIGUES, 2005) .....	36
Figura 4.1 Boca de mina SS-16 no município de Criciúma-SC.....	63
Figura 4.2 Unidade de floculação hidráulica em linha (FS – Floclador Serpentinado), usada como condicionador do RGF <sup>®</sup> .....	67

Figura 4.3. RGF <sup>®</sup> - Reator Gerador de Flocos, com detalhes na Tabela 4.3 .....	68
Figura 4.4 Características construtivas (a) e imagem da célula FADAT (b) utilizada neste estudo. ....	69
Figura 4.5 Estação piloto de tratamento de DAM-SS16-Criciúma/SC (a); Tanques de neutralização/precipitação dos íons metálicos e íons sulfato (b); Instrumentação para controle de vazão e pressão (c); Detalhe da célula FADAT (d).....	70
Figura 4.6 Vazão do córrego de DAM-SS16 na comunidade São Simão-Criciúma/SC. ....	71
Figura 4.7 Estação piloto projetada para o tratamento de DAM-SS16-Criciúma/SC (Processo NF-FADAT) .....	72
Figura 5.1 Curva de titulação (concentração de cal versus pH) da DAM-SS16 utilizando cal calcária hidratada (Qualical). ....	79
Figura 5.2 Tratamento da DAM-SS16 pelo processo NF-FADAT – Remoção de Fe a pH 7,0±0,5. Dados de concentração inicial, final e limite de emissão de Fe. Condições: [Flonex 9045] = 5 mgL <sup>-1</sup> , [ácido oléico] = 15 mgL <sup>-1</sup> .....	82
Figura 5.3 Tratamento da DAM-SS16 pelo processo NF-FADAT – Remoção de Mn a pH 7,0±0,5. Dados de concentração inicial, final e limite de emissão de Mn. Condições: [Flonex 9045] = 5 mgL <sup>-1</sup> , [ácido oléico] = 15 mgL <sup>-1</sup> .....	82
Figura 5.4 Tratamento da DAM-SS16 pelo processo NF-FADAT – Remoção de Al a pH 7,0±0,5. Dados de concentração inicial, final e limite de emissão de Al. Condições: [Flonex 9045] = 5 mgL <sup>-1</sup> , [ácido oléico] = 15 mgL <sup>-1</sup> .....	83
Figura 5.5 Tratamento da DAM-SS16 pelo processo NF-FADAT – Remoção de Fe a pH 9,0±0,5. Dados de concentração inicial, final e limite de emissão de Fe. Condições: [Flonex 9045] = 5 mgL <sup>-1</sup> , [ácido oléico] = 15 mgL <sup>-1</sup> .....	86
Figura 5.6 Tratamento da DAM-SS16 pelo processo NF-FADAT – Remoção de Mn a pH 9,0±0,5. Dados de concentração inicial, final e limite de emissão de Mn. Condições: [Flonex 9045] = 5 mgL <sup>-1</sup> , [ácido oléico] = 15 mgL <sup>-1</sup> .....	87
Figura 5.7 Tratamento da DAM-SS16 pelo processo NF-FADAT – Remoção Al a pH 9,0±0,5. Dados de concentração inicial, final e limite de emissão de Al. Condições: [Flonex 9045] = 5 mgL <sup>-1</sup> , [ácido oléico] = 15 mgL <sup>-1</sup> .....	87
Figura 5.8 Tratamento da DAM-SS16 pelo processo NF-FADAT – Remoção de íons Fe a pH 12,0±0,5. Dados de concentração inicial, final e limite de emissão de Fe. Condições: [Qemifloc 1020] = 5 mgL <sup>-1</sup> , [ácido oléico] = 30 mgL <sup>-1</sup> , [PAC TE 1018] = 1 mL <sup>-1</sup> , [Alupan K] = 0,5 mL <sup>-1</sup> . ....	89

Figura 5.9 Tratamento da DAM-SS16 pelo processo NF-FADAT – Remoção de íons Mn a pH 12,0±0,5. Dados de concentração inicial, final e limite de emissão de Mn. Condições: [Qemifloc 1020] = 5 mgL <sup>-1</sup> , [ácido oléico] = 30 mgL <sup>-1</sup> , [PAC TE 1018] = 1 mL <sup>-1</sup> , [Alupan K] = 0,5 mL <sup>-1</sup> .....	89
Figura 5.10 Tratamento da DAM-SS16 pelo processo NF-FADAT – Remoção de íons Al a pH 12,0±0,5. Dados de concentração inicial, final e limite de emissão de Al. Condições: [Qemifloc 1020] = 5 mgL <sup>-1</sup> , [ácido oléico] = 30 mgL <sup>-1</sup> , [PAC TE 1018] = 1 mL <sup>-1</sup> , [Alupan K] = 0,5 mL <sup>-1</sup> .....	90
Figura 5.11 Tratamento da DAM-SS16 pelo processo NF-FADAT – Remoção de íons SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> a pH 12,0±0,5. Dados de concentração inicial e final de SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> . Condições: [Qemifloc 1020] = 5 mgL <sup>-1</sup> , [ácido oléico] = 30 mgL <sup>-1</sup> , [PAC TE 1018] = 1 mL <sup>-1</sup> , [Alupan K] = 0,5 mL <sup>-1</sup> .....	90

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Parâmetros operacionais comparativos em bacias e em espessadores comerciais no tratamento de DAM.....	14
Tabela 3.2. Características hidráulicas da célula FADAT (adaptado de CARISSIMI, 2007). .....	15
Tabela 3.3 Recentes aplicações não-convencionais de FAD no Brasil (Adaptado de RUBIO <i>et al.</i> , 2007a). .....	23
Tabela 3.4 Distribuição da água doce no planeta .....	27
Tabela 3.5 Desenvolvimento histórico do reúso de água em diferentes locais do mundo. .	31
Tabela 3.6 Possíveis constituintes da água de reúso.....	38
Tabela 3.7 Tipos de reúso e aplicações (adaptado de METCALF & EDDY, 2006).....	39
Tabela 3.8 Classes de água de reúso pela NBR-13.969 e respectivos padrões de qualidade .....	44
Tabela 3.9 Limite de parâmetros para emissão de efluentes em corpos d'água de acordo com a Resolução N° 357 do CONAMA. ....	45
Tabela 3.10 Opções de reúso apresentadas pela Resolução N° 54 do CNRH e suas possíveis aplicações. ....	46
Tabela 3.11 Parâmetros característicos para água de reúso (adaptado de ANA, 2005). ....	47
Tabela 3.12 Padrões de qualidade propostos pela SABESP para a água de reúso.....	48
Tabela 3.13 Qualidade microbiológica e tratamento requerido para o reúso de efluentes domésticos na agricultura conforme a WHO . ....	50
Tabela 3.14 Valores recomendados pela WHO para o monitoramento microbiológico para o uso de água residuária e excreta na agricultura e aquíicultura.....	51
Tabela 3.15 Diretrizes para reúso de água em diversos usos segundo a EPA. ....	53
Tabela 3.16 Limites recomendados pela EPA para constituintes na água de reúso para irrigação.....	55
Tabela 3.17 Diretrizes para reúso urbano irrestrito em diversos estados dos EUA. ....	56
Tabela 3.18 Parâmetros de qualidade da água de reúso para fins urbanos no Japão.....	57
Tabela 3.19 Comparação dos critérios de qualidade estabelecidos por diferentes normas para reúso urbano na Espanha. ....	58
Tabela 3.20 Critério de qualidade do efluente tratado para diversas aplicações, estabelecido pelo MMA espanhol.....	59
Tabela 3.21 Padrões para água de reúso na irrigação agrícola na Tunísia.....	60

Tabela 3.22 Parâmetros de qualidade para reúso de água na irrigação irrestrita e descarga em corpos d'água de Israel. ....	62
Tabela 4.1 Características químicas e físico-químicas da DAM bruta. ....	64
Tabela 4.2 Análises complementares de parâmetros inorgânicos na DAM Bruta. ....	65
Tabela 4.3 Parâmetros de construção e operacionais dos flocladores hidráulicos usados na etapa de geração de flocos .....	68
Tabela 4.4 Parâmetros hidráulicos da célula FADAT – Flotação por Ar Dissolvido de Alta Taxa .....	69
Tabela 4.5 Medidas de preservação de amostras adotadas no estudo. ....	75
Tabela 4.6 Metodologias aplicadas nas análises de contaminações orgânicas e biológicas da DAM-SS16.....	76
Tabela 5.1 Características físico-químicas das amostras DAM-SS16 tratadas a pH 7 pelo processo NF-FADAT.....	80
Tabela 5.2 Características físico-químicas da água tratada pelo processo NF-FADAT a pH 7 em função do tempo de ensaio em uma batelada (29/11/2007).....	81
Tabela 5.3 Características químicas e físico-químicas das amostras de DAM-SS16 tratadas a pH 9, pelo processo NF-FADAT. ....	84
Tabela 5.4 Características químicas e físico-químicas das amostras de DAM-SS16 tratadas pelo processo NF-FADAT a pH 9, em função do tempo de ensaio. ....	85
Tabela 5.5. Eficiência de remoção e concentração residual de íons metálicos (Mn, Al e Fe) e íons sulfato pelo processo NF-FADAT em pH 12. Concentrações iniciais desses elementos são descritos na Tabela 4.1. ....	88
Tabela 5.6 Tratamento da DAM-SS16 - média dos parâmetros analisados nas amostras brutas e tratadas a pH 7, 9 e 12, pelo processo NF-FADAT.....	92
Tabela 5.7 Eficiência de processos de remoção de íons sulfato de DAM. ....	93
Tabela 5.8 Qualidade da água bruta e tratada pelo processo NF-FADAT a pH 9 quanto a contaminantes orgânicos e biológicos.....	94
Tabela 5.9 Comparação entre valores médios de parâmetros medidos na DAM-SS16 tratada pelo processo NF-FADAT a pH 9 e padrões de qualidade para reúso da água sugeridos por diferentes locais e organizações.....	95
Tabela 5.10 Análise da concentração de sólidos do lodo flotado no tratamento da DAM-SS16 a pH 12, pelo processo NF-FADAT. ....	98
Tabela 5.11 Análise da concentração e teor de sólidos do lodo flotado no tratamento da DAM-SS16 a pH 9, pelo processo NF-FADAT.....	99

Tabela 5.12 Estimativa de custo com reagentes para o tratamento da DAM-SS16 a pH 7 e 9.....	100
Tabela 5.13 Estimativa de custo com reagentes para o tratamento a pH 12 (remoção de metais pesados e íons sulfato) de DAM-SS16 com Panfloc TE 1018 e Alupan.....	101
Tabela 5.14 Custos estimados para o tratamento da DAM SS16 por NF-FADAT.....	101

## LISTA DE ABREVIACÕES

ANA – Agência Nacional de Águas  
ABS – Alquil Benzeno Sulfonato  
BCMF – Bomba Centrífuga Multifase  
CASAN – Companhia Catarinense de Águas e Saneamento  
CCME – Canadian Council of Minister of the Environment  
CESR – *Cost Effective Sulphate Removal*  
CIRRA – Centro Internacional de Referência em Reúso de Água  
CNUMAD – Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento  
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente  
COT – Carbono Orgânico Total  
CNRH – Conselho Nacional dos Recursos Hídricos  
DAM – Drenagem Ácida de Minas  
DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio  
DQO – Demanda Química de Oxigênio  
EPA – Environmental Protection Agency of United States  
FADAT – Flotação por Ar Dissolvido de Alta Taxa  
FATMA – Fundação do Meio Ambiente de Santa Catarina  
FIESP – Federação das Indústrias do Estado de São Paulo  
FS – Flocculador Serpentinado  
IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração  
MMA – Ministério do Meio Ambiente  
MLIT – Ministério da Terra, Infra-Estrutura, Transporte e Turismo do Japão  
MPF – Ministério Público Federal  
NMP – Número Mais Provável  
NUPEA – Núcleo de Pesquisas Ambientais  
ONU – Organização das Nações Unidas  
PERH – Plano Estadual de Recursos Hídricos  
PME – Plano de Mobilização Energética  
PNCDA – Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água  
PVC – Cloreto de Polivinila  
RGF<sup>®</sup> – Reator Gerador de Flocos  
SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

SindusCon-SP – Sindicato da Indústria da Construção do Estado de São Paulo

SDT – Sólidos Dissolvidos Totais

SST – Sólidos Suspensos Totais

TAC – Termo de Ajustamento de Conduta

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense

UFM – Unidade Formadora de Colônias

## RESUMO

A Drenagem Ácida de Minas (DAM) é um dos maiores problemas ambientais que enfrenta a mineração e extração de sulfetos metálicos e carvão mineral a nível mundial. Essas águas, oriundas da oxidação de minerais sulfetados presentes na matéria inorgânica (principalmente pirita), contêm altos teores de íons sulfato, metais pesados e acidez. A Região Carbonífera de Criciúma/SC, por exemplo, encontra-se atingida pelas drenagens ácidas e enfrenta problemas de escassez e poluição dos seus recursos hídricos e do solo. O presente trabalho tem por objetivo analisar as alternativas de tratamento ativo de DAM's no estado de Santa Catarina, em especial a flotação como processo de separação sólido-líquido dos precipitados gerados na neutralização e floculação. Ainda, o estudo visa apresentar e discutir os critérios de qualidade da água sugeridos no Brasil e aqueles exigidos pelos principais países que adotam o reúso. O trabalho compara estes critérios às características de uma DAM tratada pelo processo NF-FADAT (neutralização, floculação e flotação por ar dissolvido de alta taxa), apontando as possibilidades de reúso para a água tratada, de acordo com a legislação vigente. Os estudos em escala piloto ( $1 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ ) foram realizados com um efluente ácido ( $\text{pH} = 3,0 \pm 0,5$ ) de uma mina extinta (vazão de  $30\text{-}200 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ ), a pH's 7 e 9, na estação de tratamento de efluentes SS-16 (São-Simão em Criciúma), para remoção de metais (Fe, Al e Mn) na forma de hidróxidos. Foram realizados ainda estudos em pH 12, como alternativa para precipitação e remoção de íons sulfato ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) na forma de etringita ( $3\text{CaO} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ ). As concentrações finais médias dos metais Fe, Mn e Al no tratamento a pH 9 foram  $0,2$ ,  $0,7$  e  $2,9 \text{ mgL}^{-1}$ , respectivamente. Estes valores atendem a padrões como os da EPA (agência de proteção ambiental dos Estados Unidos) para irrigação por um período de até 20 anos, mas no Brasil ainda não existe legislação a respeito. O custo operacional (aproximado) do tratamento a pH 7 e 9 foi bastante semelhante, sendo, respectivamente,  $\text{R}\$ \text{m}^{-3} 0,86$  e  $0,88$ . Estes valores são muito vantajosos quando comparados à tarifa cobrada pela CASAN - Companhia Catarinense de Águas e Saneamento para a água tratada, que no caso de SC custa  $\text{R}\$ \text{m}^{-3} 5,10$ . O tratamento a pH 12 apresentou uma elevada eficiência, com concentração final de  $\text{SO}_4^{-2}$  em torno de  $150 \text{ mgL}^{-1}$ , valor que atende aos padrões de potabilidade da água, dados pela Portaria MS 518/2004. O custo do tratamento a pH 12 ( $\text{R}\$ \text{m}^{-3} 6,40$ ) não considera o possível reaproveitamento da etringita gerada no processo como, por exemplo, em indústrias cerâmicas, o que poderia reduzir esse custo. Devido a uma maior eficiência

na remoção de Mn em relação ao pH 7, a melhor relação custo/benefício foi obtida com o tratamento a pH 9. Neste pH, a qualidade final da DAM após o tratamento atende à padrões para reúso estabelecidos em diretrizes aplicadas no Brasil, como a NBR 13.969 e por órgãos como a Agência Nacional das Águas (ANA), a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) e *Environmental Protection Agency of United States* (EPA). Os resultados comprovaram a eficiência da técnica estudada para o tratamento futuro da DAM-SS16, pois a qualidade da água tratada apresenta bom potencial para reúso na comunidade local ou municipal em diversos fins não-potáveis, urbanos e industriais, como irrigação (de jardins, canteiros de ruas e avenidas, parques e praças, pomares e pastagens), chafarizes e espelhos d'água, lavagem de pisos e calçadas, descarga em sanitários ou construção civil (preparação de concreto, abatimento de poeiras). Entretanto, a prática do reúso é dificultada no Brasil em função de que ainda não existe uma legislação específica visando regular o setor, proteger o meio ambiente e a saúde da população.

**Palavras chave:** Reúso de água, Recursos hídricos, Flotação, DAM.

## ABSTRACT

Acid Mine Drainage (AMD) is one of the biggest environmental problems faced by metallic sulfides and coal mining and extraction industries worldwide. These water streams come from inorganic matter sulfide minerals (especially pyrite) oxidation and are rich in sulfate ions, heavy metals and acidity. The coalfield of Criciúma/SC, for example, suffers the effects of acid drainage, facing problems like water and soil scarcity and pollution. This work aims to analyze the AMD active treatment alternatives in Santa Catarina, especially the use of flotation as a solid-liquid separation process for the precipitated solids produced during neutralization and flocculation. This study also presents and discusses the water quality criteria suggested in Brazil and those required by the main countries worldwide that adopted water reuse. This work compares these criteria to the characteristics of an AMD treated by the NF-FADAT process (neutralization, flocculation and high-rate dissolved air flotation), pointing the possibilities of the treated water reuse, according to the current laws. The pilot studies ( $1 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ ) were carried out with an acid effluent ( $\text{pH } 3.0 \pm 0.5$ ) from an extinct mine (flow rate  $30\text{-}200 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ ), at pH 7 and 9, at the effluent treatment station SS-16 (São Simão at Criciúma), to remove metals (Fe, Al and Mn) as hydroxides. Studies at pH 12 were also carried out, considering it as an alternative to sulphate ions ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) precipitation and removal, forming etringite ( $3\text{CaO}\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot 31\text{H}_2\text{O}$ ). The Fe, Mn and Al final average concentrations at pH 9 were  $0.2$ ,  $0.7$  and  $2.9 \text{ mgL}^{-1}$ , respectively. These results are in agreement with standards such as the EPA's (United States Environmental Protection Agency) for irrigation for a 20 years period, but in Brazil there is no such kind of law. The treatment operational costs (approximately), at pH 7 and 9, were very similar, respectively  $\text{R}\$ \text{m}^{-3}$   $0.86$  and  $0.88$ . These results are advantageous when compared to the CASAN's (Company for Water and Sanitation of SC) fee for water treatment, which is  $\text{R}\$ \text{m}^{-3}$   $5.10$ . Treatment at pH 12 presented a high efficiency, with a  $\text{SO}_4^{2-}$  final concentration around  $150 \text{ mgL}^{-1}$ , which meets drinking water standards given by the Health Ministry's Order 518/2004. The cost of such treatment ( $\text{R}\$ \text{m}^{-3}$   $6.40$ ) doesn't take into account the possibility of reusing the etringite generated during the process, such as in ceramic industries, which could lead to its reduction. The best cost-benefit relation was reached with the treatment at pH 9 due to a higher efficiency in removing Mn if compared to pH 7. At pH 9, the AMD final quality after treatment meets the standards for reuse established in Brazil, as the NBR 13.969

and the ones from organizations such as ANA, SABESP and EPA. Results confirmed the efficiency of the studied method for future treatment of the AMD-SS16, because the treated water presented a high potential for reuse at local or municipal community for several urban and industrial, non-drinking uses, such as irrigation (of gardens, parks and squares, orchards and pastures), fountains, washing floors and sidewalks, disposal flush, or civil construction (concrete preparation, dust abatement). However, the practice of water reuse is not growing in Brazil, because there is no specific legislation regulating the sector to protect the environment and people's health.

**Keywords:** Water reuse, Water resources, Flotation, Acid Mining Drainage.

## 1 INTRODUÇÃO

A DAM (Drenagem Ácida de Minas) representa um dos mais severos problemas ambientais da indústria da mineração em nível mundial, ocasionando a poluição de águas (superficiais e subterrâneas) e solos. Este efluente é gerado pela oxidação da pirita e formação de ácido sulfúrico em reações cíclicas, produzindo elevadas concentrações de sulfato e íons metálicos.

Segundo o Plano Nacional dos Recursos Hídricos (2006), uma das principais atividades que alteram a qualidade das águas do Brasil é a mineração, que representa um problema disseminado em boa parte do país e tem, entre outras, situações críticas em Santa Catarina (carvão na região de Criciúma), gerando elevadas cargas inorgânicas provenientes da extração e do beneficiamento do carvão mineral. Atualmente, um volume de água da ordem de 800 L/s, demandado por mais de 200.000 habitantes da região de Criciúma, é captado em trechos de rios à montante, ainda não poluídos. Segundo GALATTO *et al* (2007), na bacia Carbonífera Catarinense, localizada no sul do estado, existem aproximadamente 5.000 hectares de áreas degradadas pela mineração de carvão e cerca de 2/3 dos cursos d'água da região estão comprometidos pelas DAMs.

Dessa forma são necessárias, com urgência, tecnologias para o tratamento das drenagens ácidas geradas pela mineração de carvão, visando o reciclo-reúso dessas águas tratadas em atividades de agricultura, industriais e/ou urbanas. Diversas ações estão sendo implementadas no controle das DAMs frescas (produzidas) na maioria das empresas como forma de minimizar danos ambientais e contribuir para o gerenciamento e reúso da água na região.

O presente trabalho insere-se dentro deste contexto e apresenta alternativas de tratamento ativo de DAM's no estado de Santa Catarina, em especial a flotação como processo de separação sólido-líquido dos precipitados gerados na neutralização e floculação. Também é apresentada uma revisão dos critérios de qualidade da água exigidos nacionalmente e pelos principais países que adotam o reúso. Estes parâmetros são comparados com a qualidade da água residual de uma mina de carvão extinta (SS-16 em Criciúma-SC), tratada pelo processo NF-FADAT (neutralização, floculação e flotação por ar dissolvido de alta taxa), indicando as possibilidades de reúso desse recurso básico.

A boca de mina abandonada SS-16 é um local de fim de rede de distribuição de água potável da CASAN (Companhia Catarinense de Águas e Saneamento) e há escassez deste recurso nos meses de verão. Atualmente, há cerca de 10 famílias que habitam nas áreas adjacentes ao córrego de águas ácidas, e com o futuro, esse número tende a crescer, agravando ainda mais essa situação. Este córrego desemboca em um afluente do rio Ronco D'água e daí segue para a Bacia do Rio Urussanga, sem qualquer tratamento ou utilização.

Os parâmetros utilizados para fins de comparação neste trabalho são, na maioria das vezes, aplicados a águas de reúso resultantes do tratamento de esgotos sanitários, devido à ausência de critérios específicos para águas de reúso provenientes de atividades industriais. É importante salientar, porém, que o efluente aqui analisado (DAM), apresenta uma contaminação muito inferior aos esgotos sanitários, principalmente no que diz respeito a microrganismos, a qual é praticamente inexistente na DAM estudada.

Por muito tempo acreditou-se que a água era um bem inesgotável. Atualmente, já é reconhecido que a água é um bem finito e em processo de escassez, devido não apenas à quantidade de água disponível mas, principalmente, pelo decréscimo de sua qualidade.

Insumo básico de quase todos os processos industriais, a água é vital também para a produção de alimentos. O crescimento da população vem demandando continuamente água em quantidade e qualidade compatíveis. Muitos mananciais utilizados estão cada vez mais poluídos e deteriorados, seja pela falta de controle ou pela falta de investimentos em coleta, tratamento e disposição final de efluentes líquidos. Isto implica em altos custos e tecnologias mais avançadas para tornar a água novamente própria para utilização, induzindo-se a priorização do abastecimento para consumo humano.

Em nível mundial, segundo relatório da UNESCO (2003), estima-se que se não houver mudanças significativas até 2050, quando 9,3 bilhões de pessoas devem habitar a Terra, entre 2 e 7 bilhões de pessoas não terão acesso à água de qualidade.

O Brasil é um país privilegiado por possuir em seu território aproximadamente 16% da água doce e as mais extensas bacias hidrográficas do planeta (TUNDISI, 2003). Este fato não afasta o país da escassez pois, devido à má distribuição, existe grande disponibilidade de água no norte do Brasil, onde há pouca densidade populacional, e torna-se escassa em regiões como sul e sudeste, nos grandes centros populacionais e industriais.

Com o aumento da demanda de água e o decréscimo da sua qualidade devido, principalmente, ao crescimento populacional e desenvolvimento industrial, a busca por fontes alternativas desse recurso tem se tornado imprescindível. O reúso de águas para usos não potáveis tem se mostrado uma opção economicamente viável e com significativos resultados na conservação deste recurso, liberando as águas de melhor qualidade para os fins mais nobres.

Dentro deste contexto, uma estação de tratamento e reúso da DAM-SS16 poderia servir como exemplo da aplicação de tecnologia nacional existente, visando aumentar a disponibilidade de recursos hídricos na vizinhança local, para diminuir a escassez de água com a qual sofre esta comunidade, especialmente no verão. Esse reúso para fins não potáveis reduziria ainda a demanda sobre os mananciais devido à substituição da água potável por uma água de qualidade menos nobre. Por outro lado, o presente estudo visa auxiliar na recuperação das áreas degradadas, reduzindo a poluição ambiental causada pelas DAM's. Espera-se que os resultados desta pesquisa contribuam de maneira significativa para atingir tal objetivo, em conformidade com o estabelecido pela Resolução N° 54 do Conselho Nacional dos Recursos Hídricos, que estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água no Brasil.

## 2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é analisar as alternativas de tratamento ativo de DAMs no estado de Santa Catarina, em especial a flotação como processo de separação sólido-líquido dos precipitados ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Mn}(\text{OH})_2$  e  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , principalmente) gerados na neutralização e floculação. Ainda, o estudo visa apresentar os critérios de qualidade da água adotados no Brasil e exigidos pelos principais países que adotam o reúso, comparando esses critérios com a qualidade final da DAM de uma mina de carvão extinta, tratada pelo método NF-FADAT – Neutralização, Floculação e Flotação por Ar Dissolvido de Alta Taxa.

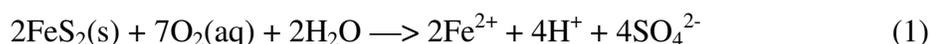
Os objetivos específicos são:

- Determinar a qualidade da água tratada nos pHs 7, 9 e 12 com o sistema NF-FADAT, em particular, a remoção dos íons  $\text{Mn}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{Al}^{+3}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ , via co-precipitação com policloreto de alumínio;
- Determinar as possibilidades de reúso que se aplicam a esta água tratada, de acordo com a legislação vigente e estudos recentes;
- Contribuir para a definição de padrões nacionais de qualidade da água de reúso e, assim, estimular esta prática no País, além da preservação ambiental.

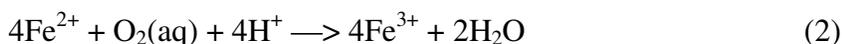
### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS (DAM)

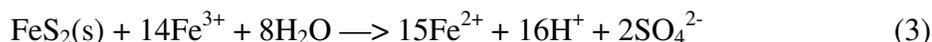
A Drenagem Ácida de Minas (DAM) ocorre como resultado da oxidação natural de minerais sulfetados, contidos em rochas, quando essas são expostas a ação combinada de água e oxigênio da atmosfera. Essas reações químicas são autocatalíticas e sua velocidade pode ser acelerada pela atividade bacteriana, principalmente pelas espécies *Thiobacillus ferrooxidans* e *Leptospirillum ferrooxidans* (RUBIO, 1998a, 1998b). Possuem pH ácido e elevadas concentrações de sulfato e íons de metais pesados como ferro, alumínio e manganês. A presença desses elementos na água impossibilita a sobrevivência e desenvolvimento de espécies, tais como peixes e outros organismos elementares dos ecossistemas aquáticos. Essa contaminação é comum em minerações de sulfetos polimetálicos, carvão e linhito. As reações a seguir apresentam o mecanismo de oxidação da pirita ( $\text{FeS}_2$ ), principal mineral responsável pela DAM:



A reação (1) representa a formação da DAM pela via direta. Essa reação produz acidez, e se o potencial de oxidação é mantido, a oxidação do  $\text{Fe}^{+2}$  para  $\text{Fe}^{+3}$  pelo oxigênio também vai ocorrer, consumindo parte da acidez produzida.



O  $\text{Fe}^{3+}$  gerado na reação (2) oxida a pirita (via indireta).



O  $\text{Fe}^{+2}$  resultante da reação (3) poderá ser oxidado a  $\text{Fe}^{+3}$  pela reação (2) e estará novamente disponível para oxidar mais pirita (autocatálise).

As fontes comuns de DAM são minas subterrâneas ou a céu aberto, bacias de decantação, pilhas de estéril e rejeitos de processamento mineral (principalmente os que possuem pirita), os quais não possuem valor comercial sob as condições econômicas correntes. Essas fontes podem permanecer ativas por décadas ou séculos após o fechamento da mina. No passado e em muitas minerações em operação, o manuseio impróprio desses rejeitos e rochas consideradas estéril, resultou na produção de DAM que tem contaminado

os solos e águas (superficiais e subterrâneas) em extensas áreas com ácido sulfúrico e metais tóxicos.

### 3.1.1 A problemática da DAM

Segundo o Plano Nacional dos Recursos Hídricos (2006), uma das principais fontes que alteram a qualidade das águas do Brasil é a mineração, que representa um problema disseminado em boa parte do país e apresenta, entre outras, situações críticas em Santa Catarina (carvão na região de Criciúma), gerando elevadas cargas inorgânicas provenientes da extração e do beneficiamento dos minérios.

Atualmente, o volume de água (da ordem de 800 L/s) demandado por mais de 200.000 habitantes da região de Criciúma, é captado em trechos de rios à montante, ainda não poluídos. Segundo GALATTO *et al* (2007), na bacia Carbonífera Catarinense, localizada no sul do estado, existem aproximadamente 5.000 hectares de áreas degradadas pela mineração de carvão e cerca de 2/3 dos cursos d'água da região estão comprometidos pela drenagem ácida. Durante quase um século, a abertura de minas subterrâneas e a céu aberto, alteraram o relevo com a formação de pilhas de rejeitos de mineração e causaram a contaminação química do meio ambiente (FO, 2001). A Figura 3.1 mostra uma imagem de satélite onde pode ser vista a DAM na região carbonífera catarinense (Mina Esperança - Criciúma), de coloração laranja-avermelhada, acumulada ao lado de pilhas de rejeitos.



Figura 3.1 DAM na região carbonífera de SC. Mina Esperança, Criciúma (Google Earth<sup>®</sup>, 2008).

Conforme o Diagnóstico dos Recursos Hídricos Catarinenses (2007), elaborado para a construção do Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH/SC), no que se refere à qualidade das águas dos rios catarinenses, a situação é preocupante, pois mesmo em anos considerados normais, várias regiões do Estado apresentam cursos de água com a qualidade comprometida, principalmente no Sul (causado pela mineração) e no Oeste (causado pelos rejeitos da criação de suínos).

As bacias hidrográficas dos rios Araranguá, Tubarão e Urussanga, que compõem a Região Carbonífera de Santa Catarina, situada no sul do estado (Figura 3.2), tiveram seus recursos naturais seriamente afetados pelas atividades relacionadas à exploração, beneficiamento e uso do carvão mineral (UNESC, 1997).

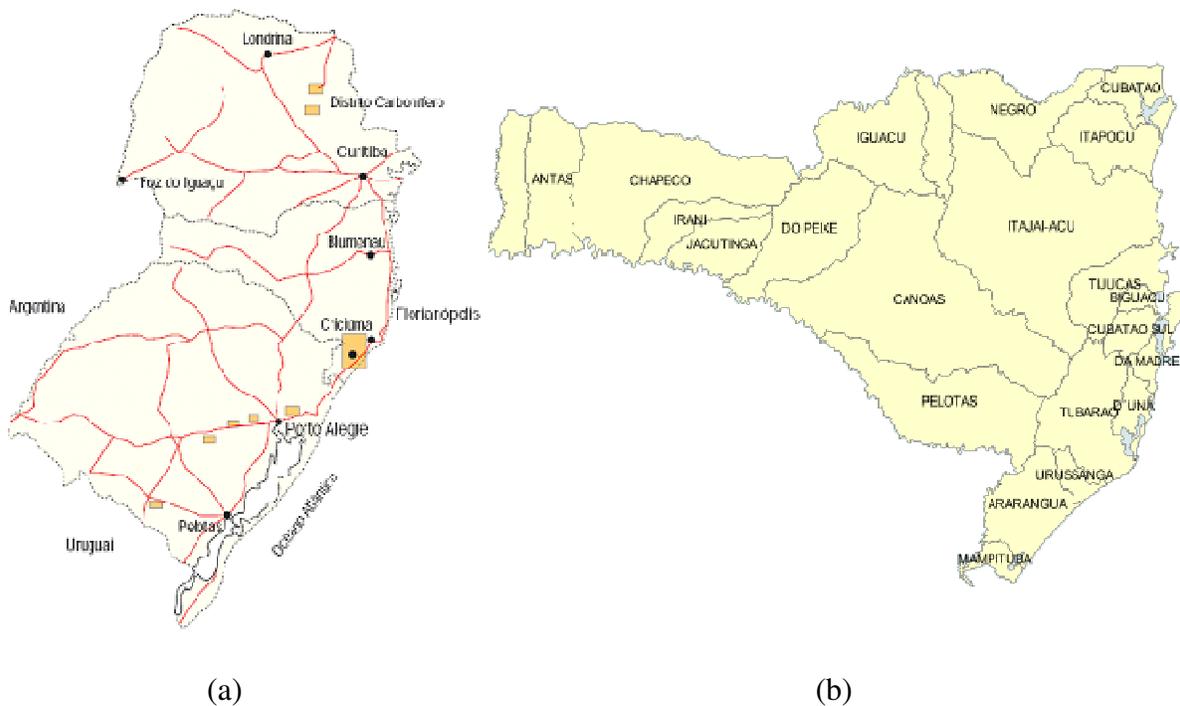


Figura 3.2 Localização dos distritos carboníferos da região sul do Brasil (a) e das bacias hidrográficas de Santa Catarina (b) (IBRAM /ANA, 2006; SIRHESC, 2009)

Na década de 1970, o Governo Federal implantou o Plano de Mobilização Energética (PME), que visava elevar significativamente a produção de carvão, com a finalidade de enfrentar a crise gerada pelo forte aumento no preço do petróleo no mercado internacional. Na época, não houve a devida preocupação com o fato de que, junto com o aumento da produção e beneficiamento do carvão ocorreria uma forte elevação no volume de efluentes ácidos gerados.

Por conseqüência, em 25 de setembro de 1980, por meio do Decreto N° 85.206, a região carbonífera de Santa Catarina foi considerada a 14ª Área Crítica Nacional para Efeito de Controle da Poluição e Qualidade Ambiental. Nessa ocasião, todas as bacias hidrográficas da região carbonífera já estavam comprometidas. Em 6 de julho de 1982, a Portaria Interministerial n° 917, determinou que as empresas envolvidas na lavra e beneficiamento de carvão deveriam apresentar projetos executivos para a construção de depósitos de rejeitos controlados e operação das usinas de beneficiamento em circuito fechado, com posterior tratamento dos efluentes excedentes. Entretanto, os procedimentos

técnicos propostos nos projetos não foram integralmente implantados pelas empresas, não ocorrendo melhoria substancial à qualidade das drenagens, que até hoje continuam trazendo problemas à região. (IBRAM /ANA, 2006).

Ressalta-se que o fato da mineração ter diminuído drasticamente suas atividades na região sul catarinense não implica em uma relação proporcional à diminuição da poluição causada por esta atividade. Os danos causados até então, pilhas de rejeito dispostas irregularmente e drenagens ácidas de minas subterrâneas, continuam contribuindo para a degradação dos recursos naturais por tempo indeterminado.

O Ministério Público Federal (MPF) ajuizou uma ação civil pública que, dentre outros pedidos, visava à reconstituição do meio ambiente afetado pela mineração e não continuidade do processo de degradação ambiental. Em 2000 foi publicada a sentença condenando as empresas carboníferas, a União e o Estado de Santa Catarina por omissão fiscalizatória e determinando a recuperação de áreas degradadas. Em Criciúma, os Ministérios Públicos do Estado e Federal acompanham o cumprimento do Termo de Ajuste de Conduta (TAC), assinado em 2005 com a Fundação do Meio Ambiente (FATMA) e mais 12 empresas que atuam na região carbonífera do sul do estado. O TAC concedeu prazo para que as mineradoras cumpram a legislação, executando obras de controle e recuperação do meio ambiente.

### 3.1.2 Controle da Drenagem Ácida de Minas

A principal característica que transforma a drenagem ácida de minas em um problema ambiental de grandes proporções é o fato de que os mecanismos químicos e bacterianos responsáveis por sua formação são auto-catalíticos. Uma vez desenvolvida a DAM, o problema tende a piorar e é extremamente difícil controlá-lo. Isto determina as estratégias que são apropriadas para o seu controle.

Uma vez que o estéril pirítico começou a liberar DAM em quantidades apreciáveis, como é o caso da Região Carbonífera de Santa Catarina, tudo que pode ser feito é coletar e tratar a drenagem por neutralização de ácidos e remoção de metais, além de separar o rejeito do meio ambiente para evitar a continuação do processo. Dado os grandes volumes de rejeitos envolvidos, e o fato de que a DAM pode ser liberada por décadas e até mesmo

séculos, as ações mitigatórias são extremamente caras, tanto em termos de custo capital como custos operacionais. Medidas preventivas são preferidas, quando o novo rejeito ainda está sendo gerado (KONTOPOULOS, 1998).

Os métodos para o controle de DAM podem ser classificados em 3 categorias:

- a) *Métodos primários ou preventivos*, que objetivam a prevenção das reações geradoras de ácidos, evitando o contato dos minerais sulfetados com a água e o oxigênio, eliminando as bactérias responsáveis pela catálise das reações, e controlando outros fatores que influenciam as reações, como o pH, adicionando alcalinidade ao sistema;
- b) *Métodos secundários ou de contenção*, que objetivam controlar a migração da DAM para o meio ambiente com a prevenção do fluxo de água, uso de paredes porosas reativas ou disposição em estruturas de contenção impermeabilizadas;
- c) *Métodos terciários ou de remediação*, que visam coletar e tratar a DAM.

Os métodos de remediação são classificados em sistemas ativos, os quais exigem operação contínua em uma planta de tratamento químico, ou sistemas passivos (drenos anóxicos, *wetlands*, etc.), os quais funcionam sem necessidade de muito controle embora exijam grandes áreas para o tratamento. O foco deste estudo são os métodos ativos de tratamento, especialmente a precipitação seguida de flotação.

### 3.1.3 Métodos ativos de tratamento das águas ácidas da mineração

O tratamento convencional da DAM consiste basicamente na neutralização, precipitação dos metais pesados e separação sólido-líquido dos sólidos formados. Os principais íons metálicos encontrados na DAM são Al, Fe e Mn, além de íons sulfato (MENEZES *et al*, 2004). As técnicas propostas para o tratamento da DAM geralmente incluem combinações de neutralização e precipitação com cal, oxidação com peróxido, osmose reversa, adsorção e troca iônica, sendo que muitas têm se mostrado economicamente inviável ou tecnicamente deficientes. A neutralização demanda um alto consumo de material alcalino para elevar e manter o pH em valores superiores a 6,5,

condição necessária para a remoção dos metais (MATLOCK *et al.*, 2002).

O tratamento ativo de DAM de carvão, em unidades industriais ETE, iniciou em SC em 2003 e a tendência é de aumentar o número dessas instalações em novas unidades de extração e beneficiamento de carvão mineral (RUBIO *et al.*, 2007b). A seguir, uma descrição dos principais exemplos, já em fase de operação no sul do Brasil.

**Processo NF-Sedimentação em Bacias:** Uma unidade de neutralização, floculação e sedimentação dos flocos em bacias foi montada e instalada no tratamento de DAM (Capão da Roça) na cidade de Charqueadas/RS. A planta opera com vazão aproximada de  $30 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$  e possui uma área aproximada de  $80 \text{ m}^2$  de sedimentação, dividida em quatro bacias (Figura 3.3). As bacias são operadas individualmente o que remete uma taxa de aplicação superficial ao processo de  $1,5 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$ , com uma eficiente remoção dos flocos alimentados nas bacias.



Figura 3.3 Bacias de sedimentação de flocos de DAM tratada (NF) e detalhe do sistema de floculação (chicanas de fluxo hidráulico horizontal) – Capão da Roça, COPELMI/RS.

**Processo NF-FAD:** Entre os anos 2003-2004 foi desenvolvido e aplicado um sistema inovador de tratamento de DAM por neutralização, floculação e flotação por ar dissolvido (FAD), constituído por uma unidade ( $5 - 10 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ ) instalada na Carbonífera Metropolitana

S.A. (Siderópolis-SC) (vide Figura 3.4) que utiliza a precipitação e floculação seguida de flotação-FAD (MENEZES *et al.*, 2004).

Neste processo foram identificados e otimizados os principais parâmetros operacionais, químicos, físicos e físico-químicos, bem como as formas de disposição dos produtos (Figura 3.5) a partir de elevadas remoções de poluentes como sólidos dissolvidos, suspensos e íons metálicos, adequando o efluente aos padrões de emissões exigidos pela legislação vigente (MENEZES *et al.*, 2004).



Figura 3.4 Estação de tratamento de DAM da carbonífera Metropolitana (5-10 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup>) - Processo NF-FAD.



Figura 3.5 Aspecto do lodo flotado e da água tratada pelo processo NF-FAD, Carbonífera Metropolitana S.A (SC).

Em 2007 o mesmo processo de tratamento de DAM foi adotado em escala industrial, na mina Esperança (Figura 3.6) da Carbonífera Metropolitana S.A.(SC). A unidade possui uma capacidade para operar com uma vazão de  $250 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$  e o processo inclui a precipitação de hidróxidos metálicos, floculação, hidrofobização superficial dos agregados com coletores (oleato de sódio) e flotação via injeção de microbolhas com diâmetros entre 30 e 100  $\mu\text{m}$  (aproximadamente).



Figura 3.6 (a) Estação de Tratamento de águas ácidas via FAD; (b) Aspecto do lodo flotado em células FAD. Carbonífera Metropolitana S.A. (SC).

**Processo NF-SL:** O tratamento ativo substituindo a flotação pela sedimentação lamelar (SL) foi iniciado em 2006/2007 na empresa COOPERMINAS-SC (Figura 3.7). A planta está instalada e tem capacidade de tratamento de  $250 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ .



Figura 3.7 Estação de tratamento de DAM ( $250 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ ) instalada na carbonífera Cooperminas (SC).

Estudos comparativos entre as alternativas de sedimentação existentes e as vantagens da sedimentação lamelar, em relação às convencionais foram desenvolvidos pela empresa Aquafлот Ltda., (2005) e são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Parâmetros operacionais comparativos em bacias e em espessadores comerciais no tratamento de DAM.

<b>Alternativa</b>	<b>Área de sedimentação (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Taxa de aplicação (mh<sup>-1</sup>)</b>
Bacias de sedimentação	6.000	0,08
Espessador convencional tipo Dorr	491	1,0
Espessador de Lamelas	100	5,0

Estudos piloto de tratamento ativo de DAMs pelo processo NFSL-Neutralização-Floculação e Sedimentação Lamelar, também foram desenvolvidos na região de Criciúma-SC (SS-16 e carbonífera COMIN Ltda.) por SILVA (2009). Embora a qualidade da água tratada seja similar, os estudos mostram que a SL apresenta menores custos com reagentes (agentes coletores) e energia (compressor e sistema de geração de bolhas) do que a NF-FADAT. Atualmente este processo é aplicado nas carboníferas COMIN e Cooperminas, ambas em SC. Entre os problemas operacionais levantados, o percentual de sólidos na corrente de descarga do SL tem sido uma dificuldade enfrentada pelo processo, revelando a necessidade de sistemas de adensamento de lodo. O processo NFSL não se mostrou eficiente no tratamento da DAM-SS16 em pH 12, para remoção de sulfato na forma de etringita, apresentando dificuldades na sedimentação destes flocos.

**Processo NF-FADAT:** Método de tratamento estudado neste trabalho, na estação de tratamento SS-16 (Criciúma/SC), que consiste na neutralização da acidez com cal calcítica hidratada, precipitação dos íons metálicos da solução aquosa e floculação, seguida da separação sólido/líquido por flotação na célula FADAT (flotação por ar dissolvido de alta taxa). A Tabela 3.2 apresenta as características hidráulicas da célula FADAT.

Tabela 3.2. Características hidráulicas da célula FADAT (adaptado de CARISSIMI, 2007).

Vazão, m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	Taxa de aplicação, m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup>	Tempo de residência, s
0,3	3,3	1784
0,6	6,7	890
0,9	10,0	594
1,2	13,3	444

### 3.1.4 Princípios físico-químicos no tratamento de DAM por NF-FADAT

#### 3.1.4.1 Precipitação de metais versus pH

Devido às múltiplas combinações de acidez e de constituintes metálicos presentes, cada drenagem ácida é única e o seu tratamento mais adequado pode variar amplamente de lugar para lugar. Para que se obtenha sucesso no tratamento químico, deve-se considerar os seguintes fatores que influenciam na velocidade de reação e na eficiência de remoção dos metais presentes nas drenagens ácidas: estado de oxidação dos metais; concentração dos metais; e interação entre os metais. O primeiro passo do tratamento consiste em neutralizar a acidez da drenagem com a adição de uma quantidade de álcalis suficiente para elevar o pH e fornecer íons hidroxila (OH<sup>-</sup>) para reagir com os íons metálicos dissolvidos na água. São assim formados hidróxidos metálicos insolúveis que precipitam e a seguir são removidos do efluente. O pH requerido para precipitar a maioria dos metais da água varia no intervalo de 6 a 9; são exceções o hidróxido férrico que precipita em pH ácido, em torno de 3,5, e o hidróxido de alumínio, próximo a 5,5. As reações de precipitação em meio aquoso ocorrem segundo as equações genéricas (1) e (2); onde M representa os íons metálicos em solução.



O precipitado sólido normalmente é uma mistura amorfa de óxidos e hidróxidos e parte da cal que não reagiu. Esse deve ter seu volume reduzido (remoção da água), para ser

disposto em locais adequados e seguros, ou ser utilizado como matéria-prima em outros processos (indústrias cerâmicas) (POSSA e SANTOS, 2003).

#### **a) Precipitação de ferro**

Quando os íons férricos ( $\text{Fe}^{3+}$ ) se formam nas drenagens ácidas, imediatamente, sofrem hidrólise e precipitam da solução, se o pH estiver acima de 3,5, nas formas de hidróxido férrico  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  ou oxi-hidróxido de ferro ( $\text{FeOOH}$ ) ou ainda sulfato básico de ferro ( $\text{FeOHSO}_4$ ) (POSSA e SANTOS, 2003).

Entretanto, antes da formação dos precipitados insolúveis, os íons  $\text{Fe}^{3+}$  sofrem hidrólise parcial com formação de espécies hidrolisadas solúveis. Sob neutralização controlada, essas espécies sofrem polimerização e eventual condensação via perda parcial de suas águas de hidratação, tornando-se insolúveis. Devido à rapidez com que as reações de hidrólise do  $\text{Fe}^{3+}$  ocorrem, os hidróxidos obtidos tendem a ser de natureza amorfa e coloidal, o que traz como consequência a produção de lamas com baixo teor de sólidos (1 a 2%), grandes volumes, baixa velocidade de sedimentação e estabilidade química relativamente baixa, o que as torna fontes potenciais de liberação de metais tóxicos para o meio ambiente, se não forem adequadamente descartadas. O íon ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ), converte-se em hidróxido ferroso em  $\text{pH} > 8,5$  e o precipitado apresenta uma coloração verde-azulada. Na presença de oxigênio, o íon ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) se oxida a íon férrico, ( $\text{Fe}^{3+}$ ), e em  $\text{pH} > 3,5$  forma-se um precipitado laranja-avermelhado de hidróxido férrico. Em drenagens ácidas onde as concentrações de oxigênio dissolvido são reduzidas, o ferro encontra-se predominantemente sob a forma iônica ( $\text{Fe}^{2+}$ ) e deve-se adicionar uma quantidade suficiente de reagente alcalino para elevar valor do pH acima de 8,5 para que ocorra a precipitação do hidróxido ferroso,  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ . Uma alternativa consiste em aerar a polpa previamente e converter os íons  $\text{Fe}^{2+}$  em  $\text{Fe}^{3+}$ . A seguir, alcaliniza-se o meio para ajuste do pH. Dessa forma, com a precipitação de hidróxido férrico ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) em pH final mais baixo, reduz-se o consumo de reagentes. Também a co-precipitação e adsorção que ocorrem entre o  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  e outros íons presentes na drenagem resulta em menor solubilidade posterior dos precipitados metálicos obtidos (POSSA e SANTOS, 2003).

A aeração da polpa após a adição do reagente químico também é considerada uma prática benéfica, aumentando a eficiência do tratamento. Esta é especialmente aplicada quando se utiliza compostos de cálcio (calcário ou cal), que são pouco solúveis. A oxidação do  $\text{Fe}^{2+}$  é favorecida em pH alcalino. O uso da aeração mecanizada, no entanto, pressupõe um custo adicional em equipamentos e em consumo de energia. (POSSA e SANTOS, 2003)

### **b) Precipitação de alumínio**

O hidróxido de alumínio ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) precipita da solução em valores de pH  $>5$  mas se solubiliza novamente em pH  $> 9$ , pois a solubilidade do alumínio em equilíbrio com a fase sólida  $\text{Al}(\text{OH})_3$  depende do pH do meio aquoso. Em pH  $< 4$  há predominância do aquo-complexo  $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ . Quando aumenta o pH e/ou a temperatura, o íon hidratado de alumínio trivalente sofre hidrólise, formando inicialmente o íon  $\text{Al}(\text{OH})(\text{H}_2\text{O})_5^{2+}$  e então diversas espécies hidroxiladas de alumínio solúveis e a forma insolúvel  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . Eventualmente ocorre ainda a presença de hidroxilados poliméricos como  $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{32}^{7+}$ . Entre o pH 5 e 6, os produtos solúveis predominantes são  $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$  e  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ ; entre o pH 5,2 e 8,8, a forma insolúvel  $\text{Al}(\text{OH})_3$  é a dominante, e acima de pH 9, a espécie solúvel  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  prevalece e se torna a única existente acima de pH 10. No intervalo dos valores de pH de 4,7 a 10 os hidroxilados de alumínio poliméricos podem estar presentes e se aglomerar formando grandes flocos que precipitam da solução. Ao precipitarem carregam consigo muitos constituintes indesejáveis presentes na drenagem (POSSA e SANTOS, 2003).

### **c) Precipitação de manganês**

A precipitação do manganês torna-se complexa devido aos seus estados de oxidação. Geralmente o metal precipita em valores de pH variando de 9 a 9,5. Algumas vezes contudo, é necessário elevar o valor do pH a 10,5 para promover sua completa precipitação. Devido à interação entre os metais, a precipitação do ferro em pH 8, removerá uma quantidade considerável do manganês presente por co-precipitação. Esta somente ocorrerá se a concentração de ferro for muito superior à de manganês ( $\text{Fe}/\text{Mn} > 4$ ). Caso seja menor a concentração de ferro, torna-se necessário elevar o valor do pH acima de 9 para possibilitar a remoção de manganês (POSSA e SANTOS, 2003).

A Figura 3.8, a seguir, mostra a solubilidade de vários metais de acordo com a concentração ( $pC = -\log[C]$ , onde C é a concentração do íon metálico) e o pH.

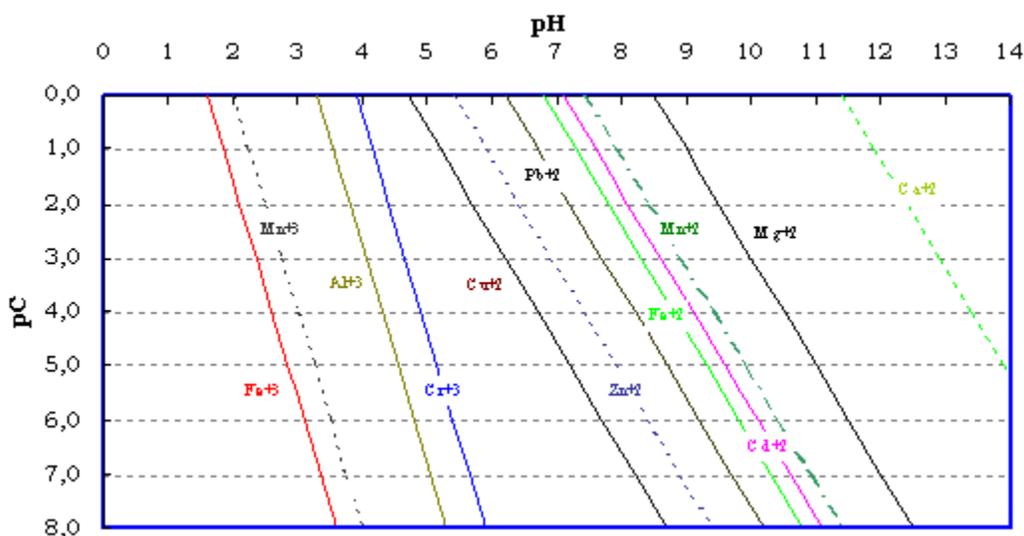
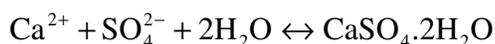


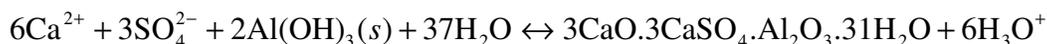
Figura 3.8 Solubilidade de hidróxidos metálicos (BANDEIRA *et al.*, 2004).

#### d) Precipitação de sulfato

A remoção de íons sulfato, em baixas concentrações, é muito difícil e todos os processos tornam-se muito onerosos (RUBIO, 1998a). A precipitação de sulfato pode ocorrer sob a forma de gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) com a adição de cal conforme a seguinte reação:



Mas a precipitação só será eficiente sob a forma de etringita, mineral que se forma na presença dos íons Al, Ca e  $\text{SO}_4^{2-}$ , de acordo com a seguinte equação:



O mineral é estável apenas na faixa de pH entre 11,6 e 12,0, e a sua precipitação remove cálcio e sulfato (INAP,2003; CADORIN *et al.*, 2006).

Segundo CADORIN *et al.* (2006), em pH 12, ocorre precipitação dos íons Fe e Mn como co-precipitados, em conjunto com a formação de etringita ( $3\text{CaO} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ ). Os íons sulfatos são, desta forma, eliminados do efluente

quando ocorre a precipitação de etringita, formada a partir da reação conjunta dos íons sulfato, cálcio e alumínio. O consumo de cal é da ordem de  $2000 \text{ mgL}^{-1}$ , para alcançar os níveis necessários de cálcio e o pH alcalino. O fornecimento de íons Al corresponde a uma mistura de policloreto de alumínio (PAC) e aluminato de potássio (Alupan K) a uma taxa de PAC:Alupan K: $\text{SO}_4^{2-}$  de 2:1:1.

#### 3.1.4.2 Floculação

As partículas coloidais tendem a se manter estáveis em solução devido a propriedades associadas com fenômenos interfaciais (carga e hidratação da superfície das partículas). Essa estabilidade começou a ser explicada pela teoria DLVO (dos cientistas Derjaguin Landau e Verwey Overbeek), a qual envolve estimativas da energia de atração (forças de London - van der Waals) e da energia de repulsão (superposição de duplas camadas elétricas). Com o desenvolvimento de técnicas mais avançadas (microscópio de força atômica, por exemplo) foi possível obter resultados das forças superficiais em meio aquoso, que comprovaram a existência de forças adicionais, de hidratação (força repulsiva) e hidrofóbica (força atrativa), que não eram previstas pela teoria clássica (DLVO). A inclusão de energia devida a essas forças, também conhecidas como forças estruturais, resultou na teoria DLVO estendida (*extended DLVO theory*) ou teoria X-DLVO (SHAW, 1975; BRATBY, 1980).

Em meio aquoso, as partículas geralmente apresentam carga superficial que pode ser originária da ionização de grupos funcionais, imperfeição da estrutura cristalina da superfície do sólido, adsorção e/ou dissolução de íons. Superfícies em contato com meios aquosos se apresentam mais frequentemente com carga negativa. Isso deve-se principalmente ao fato dos cátions serem mais hidratados do que os ânions, apresentando uma maior tendência de permanecer no meio aquoso. Os ânions são menores, menos hidratados e mais polarizantes, apresentando maior tendência de serem adsorvidos especificamente (SHAW, 1975).

Segundo BRATBY (1980), floculação é o processo onde partículas desestabilizadas, ou partículas formadas como resultado da desestabilização, são induzidas a agregarem-se e formar grandes flocos. O polímero floculante adsorve na interface sólido/líquido pelos

mecanismos de atração eletrostática, forças hidrofóbicas ou pelo aprisionamento das partículas em redes poliméricas.

Segundo CARISSIMI (2007), a cinética de formação dos flocos é função das seguintes etapas:

- a) Difusão do polímero sob condições turbulentas, seguida de adsorção na interface sólido/líquido. A molécula adsorve na superfície da partícula em um ou mais sítios ativos, deixando livre, estendida na solução, o restante da cadeia;
- b) Conformação do polímero formando laços, caudas e trens. A conformação dos polímeros adsorvidos depende do tamanho da cadeia (peso molecular), flexibilidade da cadeia, densidade de carga (% de hidrólise), energia de interação entre o polímero e o colóide, natureza química e física dos sítios superficiais das partículas e competição entre o polímero e outras moléculas presentes na solução;
- c) Adsorção dos laços e caudas e formação de pontes poliméricas. A resistência dos flocos depende do número de pontes formadas, e, portanto, do número de laços e caudas disponíveis. Um fator de crucial importância é a disponibilidade de sítios nas partículas para acomodar os laços e caudas das partículas vizinhas;
- d) Crescimento dos flocos sob agitação lenta. Após a adição do agente desestabilizante, é necessária uma agitação rápida para que ocorra a mistura (ou homogeneização) do polímero na suspensão sólido/líquido e a formação dos flocos primários. Após o aparecimento dos flocos primários é necessário um estágio de agitação lenta para o crescimento e formação de flocos maiores. A energia para o processo de agregação é proporcionada pela indução de gradientes de velocidade dentro do sistema (agregação ortocinética). Os principais parâmetros envolvidos na agregação ortocinética são o gradiente de velocidade aplicado e o tempo de agitação.

Estes mecanismos, envolvidos na agregação por floculação, estão ilustrados na Figura 3.9.

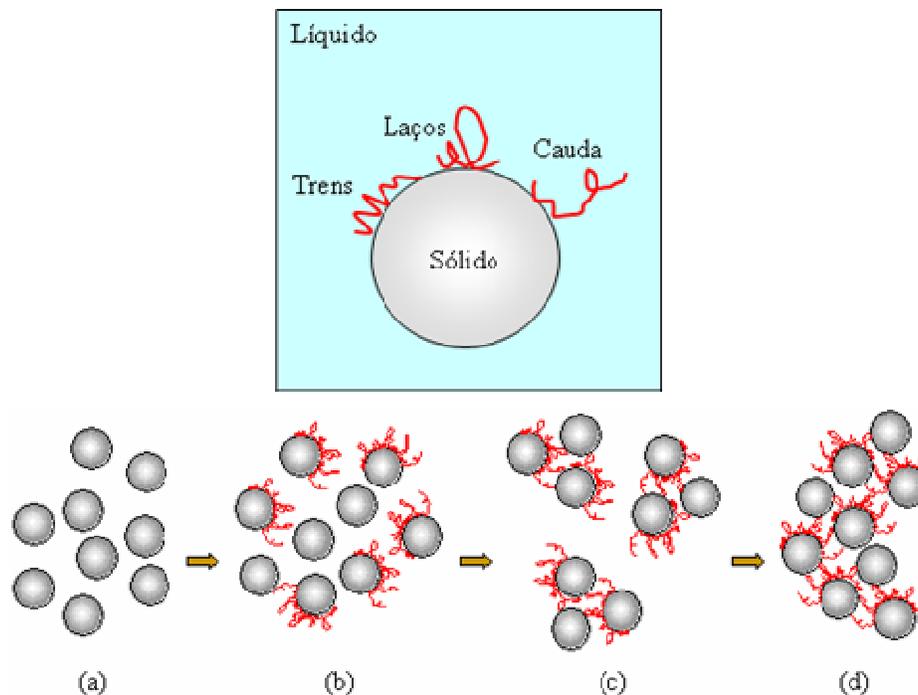


Figura 3.9 Estágios dos mecanismos envolvidos na agregação de partículas por flocculação.

#### 3.1.4.3 Flotação por Ar Dissolvido

O processo de flotação por ar dissolvido (FAD), surgido em 1924 nos países escandinavos para recuperação de fibras na indústria do papel, é hoje amplamente empregado nas indústrias de processamento de alimentos e petroquímica, sistemas de tratamento de água de abastecimento público e sistemas de espessamento de lodos industriais, etc. (RUBIO *et al.*, 2001, 2002a). A FAD é um dos mais econômicos e efetivos métodos de recuperação-remoção de sólidos, óleos emulsionados, microrganismos, redução da DBO insolúvel e no espessamento de lodos.

A flotação é uma técnica de separação gravítica de partículas, agregados ou gotículas (óleos emulsificados em água) via adesão a bolhas de ar. As unidades formadas por bolhas e partículas (ou gotículas) apresentam uma densidade menor do que o meio aquoso e “flutuam” ou "flotam" até a superfície de um reator (célula de flotação) ou interface líquido/ar, onde são removidas. Na área ambiental, a flotação tem como objetivo remover (separar) essas partículas que estão presentes em:

- dispersões sólido/líquido (suspensões);

- emulsões líquido1 (gotículas óleo)/líquido2 (água);
- misturas sólido/líquido1 (gotículas óleo)/líquido2 (água).

Portanto, a flotação não é um processo de remoção de íons ou de microrganismos (inclusive coliformes fecais) em suas formas originais, e sim na forma desestabilizada (agregados coloidais ou flocos, quebra de emulsão, etc.), adsorvidos em precipitados coloidais adsorventes ou em sólidos adsorventes, todos esses “agregados” associados a bolhas. Ainda, processos de coagulação/floculação seguidos de flotação não são capazes de remover microrganismos patogênicos satisfatoriamente, sendo necessária uma etapa de desinfecção. Fatores que contribuem para esta baixa eficiência podem ser o reduzido tamanho das bactérias (da ordem de micrômetros), além do elevado número (concentração) de organismos presentes (TESSELE *et al.*, 2004).

A Tabela 3.3 apresenta as mais importantes aplicações não-convencionais de FAD encontradas no Brasil, como por exemplo, tratamento por flotação de águas marinhas poluídas para abastecer “parques-aquáticos” nas praias, tratamento de lagos contaminados e até mesmo rios.

Tabela 3.3 Recentes aplicações não-convencionais de FAD no Brasil (Adaptado de RUBIO *et al.*, 2007a).

Unidade FAD	Capacidade de tratamento, $m^3h^{-1}$
Favela da rocinha: Rio de Janeiro (piscina de água salgada)	1080
Rio Carioca (Praia do Flamengo): RJ (tratamento de rio)	1080
Lagoa da Imboassica: RJ (Recuperação de lagoa)	900
Piscinão de Ramos: RJ (piscina de água salgada)	270
Lagoa da Aclimação: São Paulo – SP (Recuperação de lagoa em parque)	180
Parque do Ibirapuera: São Paulo – SP (Recuperação de lagoa em parque)	540
Ribeirão Guavirutuba: SP (tratamento de rio)	720
Canal Pinheiros: SP (tratamento de rio)	36000
Rio Negro: Manaus – AM (tratamento de rio)	25000
Brasília: Clarificação e polimento de efluentes de reatores biológico de tratamento de esgoto urbano (doméstico).	1750

A FAD consiste na formação de microbolhas pela redução na pressão da água pré-saturada com ar em pressões mais altas do que a atmosférica (acima de 4 atm). A água supersaturada é forçada através de válvulas do tipo venturi, agulha ou placas de orifício, e as nuvens de bolhas (30-100 $\mu$ m de diâmetro) são produzidas logo após a constrição de fluxo (RODRIGUES e RUBIO, 2003). Na FAD, o aumento da pressão faz com que uma maior quantidade de ar seja dissolvida, como previsto pela Lei de Henry, e conseqüentemente mais microbolhas sejam formadas quando ocorre a despressurização do fluxo (injeção na base da coluna por uma válvula agulha). Entretanto, para pressões mais baixas, a quantidade de ar injetado na bomba (no caso da bomba centrífuga multifase Edur, utilizada neste trabalho) é muito superior ao máximo que pode ser dissolvido, o que provoca também a produção de bolhas por cisalhamento (RODRIGUES, 2004). A constrição de fluxo faz com que a velocidade aumente e, de acordo com a Equação de Bernoulli, a pressão diminua, liberando o ar dissolvido no líquido na forma de bolhas. Foi

desenvolvida no LTM um novo método chamado LTM-BSizer (RODRIGUES e RUBIO, 2003) para medir a distribuição do tamanho de bolha, combinando microscopia óptica com processamento/análise de imagem digital (Figura 3.10).

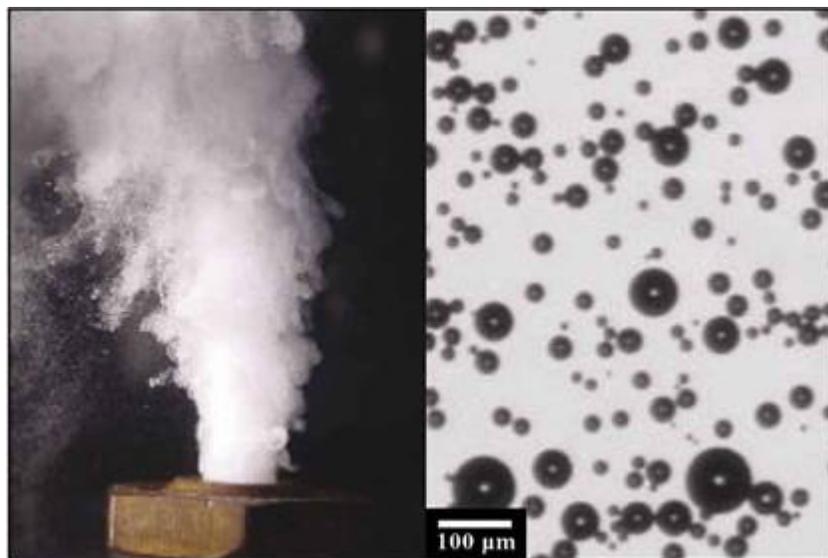


Figura 3.10 Ascensão de microbolhas em meio aquoso e imagem digital de microbolhas medidas com o LTM-BSizer (RODRIGUES e RUBIO, 2007).

A célula FADAT (flotação por ar dissolvido de alta taxa), utilizada neste trabalho ( $1-1,5 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ ), possui as características das células de flotação da terceira geração, apresentando uma geometria mais adequada para regimes turbulentos. O tanque de separação possui uma grande profundidade e lamelas (placas paralelas inclinadas) na parte superior, para permitir que as microbolhas, que eventualmente são arrastadas com o fluxo hidráulico, possam ficar aderidas nas lamelas, coalescer, retornar à superfície e serem removidas juntamente com o material flotado (KIURI, 2001).

A otimização das técnicas de flotação aplicadas ao tratamento de efluentes envolve o conhecimento dos fenômenos físico-químicos interfaciais, bem como dos mecanismos envolvidos na geração de bolhas e nas etapas de condicionamento e separação. Além desses fatores, a eficiência dos micro-processos envolvidos na flotação é influenciada pela forma de produção e distribuição de tamanho de bolhas (TESSELE *et al.*, 2004).

- Mecanismos envolvidos na interação entre partículas e microbolhas:

Segundo RODRIGUES (2004), a adesão bolha-partícula é a etapa mais importante da flotação e depende de uma série de características, incluindo tamanho de bolha, tamanho de partícula, propriedades superficiais da fase dispersa, temperatura, propriedades físico-químicas da fase contínua e condições hidrodinâmicas. Para que ocorra a adesão bolha-partícula é necessário o deslocamento e ruptura do filme líquido entre a superfície da partícula e a bolha de ar. Este fenômeno ocorre somente se a força resultante entre a superfície e a bolha de ar é de caráter atrativo, condição que é determinada pela hidrofobicidade da superfície.

No entanto, além deste critério puramente termodinâmico, existe uma condição cinética para que ocorra a adesão, isto é, que o tempo de contato entre bolha e partícula seja maior que o tempo de indução (tempo necessário para o afinamento e ruptura do filme líquido entre as superfícies). Segundo FILIPOV *et al.* (2000), o uso de pequenas bolhas (aproximadamente 40-100 $\mu$ m) aumenta a probabilidade de colisão com os flocos. A captura bolha-partícula, portanto, aumenta com a diminuição do tamanho de bolhas e com o aumento do tamanho de partículas.

Os mecanismos de interação bolha/partícula, além da adesão normal através de forças hidrofóbicas, são os seguintes (RODRIGUES e RUBIO, 2007):

- a) Fenômenos de nucleação em superfícies sólidas: Parte do ar dissolvido na água não se converte em bolhas nos constritores de fluxo, permanecendo em solução e possibilitando a nucleação de bolhas na superfície das partículas. Neste caso, as bolhas formam núcleos e crescem na interface sólido/líquido. Este mecanismo é independente da hidrofobicidade e permite a flotação de partículas hidrofílicas.
- b) Formação de flocos aerados ou aprisionamento das microbolhas no interior de agregados de partículas (flocos): Este fenômeno ocorre por bolhas entrarem e permanecerem dentro dos flocos. Em consequência, a densidade dos agregados bolha/partícula diminui drasticamente.
- c) Arraste mecânico de agregados pela ascensão da "nuvem" de bolhas: Corresponde ao arraste físico das partículas (agregados) pelas bolhas (aderidas ou não às partículas) e depende principalmente da hidrodinâmica e da distribuição de tamanho das bolhas.

A Figura 3.11 ilustra estes mecanismos.

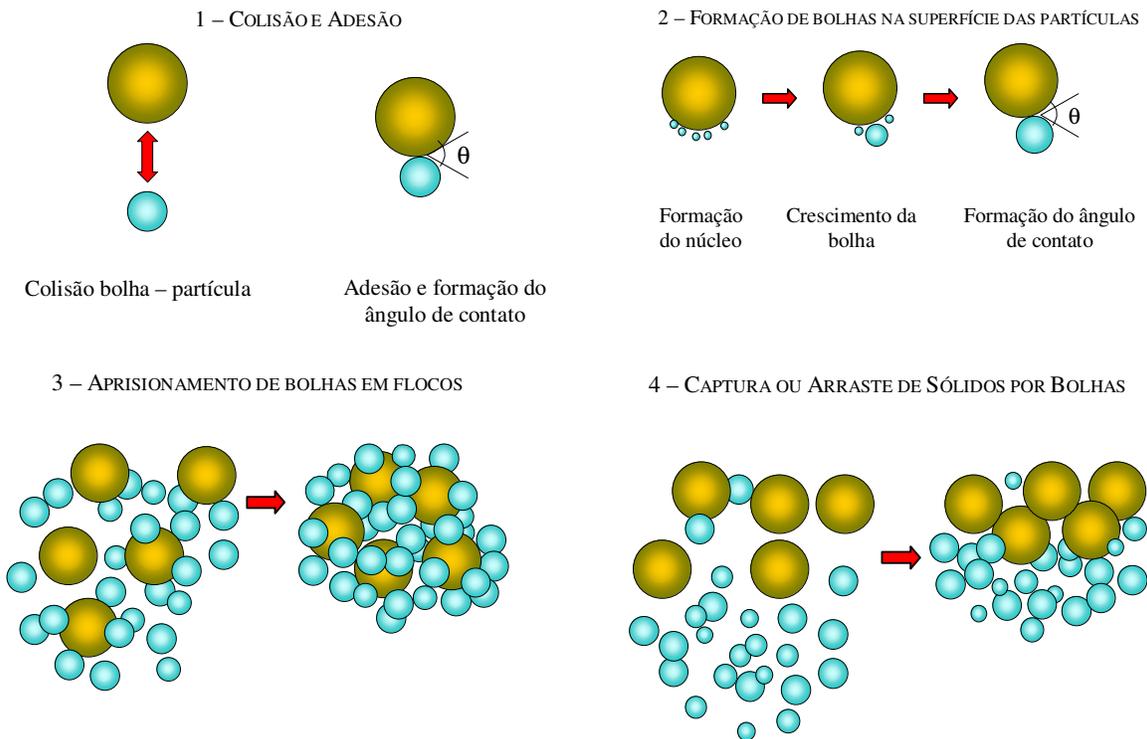


Figura 3.11 Fenômenos de colisão, adesão, nucleação e captura de partículas e agregados por microbolhas. (RODRIGUES e RUBIO, 2007)

### 3.2 A ÁGUA NO MUNDO

À medida que as atividades econômicas se diversificam e ocorre um crescimento populacional acelerado, aumenta a quantidade de água necessária para sustentar a sociedade, a produção agrícola e industrial. Segundo TUNDISI (2003), de 1900 a 2000, o uso total da água no planeta aumentou dez vezes (de 500 km<sup>3</sup>/ano para aproximadamente 5.000 km<sup>3</sup>/ano).

Essas necessidades se evidenciam principalmente em regiões com maior desenvolvimento urbano, industrial e agrícola e deve-se destacar a existência de regiões onde a escassez e a má distribuição de água tornam-se fatores limitantes ao seu próprio processo de desenvolvimento.

Em muitas regiões do globo, a população ultrapassou o ponto em que podia ser abastecida pelos recursos hídricos disponíveis. Hoje existem 26 países que abrigam 262 milhões de pessoas e que se enquadram na categoria de áreas com escassez de água. No Oriente Médio, a retirada excessiva do aquífero subterrâneo provoca a intrusão da salinidade do oceano, contaminando a água do subsolo. Na Flórida (EUA), o Parque Nacional de Everglades pode sofrer falência ecológica dentro de vinte anos em razão da poluição e das captações de água que têm sido feitas com fins agrícolas e urbanos. (MANCUSO e SANTOS, 2003)

Embora três quartos da superfície da Terra sejam compostos de água, a maior parte não está disponível para consumo humano, pois 97% é água salgada, encontrada nos oceanos e mares e apenas 3% é água doce. Este último percentual ainda é dividido, de acordo com a localização, conforme apresentado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 Distribuição da água doce no planeta

<b>Localização</b>	<b>Quantidade</b>
Calotas polares	75%
Rios e lagos	15%
Aquíferos subterrâneos	10%

Fonte: TUNDISI, 2003.

No Brasil, cerca de 80% das águas doces encontram-se na Região Amazônica e os 20% restantes concentram-se nas regiões onde vivem 95% da população brasileira (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

Na Região Metropolitana de São Paulo, onde todas as fontes de água já são exploradas, 47% do que os moradores consomem vêm de fora. A água percorre até 90 quilômetros para chegar a uma estação de tratamento na capital. Os técnicos alertam: se o consumo continuar crescendo, será preciso buscar água cada vez mais longe, o que aumentará a necessidade de equipamentos, energia e funcionários, aumentando também os custos. Hoje, o sistema já é complexo: a água captada em Minas Gerais atravessa cinco represas e sete túneis para ser distribuída em São Paulo, a maior cidade do Brasil. Nos

últimos dez anos, o consumo passou de 59 mil para 67 mil litros por segundo, e está bem perto do limite, que é de 70 mil litros por segundo (Jornal Nacional-05/07/08).

Estima-se que 90% das atividades modernas poderiam ser realizadas com água de reúso, principalmente na agricultura e indústrias. A Figura 3.12 apresenta a distribuição de uso da água entre as principais atividades consumidoras.

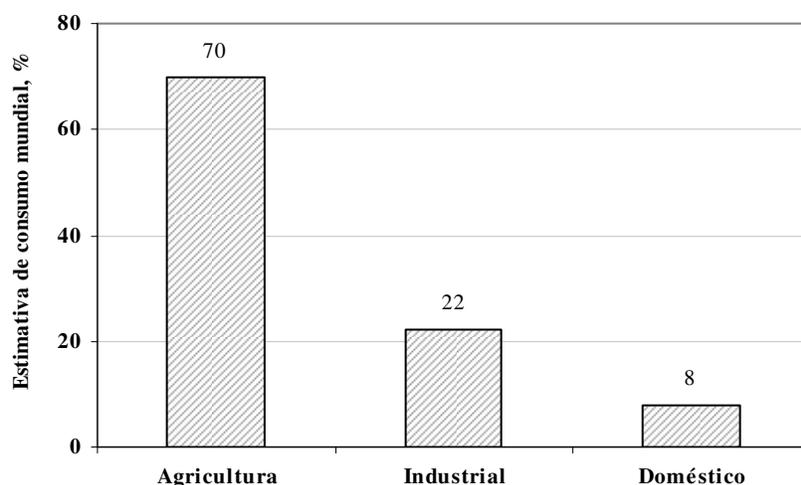


Figura 3.12 Estimativa de distribuição mundial para as principais atividades consumidoras de água (UNESCO, 2003).

O investimento em tecnologias necessárias para alcançar limites restritivos de descarga de efluentes tem levado a um aumento do número de indústrias e comunidades que consideram outros usos para seus efluentes tratados, como uma maneira de recuperar ao menos uma parte de seus investimentos. Além disso, como a água disponível tem ficado limitada, tem crescido o uso e a aceitação de efluentes recuperados como fonte de água para uma ampla variedade de aplicações. (EPA, 2004)

O equilíbrio entre a necessidade dos usuários e a disponibilidade de água é o grande desafio para a gestão dos recursos hídricos. De um lado, há a necessidade do controle da demanda, visando reduzir a pressão sobre os recursos hídricos, e de outro, a urgência pelo controle da poluição. O reúso de água pode atuar nos dois aspectos.

### 3.2.1 Conservação da Água

Em 1992 ocorria no Rio de Janeiro a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD), também conhecida por ECO-92, da qual um dos principais resultados foi a Agenda 21. Trata-se de um documento consensual para o qual contribuíram governos e instituições da sociedade civil de 179 países. É um programa de ação que constitui uma ousada e abrangente tentativa de promover, em escala planetária, um novo padrão de desenvolvimento, conciliando métodos de proteção ambiental, justiça social e eficiência econômica. A Agenda 21, no seu capítulo 18 intitulado “Proteção da qualidade e do abastecimento dos recursos hídricos: Aplicação de critérios integrados no desenvolvimento, manejo e uso dos recursos hídricos”, aborda a importância do reúso, recomendando a implementação de políticas de gestão e o desenvolvimento de novas alternativas de abastecimento de água para fins não potáveis, entre elas o aproveitamento de águas residuárias e a reciclagem da água.

O Brasil também já se preocupa com a conservação da água e surgem freqüentemente campanhas de conscientização visando o uso racional e o combate ao desperdício. Como medidas para a conservação da água existem programas em âmbito nacional, propostas de taxação de água para grandes consumidores, uso da água de chuva, da água cinza (águas que foram utilizadas em tanques, pias, máquinas de lavar, bidês, chuveiros, banheiras e outros equipamentos, exceto vaso sanitário e pia da cozinha) e o incentivo a práticas de reúso de água não potável.

Neste sentido, a Lei 9.433 de 1997 instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e implementou a outorga e a cobrança pelo uso de recursos hídricos. Segundo esta lei, a água é um recurso natural limitado e a cobrança objetiva o reconhecimento da água como bem dotado de valor econômico e dar ao usuário uma indicação de seu real valor, bem como incentivar a racionalização do uso da água.

Esta lei prevê a elaboração de um Plano Nacional de Recursos Hídricos o qual tem como objetivos atingir metas para a racionalização de uso da água, aumento da quantidade e melhoria da qualidade dos recursos hídricos disponíveis.

O Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água (PNCDA) é um programa federal que propõe medidas para o uso racional da água de abastecimento público

nas cidades brasileiras. Este programa tem por objetivos específicos definir e implementar um conjunto de ações e instrumentos tecnológicos, normativos, econômicos e institucionais, concorrentes para uma efetiva economia dos volumes de água demandados para consumo nas áreas urbanas.

Em Porto Alegre (RS), a Lei 10.506 de 5 de agosto de 2008, institui o Programa de Conservação, Uso Racional e Reaproveitamento das Águas e prevê para as novas edificações a captação, o armazenamento e a utilização de água proveniente das chuvas, bem como a utilização de água cinza no abastecimento das descargas de vasos sanitários ou mictórios. Também as águas dos lagos artificiais e chafarizes de parques, praças e jardins serão provenientes de ações de reaproveitamento. Esta lei ainda não foi sancionada pelo prefeito do município e, portanto, ainda não entrou em vigor.

O reúso de água é uma medida de conservação que vem ganhando cada vez mais adeptos e importância na esfera mundial.

### 3.3 REÚSO DE ÁGUA

#### 3.3.1 Histórico

O reúso de água possui uma longa história, comprovada por sistemas de esgotamentos sanitários associados a antigos palácios e a cidades da civilização de Minoan, da ilha de Creta, na Antiga Grécia. Há indicações da utilização de água residuária na irrigação agrícola desde aproximadamente 5.000 anos atrás. (ANGELAKIS e SPYRIDAKIS, *apud* ASANO e LEVINE, 1996).

O desenvolvimento de programas para o reúso planejado de águas residuárias nos EUA começou no início do século 20. O estado da Califórnia, pioneiro nos esforços para promover a recuperação e o reúso de água, teve a primeira regulamentação do reúso promulgada em 1918.

Na região do Mediterrâneo, segundo ANGELAKIS *et al* (1999), Israel foi o país pioneiro no desenvolvimento de práticas de reúso de água, seguido por Chipre, Jordânia e Tunísia. Porém, o real reconhecimento desta prática ocorre em relativamente poucos países,

tais como Israel, Tunísia, África do Sul e algumas localidades dos Estados Unidos como Califórnia, Arizona e Flórida.

Durante o último século, a necessidade crescente de água de qualidade resultou no desenvolvimento de vários sistemas para a sua recuperação e formas de reúso. A Tabela 3.5 apresenta o desenvolvimento histórico da prática de reúso de água.

Tabela 3.5 Desenvolvimento histórico do reúso de água em diferentes locais do mundo.

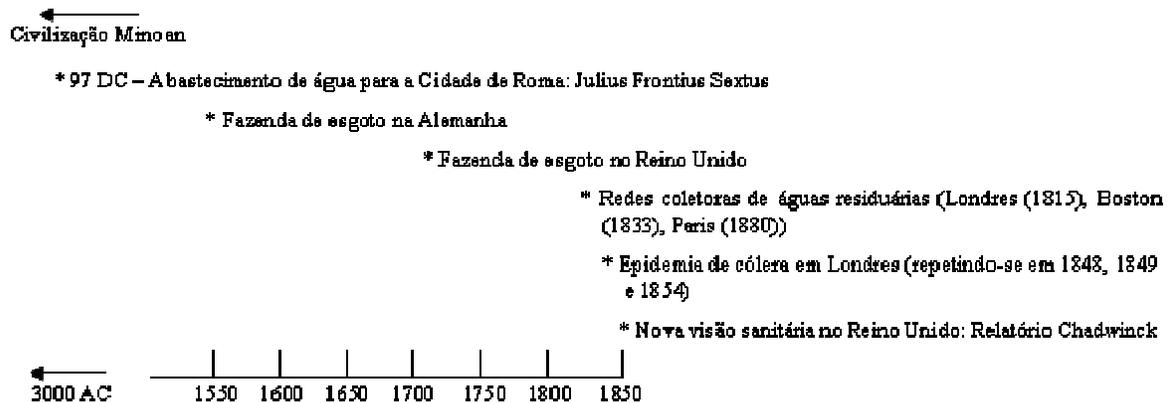
<b>Ano</b>	<b>Localização</b>	<b>Exemplos de Reúso</b>
1912 - 1985	Golden Gate Park, San Francisco, Califórnia, EUA	Irrigação de gramados e criação de lagos ornamentais
1926	Grand Canyon National Park, Arizona, EUA	Descarga em vaso sanitário, irrigação de gramado, água de resfriamento e alimentação de caldeira
1929	Cidade de Pomona, Califórnia, EUA	Irrigação de campos e jardins
1942	Cidade de Baltimore, Maryland, EUA	Resfriamento de metais no processamento do aço na Bethlehem Steel Company
1960	Cidade de Colorado Springs, Colorado, EUA	Irrigação de campos de golfe e parques
1961	Irvine Ranch Water District, Califórnia, EUA	Irrigação, usos domésticos e industrial
1962	La Soukra, Tunísia	Irrigação em plantas cítricas e redução da intrusão de água salina em aquíferos
1968	Cidade de Windhoek, Namíbia	Sistema direto de recuperação de água residuária para aumentar a quantidade de água potável
1969	Cidade de Wagga Wagga, Austrália	Irrigação de paisagens, campos esportivos, gramados e cemitérios
1970	Sappi Pulp and Paper Group, Enstra, África do Sul	Industrial e limpeza de áreas públicas
1976	Orange Country Water District, Califórnia, EUA	Recarga de aquífero por injeção direta
1977	Dan Region Project, Tel-Aviv, Israel	Recarga de aquífero por bacias, via bombeamento
1977	City of St. Petersburg, Flórida, EUA	Irrigação de parques, campos de golfe e jardins escolares

<b>Ano</b>	<b>Localização</b>	<b>Exemplos de Reúso</b>
1984	Tokyo Metropolitan Government, Japão	Projeto de reciclo de água no distrito de Shinjuku
1985	City of El Paso, Texas, EUA	Recarga do aquífero Hueco de Bolson (através de injeção direta) e resfriamento de caldeira
1987	Monterey Regional Water Pollution Control Agency, Califórnia, EUA	Irrigação na agricultura de alimentos consumidos crus, como alcachofra, aipo, brócolis, alface e couve-flor
1989	Shoalhaven Heads, Austrália	Irrigação de jardins e descarga sanitária em residências
1989	ConSORCI de La Costa Brava, Girona, Espanha	Irrigação de campos de golfe

Fonte: Adaptado de METCALF e EDDY (2006)

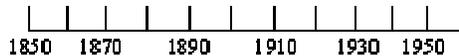
A Figura 3.13 apresenta uma linha do tempo ilustrando os principais episódios sanitários e a evolução do reúso de água no mundo.

### PRIMEIROS SISTEMAS DE ÁGUA E SANEAMENTO: 3000 AC ATÉ 1850



### GRANDE DESPERTAR SANITÁRIO: 1850 ATÉ 1950

- \* Epidemia de cólera associada ao controle da poluição da água por Snow (Londres)
- \* Desenvolvimento da teoria preventiva da febre tífóide desenvolvida por Brudd (Reino Unido)
- \* Conexão entre doenças infecciosas e bactérias etiológicas, demonstrado por Koch (Alemanha)
- \* Demonstração da poluição microbiana da água por Pasteur (França)
- \* Desinfecção com hipoclorito de sódio no Reino Unido por Down para recuperação da água "pura e intacta"
- \* Cloração na cidade de Jersey, "NJ water supply" Estados Unidos
- \* A cinética da desinfecção é elucidada por Chick (Estados Unidos)
- \* O processo de lodos ativados é demonstrado por Arden e Lockett
- \* Primeira regulamentação para o uso de esgoto na irrigação proposta na Califórnia



### ERA DA RECUPERAÇÃO DAS ÁGUAS, RECICLAGEM E REÚSO: APÓS 1960

- \* Legislação da Califórnia encoraja a recuperação, reciclagem e reúso das águas residuárias
- \* Utilização de efluente secundário para a irrigação agrícola em Israel
- \* Procura de reúso potável direto em Windhoek na Namíbia
- \* *US Clean Water Act* para restaurar e manter a qualidade da água
- \* Estudo do vírus, Pamplona (Califórnia)
- \* Divulgação dos critérios californianos de recuperação de águas residuárias
- \* Estudos dos efeitos do reúso sobre a saúde (Los Angeles - CA)
- \* Estudo de reúso de esgoto em agricultura (Monterey - CA)
- \* Diretrizes para reúso agrícola e aquicultura – OMS
- \* Estudo dos efeitos sobre a saúde da recuperação total dos recursos (San Diego - CA)
- \* Diretrizes para reúso da água – USEPA
- \* Sistema de tratamento para reúso potável (Denver - CO)



Figura 3.13 Eventos na evolução do saneamento e reúso de água (ASANO e LEVINE, 1996)

### 3.3.2 A água de reúso e o ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico é usado para representar o contínuo transporte da água no meio ambiente, em circulação fechada entre a superfície terrestre e a atmosfera. No entanto, com o surgimento da prática de reúso, este ciclo recebeu outros componentes, tais como reúso na agricultura, na indústria e recarga de aquíferos.

O ciclo hidrológico e as possibilidades de reúso de água são apresentados na Figura 3.14.

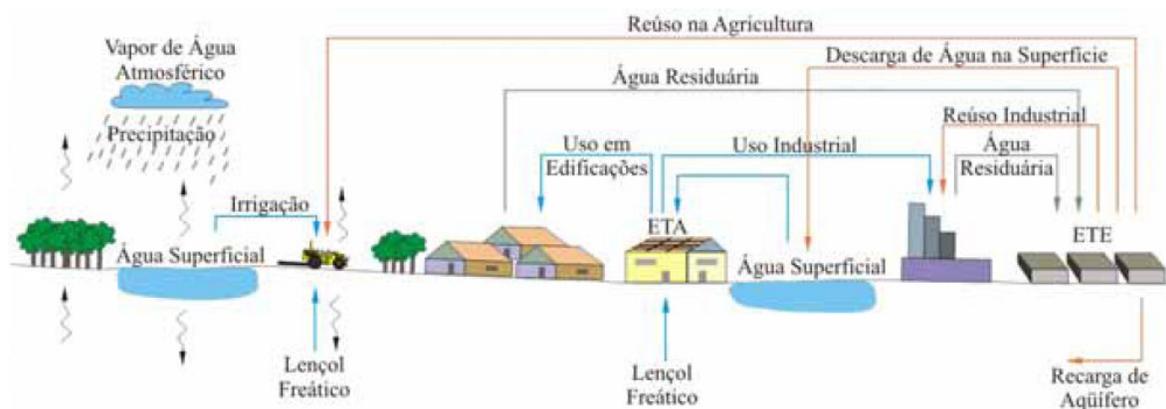


Figura 3.14 Ciclo hidrológico e reúso de água (ASANO e LEVINE, 1996)

Na figura 3.14 quantidade de água transferida por cada via depende das características da água, do clima e de fatores hidrogeológicos, do grau de utilização da água para diferentes propósitos e do grau de reúso da água.

### 3.3.3 Conceito de reúso de água

Se por um lado a literatura é bastante rica quanto à terminologia do reúso de água, por outro, existe discrepância entre os vários autores, o que dificulta o entendimento desta prática. Conforme alguns autores, “reúso de água é o aproveitamento de águas previamente utilizadas, uma ou mais vezes, em alguma atividade humana, para suprir as necessidades de outros usos benéficos, inclusive o original. Pode ser direto ou indireto, bem como decorrer de ações planejadas ou não planejadas”. (MANCUSO e SANTOS, 2003)

De acordo com WHO - World Health Organization (1973), tem-se:

- Reúso Indireto: ocorre quando a água já usada, uma ou mais vezes para uso doméstico ou industrial, é descarregada nas águas superficiais ou subterrâneas e utilizada novamente à jusante, de forma diluída;
- Reúso Direto: é o uso planejado e deliberado de esgotos tratados para certas finalidades como irrigação, uso industrial, recarga de aquíferos e água potável;
- Reciclagem Interna: é o reúso da água internamente a instalações industriais, tendo como objetivo a economia de água e o controle da poluição.

Pode-se entender a reciclagem como um caso particular do reúso direto.

De acordo com a intenção em realizá-lo, o reúso também pode ser diferenciado como:

- Reúso intencional ou planejado: ocorre quando há o conhecimento de que o reúso está sendo realizado e, com isso, todos os cuidados necessários para a sua prática são previstos;
- Reúso não-intencional, não-planejado ou inconsciente: normalmente ocorre quando há o reúso indireto e aqueles que fazem uso da água a jusante dos lançamentos de efluentes não tem consciência desta ocorrência.

As Figuras 3.15 e 3.16 ilustram o reúso indireto não planejado e o reúso direto planejado da água, respectivamente.

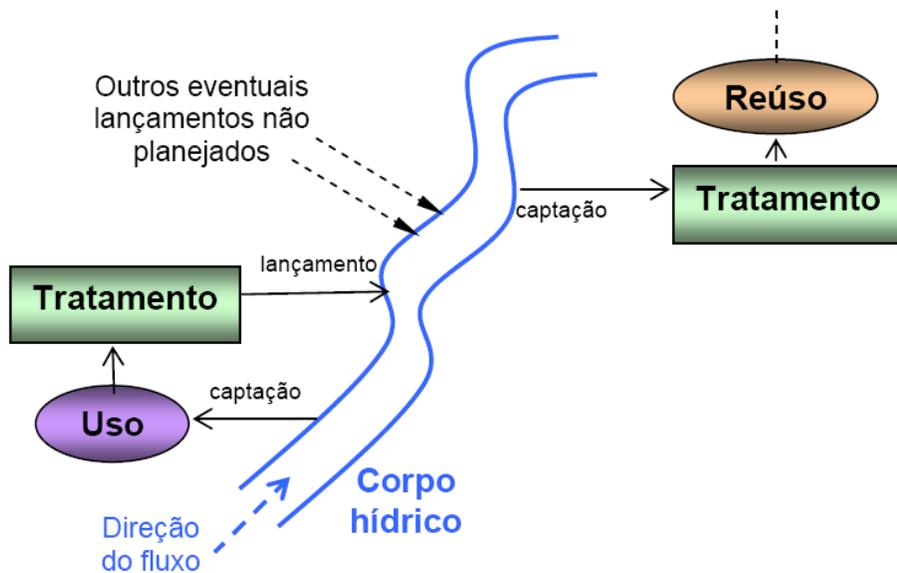


Figura 3.15 Reúso indireto não planejado da água (RODRIGUES, 2005)

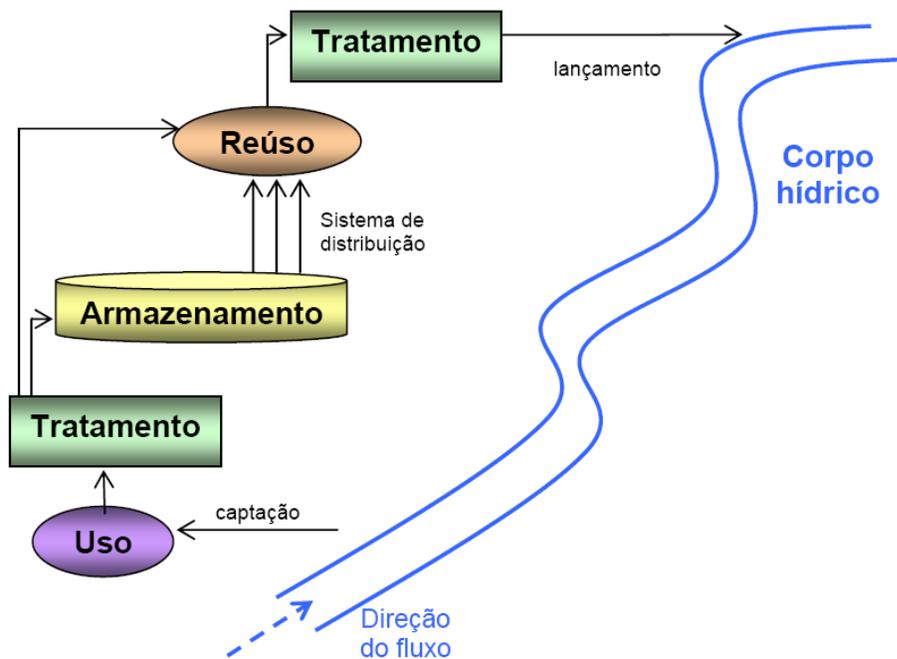


Figura 3.16 Reúso direto planejado da água (RODRIGUES, 2005)

A Resolução N° 54 de 28 de novembro de 2005, elaborada pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), estabelece modalidades, diretrizes e critérios para a prática de reuso direto não potável de água. As definições adotadas nessa resolução são apresentadas a seguir:

- Água residuária: esgoto, água descartada, efluentes líquidos de edificações, indústrias, agroindústrias e agropecuária, tratados ou não;
- Reúso de água: utilização de água residuária;
- Água de reúso: água residuária, que se encontra dentro dos padrões exigidos para sua utilização nas modalidades pretendidas;
- Reúso direto de água: uso planejado de água de reúso, conduzida ao local de utilização, sem lançamento ou diluição prévia em corpos hídricos superficiais ou subterrâneos;
- Produtor de água de reúso: pessoa física ou jurídica, de direito público ou privado, que produz água de reúso;
- Distribuidor de água de reúso: pessoa física ou jurídica, de direito público ou privado, que distribui água de reúso; e
- Usuário de água de reúso: pessoa física ou jurídica, de direito público ou privado, que utiliza água de reúso.

#### 3.3.4 Constituintes da água de reúso

Segundo a EPA (2004), a presença de alguns componentes como sólidos dissolvidos, nitrogênio, fósforo e metais pesados, entre outros, pode afetar a aceitabilidade da água de reúso para diferentes aplicações. A Tabela 3.6 apresenta uma relação de constituintes orgânicos e inorgânicos que podem estar presentes na água de reúso, além de razões para preocupação com os mesmos.

Tabela 3.6 Possíveis constituintes da água de reúso

<b>Constituintes</b>	<b>Parâmetros analisados</b>	<b>Razões para preocupação</b>
Sólidos Suspensos	Sólidos suspensos, incluindo sólidos fixos e voláteis	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contaminantes orgânicos, metais pesados, entre outros, podem ser adsorvidos sobre particulados.</li> <li>- Matérias suspensas podem proteger microrganismos de desinfetantes.</li> <li>- Quantidades excessivas de sólidos suspensos causam obstrução nos sistemas de irrigação.</li> </ul>
Organismos Biodegradáveis	Demanda bioquímica de oxigênio, demanda química de oxigênio e carbono orgânico total	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Problemas estéticos e de odor.</li> <li>- O fornecimento de alimentos para os microrganismos afeta desfavoravelmente os processos de desinfecção, tornam a água imprópria para alguns usos, consomem oxigênio e podem resultar em efeitos agudos ou crônicos se a água recuperada for usada.</li> </ul>
Nutrientes	Nitrogênio, fósforo e potássio	<ul style="list-style-type: none"> <li>- São nutrientes essenciais para o crescimento das plantas.</li> <li>- No meio aquático, o nitrogênio e o fósforo podem conduzir ao crescimento excessivo de algas e plantas aquáticas.</li> </ul>
Orgânicos Estáveis	Componentes específicos (pesticidas, cloretos, hidrocarbonetos, etc)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alguns destes compostos orgânicos tendem a resistir aos métodos convencionais de tratamento de águas residuárias.</li> <li>- Alguns compostos orgânicos são tóxicos ao ambiente e sua presença pode limitar a utilização da água recuperada na irrigação ou outros usos</li> </ul>
Concentração do Íon Hidrogênio	pH	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O pH da água residuária afeta o processo de desinfecção, coagulação, solubilidade dos metais, assim como a alcalinidade do solo.</li> </ul>
Metais Pesados	Especificamente os seguintes elementos: Cd, Zn, Ni e Hg	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alguns metais pesados acumulam no meio ambiente e são tóxicos a plantas e animais. Esta presença pode limitar o uso da água reaproveitada para diversos usos.</li> </ul>
Compostos Inorgânicos Dissolvidos	Sólidos totais dissolvidos, condutividade elétrica, elementos específicos como Na, Ca, Mg, Cl e B	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O excesso na salinidade pode danificar algumas culturas.</li> <li>- Os íons de compostos inorgânicos, tais como cloretos, Na e B são tóxicos, podendo causar problemas de permeabilidade no solo.</li> </ul>
Cloro Residual	Cloro livre ou combinado	<ul style="list-style-type: none"> <li>- As quantidades excessivas de cloro livre disponível podem causar queda de folhas, queimaduras e danificam algumas culturas mais sensíveis.</li> <li>- A maior parte do cloro nas águas tratadas está na forma combinada, a qual não causa danos às culturas.</li> </ul>

Fonte: EPA (2004)

### 3.3.5 Reúso de água para fins não potáveis

A Tabela 3.7 dá alguns exemplos de aplicações para a água de reúso em fins não potáveis.

Tabela 3.7 Tipos de reúso e aplicações (adaptado de METCALF & EDDY, 2006).

<b>Tipos de Reúso</b>	<b>Aplicações</b>
Irrigação paisagística	Parques, cemitérios, campos de golfe, faixas de domínio de auto-estradas, campi universitários, cinturões verdes, gramados residenciais.
Agricultura	Plantio de forrageiras, plantas fibrosas e de grãos, plantas alimentícias, viveiros de plantas ornamentais, proteção contra geadas.
Usos industriais	Refrigeração, alimentação de caldeiras, lavagem de gases, água de processamento.
Recarga de aquíferos	Recarga de aquíferos potáveis, controle de intrusão marinha, controle de recalques de subsolo.
Usos urbanos não-potáveis	Irrigação paisagística, combate ao fogo, descarga de vasos sanitários, sistemas de ar condicionado, lavagem de veículos, lavagem de ruas e pontos de ônibus, abastecimento de fontes luminosas, espelhos d'água e chafarizes, etc.
Finalidades ambientais	Aumento de vazão em cursos de água, aplicação em pântanos, terras alagadas, indústrias de pesca.
Usos diversos	Aqüicultura, fabricação de neve, construções, preparação de concreto, compactação do solo, controle de poeira, dessedentação de animais.

#### 3.3.5.1 Fins agrícolas

De toda a água consumida nas diversas atividades, a agricultura é responsável por cerca de 70% e este valor tende a aumentar. No entanto, os consumos específicos variam bastante, dependendo do método de irrigação empregado, de fatores como a natureza do solo, a necessidade de diferentes culturas, o clima e índices de evaporação das regiões.

De acordo com a EPA (2004), os constituintes químicos de maior preocupação presentes na água de reúso são a salinidade, sódio, metais pesados, cloro residual e

nutrientes. A sensibilidade é geralmente função do tipo de planta e da sua tolerância aos constituintes encontrados na zona das raízes ou depositados sobre as folhas.

- Salinidade: Este é o parâmetro mais importante na determinação da adequada qualidade da água para irrigação. A salinidade reduz a disponibilidade de água para as plantas pela redução do potencial osmótico do solo. Este problema é mais acentuado em climas quentes e secos, devido ao aumento da demanda de água pelas plantas, principalmente quando a irrigação é inadequada. A acumulação de sais no solo dependerá da sua concentração na água e também do tipo de solo, variando de acordo com a taxa na qual os sais são removidos do solo por lixiviação.

- Sódio: A excessiva concentração de sódio na água (quando a razão entre a concentração de sódio e cálcio é maior do que 3:1) contribui para a dispersão e desestruturação do solo. Finas partículas de solo preenchem os espaços porosos, selando a superfície e reduzindo a permeabilidade e a capacidade de infiltração de água. Neste caso, o sistema radicular das plantas não possui água disponível, ao contrário da salinidade, onde há água mas a planta não consegue extraí-la.

- Metais pesados: Os elementos de grande preocupação quando em níveis elevados são cádmio, cobre, molibdênio, níquel e zinco. Níquel e zinco têm visíveis efeitos adversos às plantas em concentrações inferiores às prejudiciais aos homens e animais. Sua toxicidade é reduzida em pH's elevados. Cádmio, cobre e molibdênio, contudo, podem ser prejudiciais aos animais em concentrações tão baixas quanto às plantas.

- Cloro residual: o excesso de cloro pode causar um efeito de queima nas folhas das plantas quando a água é aspergida sobre as folhagens. Numa concentração maior do que 5 mgL<sup>-1</sup> causa danos à maioria das plantas.

- Nutrientes: o nutriente de maior benefício para as plantas é o nitrogênio. Porém, quantidades elevadas deste elemento podem estimular um crescimento vegetativo na maioria das plantas, causando um retardo na maturação dos frutos e redução na sua quantidade e qualidade.

Neste contexto, a água de reúso pode ser aproveitada, desde que de forma planejada e mediante escolha adequada de culturas, levando em conta a qualidade da água a ser usada, o tipo de solo e a sensibilidade das plantas a serem irrigadas.

### 3.3.5.2 *Uso urbano*

Diversas atividades urbanas dispensam o uso de água potável, podendo-se aproveitar águas de qualidade inferior. De acordo com EPA (2004), as atividades mais adequadas para a água de reúso são as seguintes:

- Irrigação de parques, jardins públicos, de edifícios, de escolas, de universidades, centros esportivos, campos de golfe, e canteiros ao longo de ruas e avenidas;
- Utilizações comerciais, tais como lavagem de veículos, lavanderias, lavagem de janelas, água de mistura e diluição de pesticidas, herbicidas e adubos líquidos;
- Sistemas decorativos, tais como fontes e chafarizes, espelhos e quedas d'água;
- Controle de poeiras e produção de concreto;
- Reserva de proteção contra incêndios;
- Descarga sanitária em banheiros públicos, edifícios comerciais e industriais.

Segundo HESPANHOL (2002), os usos urbanos não potáveis envolvem riscos menores do que os potáveis, entretanto, cuidados especiais devem ser tomados quando ocorre contato direto do público com gramados de parques, jardins, hotéis, áreas turísticas e campos de esporte. O autor destaca ainda que os principais problemas associados ao reúso urbano não potável são os custos elevados dos sistemas duplos de distribuição, dificuldades operacionais e riscos potenciais de ocorrência de conexões cruzadas.

### 3.3.5.3 *Fins industriais*

Diversas indústrias passaram a avaliar as possibilidades internas de reúso da água devido ao aumento das exigências de qualidade dos efluentes a serem lançados nos corpos receptores (Resolução N° 357/ 2005 do CONAMA) e aos processos de outorga e cobrança pelo uso da água, previstos na Lei Federal N° 9.433/ 1997.

De acordo com HESPANHOL (2002), os usos industriais para a água de reúso que apresentam possibilidade de serem viabilizados são basicamente os seguintes:

- Torres de resfriamento como água de *make-up*;

- Caldeiras;
- Construção civil, incluindo compactação e cura de concreto, e para compactação do solo;
- Irrigação de áreas verdes de instalações industriais, lavagens de pisos e alguns tipos de peças, principalmente na indústria mecânica;
- Processos industriais;

### 3.4 CRITÉRIOS PARA O REÚSO DE ÁGUA

#### 3.4.1 Critérios Nacionais

No Brasil, o reúso vem sendo difundido de forma crescente após a Lei 9.433 de 1997, que instituiu a outorga e a cobrança pelo uso da água. Entretanto, este crescimento ocorre em uma condição de completa ausência de regulamentação específica sobre o assunto, o que pode acarretar uma série de conseqüências indesejáveis, tais como:

- estabelecimento de práticas inadequadas;
- altos riscos à saúde pública;
- contaminação do meio ambiente;
- conflitos com empresas responsáveis pelo abastecimento de água;
- dificuldade de autorização por parte dos órgãos ambientais.

Nestes casos, pode haver uma condenação precipitada do reúso, principalmente por parte da população, cujo envolvimento é fundamental para o sucesso de um programa estruturado de reúso; além de dificuldades na sua implementação e o ofuscamento dos benefícios decorrentes da sua correta utilização. É neste cenário que surge a necessidade de uma regulamentação adequada à prática do reúso de forma a promovê-lo, ampliando os benefícios aos usuários, minimizando os riscos associados e possibilitando o equacionamento dos conflitos potencialmente existentes.

No entanto, a legislação existente para o lançamento de efluentes em corpos receptores pode auxiliar na elaboração dos futuros critérios para tal prática.

Também no Brasil considera-se o esgoto doméstico como a principal fonte de água de reúso. Para águas residuárias industriais, como a DAM, ainda não há muitos estudos ou propostas de limites a serem atendidos para que possam ser reutilizadas. Os parâmetros utilizados para fins de comparação neste trabalho são, na maioria das vezes, aplicados a águas de reúso resultantes do tratamento de esgotos sanitários, devido à ausência de critérios específicos para águas de reúso provenientes de atividades industriais. É importante salientar, porém, que o efluente aqui analisado (DAM), apresenta uma contaminação muito inferior aos esgotos sanitários, principalmente no que diz respeito a microrganismos, a qual é praticamente inexistente na DAM estudada.

A primeira regulamentação que tratou de reúso de água no país foi a norma técnica NBR-13.969, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), de setembro de 1997, que aborda unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos. Na norma, o reúso é abordado como uma opção à destinação de esgotos de origem essencialmente doméstica ou com características similares. Quatro classes de água de reúso e seus respectivos padrões de qualidade foram definidos na norma e são apresentados na Tabela 3.8. Vale ressaltar que esta norma não foi regulamentada por nenhum decreto e não tem, portanto, valor de lei.

Tabela 3.8 Classes de água de reúso pela NBR-13.969 e respectivos padrões de qualidade

Classe	Uso previsto	Turbidez NTU	Coliformes Fecais, NMP/100mL	SDT mg/L	pH	Cloro residual mg/L
Classe 1	Lavagem de carros e outros usos que requerem contato direto do usuário com a água, com possível aspiração de aerossóis pelo operador incluindo chafarizes	<5	<200	<200	6-8	0,5-1,5
Classe 2	Lavagem de pisos, calçadas e irrigação dos jardins, manutenção dos lagos e canais para fins paisagísticos, exceto chafarizes	<5	<500	-	-	0,5>
Classe 3	Reúso em descargas dos vasos sanitários	<10	<500	-	-	-
Classe 4*	Reúso nos pomares, cereais, forragens, pastagens para gados e outros cultivos através de escoamento superficial ou por sistema de irrigação pontual	-	<5.000	-	-	-

(\*) Requer também oxigênio dissolvido acima de 2,0 mgL<sup>-1</sup>.

Em março de 2005, foi publicada a Resolução N° 357 do CONAMA, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. Essa resolução considera que o controle da poluição está diretamente relacionado com a proteção da saúde, garantia do meio ambiente ecologicamente equilibrado e a melhoria da qualidade de vida, levando em conta os usos prioritários e classes de qualidade ambiental exigidos para um determinado corpo de água. Os parâmetros de lançamento de efluentes são apresentados na Tabela 3.9

Tabela 3.9 Limite de parâmetros para emissão de efluentes em corpos d'água de acordo com a Resolução N° 357 do CONAMA.

<b>Parâmetros</b>	<b>Limite</b>
pH	5 - 9
Temperatura	<40°C
Materiais Sedimentáveis	≤1 mL/L em teste de 1 hora em cone Imhoff
Materiais Flutuantes	Ausentes
Óleos minerais	≤20 mg/L
Óleos vegetais e gorduras animais	≤50 mg/L
Arsênio total	0,5 mg/L As
Bário total	5,0 mg/L Ba
Boro total	5,0 mg/L B
Cádmio total	0,2 mg/L Cd
Chumbo total	0,5 mg/L Pb
Cianeto total	0,2 mg/L CN
Cobre dissolvido	1,0 mg/L Cu
Cromo total	0,5 mg/L Cr
Estanho total	4,0 mg/L Sn
Ferro dissolvido	15,0 mg/L Fe
Fluoreto total	10,0 mg/L F
Manganês dissolvido	1,0 mg/L Mn
Mercúrio total	0,01 mg/L Hg
Níquel total	2,0 mg/L Ni
Nitrogênio amoniacal total	20,0 mg/L N
Prata total	0,1 mg/L Ag
Selênio total	0,30 mg/L Se
Sulfeto	1,0 mg/L S
Zinco total	5,0 mg/L Zn
Clorofórmio	1,0 mg/L
Dicloroetano	1,0 mg/L
Fenóis totais (substâncias que reagem com 4-aminoantipirina)	0,5 mg/L C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH
Tetracloroeto de Carbono	1,0 mg/L
Tricloroetano	1,0 mg/L

Com o crescente interesse pelo tema, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), publicou a Resolução N° 54, em novembro de 2005, que estabelece os critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água, constituindo-se em instrumento poderoso para restaurar o equilíbrio entre oferta e demanda de água em diversas regiões brasileiras. Nessa resolução, são definidas as cinco modalidades de reúso de água. A Tabela 3.10 apresenta as diversas modalidades de reúso e suas possíveis aplicações.

Tabela 3.10 Opções de reúso apresentadas pela Resolução N° 54 do CNRH e suas possíveis aplicações.

<b>Opções de reúso</b>	<b>Possíveis aplicações</b>
Fins urbanos	Irrigação paisagística, lavagem de logradouros públicos e veículos, desobstrução de tubulações, construção civil, edificações, combate a incêndio (dentro da área urbana).
Fins agrícolas e florestais	Aplicação de água de reúso para produção agrícola e cultivo de florestas plantadas.
Fins ambientais	Implantação de projetos de recuperação do meio ambiente.
Fins industriais	Processos, atividades e operações industriais.
Aqüicultura	Criação de animais ou cultivo de vegetais aquáticos.

A ANA (Agência Nacional de Águas) em parceria com a FIESP (Federação das Indústrias do Estado de São Paulo) e o SindusCon-SP (Sindicato da Indústria da Construção Civil), elaboraram uma publicação (ANA, 2005) que traz orientações para a implantação de programas de conservação de água em edificações comerciais, residenciais e industriais, objetivando dar subsídios à adoção de soluções eficientes na concepção das novas edificações ou na modernização das já existentes. A Tabela 3.11 apresenta os padrões adotados pela ANA para a água de reúso.

Tabela 3.11 Parâmetros característicos para água de reúso (adaptado de ANA, 2005).

Classe	Uso previsto	Turbidez (UT)	Cor (UH)	Coliformes Fecais (NMP/100mL)	SDT (mg/L)	SST (mg/L)	pH	Óleos e graxas (mg/L)	DBO (mg/L)
CLASSE 1	Descarga de bacias sanitárias, lavagem de pisos e fins ornamentais (chafarizes, espelhos d'água, etc.), lavagem de roupas e de veículos	≤2	≤10	ND <sup>(1)</sup>	≤500	≤5	6-9	≤1	≤10
CLASSE 2	Lavagem de agregados, preparação de concreto, compactação do solo e controle de poeira.	---	---	≤1000	---	30	6-9	≤1	≤30
CLASSE 3 <sup>(2)</sup>	Irrigação de áreas verdes e rega de jardins	<5	<30	≤200	450-1500	<20	6-9	---	<20
CLASSE 4 <sup>(3)</sup>	Resfriamento de sistemas de ar condicionado (torres de resfriamento)	---	---	---	1000	5000	5-8,3	---	---

<sup>(1)</sup> ND - Não detectáveis

<sup>(2)</sup> Limite para Boro:

Irrigação de culturas alimentícias: 0,7 mg/L

Regas de jardim e similares: 3,0 mg/L

<sup>(3)</sup> Sem recirculação

A SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - já realiza e pretende ampliar ainda mais o reúso planejado de água em suas instalações de tratamento de água (recirculação de água de lavagem de filtros, por exemplo) e de esgotos. A Água de Reúso, que consiste no aproveitamento da água proveniente do tratamento de esgotos para fins não potáveis, é comercializada com Prefeituras da Região Metropolitana de São Paulo, que utilizam a alternativa para a limpeza de ruas, pátios, irrigação de culturas e áreas verdes, desobstrução de rede de esgotos e águas pluviais e limpeza de veículos. Para o setor industrial, a empresa está aberta a negócios em torno do reúso da água com sistemas apropriados de distribuição

A reutilização da água apresenta atrativos como menor custo e suprimento garantido. No aspecto qualidade, os riscos inerentes são gerenciados com adoção de medidas de planejamento, monitoramento, controle e sinalização adequados.

A Tabela 3.12 apresenta os critérios propostos pela SABESP para a água de reúso.

Tabela 3.12 Padrões de qualidade propostos pela SABESP para a água de reúso.

<b>Parâmetros</b>	<b>Proposta SABESP</b>
Cloro residual livre (mg/L)	2 - 6
DBO (mg/L)	<25
SST (mg/L)	<35
Coliformes Fecais (NMP/100mL)	<200
Turbidez (NTU)	<20
pH	6 - 9
Helmintos (ovo/L)	-
Óleos e graxas (mg/L)	Virtualmente ausentes

Fonte: Semura *et al*, 2005.

Em Porto Alegre, a Lei Nº10.506, de 5 de agosto de 2008, institui o Programa de Conservação, Uso Racional e Reaproveitamento das Águas. O programa visa a promoção de medidas necessárias à conservação, à redução do desperdício e à utilização de fontes alternativas para a captação e o aproveitamento da água nas edificações, bem como à conscientização dos usuários sobre a sua importância para a vida.

Esta lei estabelece no seu artigo 10 que as águas servidas (águas que foram utilizadas em tanques, pias, máquinas de lavar, bidês, chuveiros, banheiras e outros equipamentos) serão captadas e conduzidas a reservatórios destinados a abastecer as descargas de vasos sanitários ou mictórios. O regulamento desta lei definirá parâmetros e procedimentos visando à viabilidade técnica destas determinações

### 3.4.2 Critérios Internacionais

#### 3.4.2.1 WHO

Em 1973, a WHO (World Health Organization) desenvolveu diretrizes enfocando método de tratamento de efluentes, visando a proteção da saúde pública, intituladas “*Reuse of Effluents: Methods of Wastewater Treatment and Public Health Safeguards*”. Estas diretrizes foram atualizadas em 1989, com estudos epidemiológicos. Nesta revisão foram propostos critérios para o uso da água de reúso na agricultura e aqüicultura, sendo intitulada “*Health Guidelines for the Use of Wastewater in Agriculture and Aquaculture*”. Em 2006 foi apresentada a última revisão intitulada “*WHO guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater*”, que se subdivide em quatro volumes (*v.1. Policy and regulatory aspects — v.2. Wastewater use in agriculture — v.3. Wastewater and excreta use in aquaculture — v.4. Excreta and greywater use in agriculture.*) e enfoca o uso de água residuária, excreta e água cinza. Esta terceira edição é baseada em recentes evidências na área da saúde e utiliza novos métodos para estimar o risco associado a componentes químicos e microbiológicos ao qual a população está exposta.

As Tabelas 3.13 e 3.14 apresentam as diretrizes para a prática de reúso de água publicadas pela WHO para diversos usos.

Tabela 3.13 Qualidade microbiológica e tratamento requerido para o reúso de efluentes domésticos na agricultura conforme a WHO .

<b>Tipo de reúso</b>	<b>Limite para Coliformes Fecais (CF)</b>	<b>Limite para nematodos (ascaris e trichuris) (Ovos/100mL)</b>	<b>Tratamento Requerido</b>
Irrigação de culturas consumidas cruas, campos desportivos e parques públicos	1000 / 100 mL	1	Lagoas de estabilização em série, ou tratamento equivalente para obtenção da qualidade microbiológica.
Irrigação de culturas de cereais (industrializadas), forrageiras, pastagens e árvores	Não aplicável	1	Retenção em lagoas de estabilização com tempo de detenção variando de 8 a 10 dias, ou tratamento equivalente na remoção de helmintos e CF.
Irrigação localizada de culturas de cereais (industrializadas), forrageiras, pastagens e árvores, não ocorrendo a exposição de trabalhadores e do público.	Não aplicável	Não aplicável	Pré-tratamento indicado pela tecnologia de irrigação, sendo sempre superior à sedimentação primária.

Fonte: WHO (1989).

NOTA: No caso de irrigação de gramados onde o contato do público seja direto é recomendado o limite de 200 CF/100mL.

Tabela 3.14 Valores recomendados pela WHO para o monitoramento microbiológico para o uso de água residuária e excreta na agricultura e aquícultura.

<b>Atividade/Exposição</b>	<b>Parâmetros de monitoramento da qualidade da água</b>	
<b>Agricultura</b>	<b><i>E. Coli</i> por 100 mL (média aritmética)</b>	<b>Ovos de helmintos por litro (média aritmética)</b>
<b><i>Irrigação Irrestrita</i></b>		
Cultivo de raízes	$\leq 10^3$	$\leq 1$
Cultivo de folhas	$\leq 10^4$	
Irrigação por gotejamento para cultivo de alto crescimento	$\leq 10^5$	
<b><i>Irrigação Restrita</i></b>		
Agricultura com intensa mão-de-obra humana	$\leq 10^4$	$\leq 1$
Agricultura altamente mecanizada	$\leq 10^5$	
Tanque séptico	$\leq 10^6$	
<b>Aquícultura</b>	<b><i>E. Coli</i> por 100 mL (média aritmética)</b>	<b>Ovos viáveis de trematodos por litro</b>
<b><i>Consumidores</i></b>		
Lagoa	$\leq 10^4$	Não detectado
Água Residuária	$\leq 10^5$	Não detectado
Excreta	$\leq 10^6$	Não detectado
<b><i>Trabalhadores, Comunidade local</i></b>		
Lagoa	$\leq 10^3$	Sem ovos viáveis de trematodos
Água Residuária	$\leq 10^4$	Sem ovos viáveis de trematodos
Excreta	$\leq 10^5$	Sem ovos viáveis de trematodos

Fonte: WHO (2006)

### 3.4.2.2 EUA

Mundialmente o reúso planejado da água tem sido praticado com base, principalmente, nas diretrizes da EPA (Environmental Protection Agency), dos Estados Unidos. Estas diretrizes abordam especialmente os limites a serem atendidos pela água de reúso proveniente do tratamento de esgoto doméstico e os critérios que definem a qualidade requerida na água são estabelecidos de acordo com a finalidade a que se destinará (*fit-for-purpose*).

Existem legislações específicas para o reúso de água em vários estados norte-americanos. Para aqueles que não possuem padrões definidos, a EPA revisou em 2004 o manual “*Guidelines for Water Reuse*”, onde se encontram resultados de levantamentos sobre os sistemas existentes, legislações estaduais, dados consolidados, entre outros, além de critérios recomendados para o reúso de águas nos Estados Unidos. A Tabela 3.15 apresenta estes critérios.

Tabela 3.15 Diretrizes para reúso de água em diversos usos segundo a EPA.

<b>Tipo de reúso</b>	<b>Tratamento</b>	<b>pH</b>	<b>DBO (mg/L)</b>	<b>Turbidez (NTU)</b>	<b>Cl residual (mg/L)</b>	<b>SST (mg/L)</b>	<b>Limite máximo de CF</b>
Reúso Urbano - todos os tipos de irrigação paisagística (campos de golf, parques, cemitérios), lavagem de veículos, descarga em vaso sanitário, combate a incêndio, sistemas de ar-condicionado e outros usos com similar acesso ou exposição à água.	- Secundário - Filtração - Desinfecção	6 - 9	≤10	≤2	≥1	---	Ausente/ 100 mL
Irrigação de área com acesso restrito (Fazendas de gramas, áreas para silvicultura e outras áreas onde o acesso público é proibido, restrito ou raro).	- Secundário - Desinfecção	6 - 9	≤30	---	≥1	≤30	≤200/ 100mL
Reúso Agrícola - Culturas comercializadas sem processamento (Irrigação superficial ou por aspersão de qualquer cultura, incluindo alimentos consumidos crus).	- Secundário - Filtração - Desinfecção	6 - 9	≤10	≤2	≥1	---	Ausente/ 100 mL
Reúso Agrícola - Culturas comercialmente processadas (Irrigação superficial de pomares e vinhedos).	- Secundário - Desinfecção	6 - 9	≤30	---	≥1	≤30	<200/ 100mL
Reúso Agrícola - Culturas não-alimentícias (Pastagem para gado leiteiro; culturas de grãos, fibras e forragem).	- Secundário - Desinfecção	6 - 9	≤30	---	≥1	≤30	<200/ 100mL
Reúso Recreacional - Contato acidental (pescaria e esportes aquáticos) e contato corporal total permitido com água recuperada (mergulho e natação).	- Secundário - Filtração - Desinfecção	6 - 9	≤10	≤2	≥1	---	Ausente/ 100 mL

Tabela 3.15 Diretrizes para reúso de água em diversos usos segundo a EPA (Continuação).

<b>Tipo de reúso</b>	<b>Tratamento</b>	<b>pH</b>	<b>DBO (mg/L)</b>	<b>Turbidez (NTU)</b>	<b>Cl residual (mg/L)</b>	<b>SST (mg/L)</b>	<b>Limite máximo de CF</b>
Reúso na Construção - Compactação do solo, controle de poeira, lavagem de agregados, produção de concreto.	- Secundário - Desinfecção	---	≤30	---	≥1	≤30	≤200/ 100mL
Reúso Industrial	- Secundário - Desinfecção	6 - 9	≤30	---	≥1	≤30	≤200/ 100mL
Reúso Ambiental - <i>wetlands</i> , pântanos, preservação de <i>habitats</i> , aumento de vazões.	- Secundário - Desinfecção	---	≤30	---	---	≤30	≤200/ 100mL

Fonte: EPA (2004)

São sugeridos também pela EPA (2004), limites de concentração de sólidos dissolvidos totais (500-2000 mgL<sup>-1</sup>) e de metais para a irrigação por períodos curtos de tempo (até 20 anos) e períodos longos (acima de 20 anos). Estes limites estão apresentados na Tabela 3.16.

Tabela 3.16 Limites recomendados pela EPA para constituintes na água de reúso para irrigação.

<b>Elemento</b>	<b>Período longo (t&gt;20 anos), mgL<sup>-1</sup></b>	<b>Período curto (t≤20 anos), mgL<sup>-1</sup></b>
Alumínio	5	20
Arsênio	0,10	2
Berílio	0,10	0,5
Boro	0,75	2
Cádmio	0,01	0,05
Cromo	0,1	1
Cobalto	0,05	5
Cobre	0,2	5
Flúor	1	15
Ferro	5	20
Chumbo	5	10
Lítio	2,5	2,5
Manganês	0,2	10
Molibdênio	0,01	0,05
Níquel	0,2	2
Selênio	0,02	0,02
Vanádio	0,1	1
Zinco	2	10

Fonte: EPA (2004)

O reúso urbano irrestrito abrange, segundo a EPA, a irrigação de áreas nas quais não há restrições ao acesso do público, tais como parques, praças, pátios de escolas e residências, descargas de sanitários, ar-condicionado, combate a incêndio, construção civil, fontes ornamentais, etc. O estado da Califórnia (EUA) adotou sua primeira regulamentação para utilização da água de reúso para irrigação em 1918. Estes padrões têm sido atualizados com frequência, sendo a última em 2000, e servem de base para o desenvolvimento de padrões ao redor do mundo. A Tabela 3.17 apresenta os parâmetros adotados em alguns estados americanos para esta finalidade de reúso.

Tabela 3.17 Diretrizes para reúso urbano irrestrito em diversos estados dos EUA.

	Arizona	Califórnia	Flórida	Nevada	Texas	Washington
Tratamento	Secundário Filtração Desinfecção	Oxidação Coagulação Filtração Desinfecção	Secundário Filtração e alto nível de Desinfecção	Secundário Desinfecção	NE <sup>(1)</sup>	Oxidação Coagulação Filtração Desinfecção
DBO	NE	NE	20 mgL <sup>-1</sup>	30 mgL <sup>-1</sup>	5 mgL <sup>-1</sup>	30 mgL <sup>-1</sup>
SST	NE	NE	5 mgL <sup>-1</sup>	NE	NE	30 mgL <sup>-1</sup>
Turbidez	2 NTU (média)	2 NTU (média)	NE	NE	3 NTU	2 NTU (média)
	5 NTU (máximo)	5 NTU (máximo)				5 NTU (máximo)
Coliformes	Fecal	Total	Fecal	Fecal	Fecal	Total
	Não detectável	2,2/100 mL (média)	75% das amostras não detectáveis	2,2/100 mL (média)	20/100 mL (média)	2,2/100 mL (média)
	23/100 mL (máximo)	23/100 mL (máximo em 30 dias)	25/100 mL (máximo)	23/100 mL (máximo)	75/100 mL (máximo)	23/100 mL (máximo)

Fonte: EPA 2004

<sup>(1)</sup> NE - Não especificado.

### 3.4.2.3 Japão

O MLIT - *Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism*, define os critérios para a água de reúso utilizada no Japão. Os critérios adotados para vários usos urbanos estão apresentados na Tabela 3.18.

Tabela 3.18 Parâmetros de qualidade da água de reúso para fins urbanos no Japão.

Parâmetro	Unidade	Descarga em sanitários	Aspersão em ruas e solo	Uso recreacional
Coliformes Totais	Nº/100 mL	ND <sup>(1)</sup>	ND	ND
Turbidez	NTU	2	2	2
pH	unidade de pH	5,8 - 8,6	5,8 - 8,6	5,8 - 8,6
Aparência	---	Não desagradável	Não desagradável	Não desagradável
Cor	Unidade de cor			<10
Odor	---	Não desagradável	Não desagradável	Não desagradável
Cloro Residual	mgL <sup>-1</sup>	0,1 (livre) 0,4 (combinado)	0,1 (livre) 0,4 (combinado)	0,1 (livre) 0,4 (combinado)
Tratamento		Filtros de areia ou equivalente	Filtros de areia ou equivalente	Coagulação, Sedimentação e Filtração ou equivalente

Fonte: MLIT (2005) citado por Metcalf & Eddy (2006).

<sup>(1)</sup> ND - Não detectável.

### 3.4.2.4 Espanha

Os critérios de qualidade do efluente tratado, propostos pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) espanhol em 1999, serviram como referência para critérios adotados em regiões autônomas (Cataluña e Baleares) e aquelas com confederações hidrográficas (River Tajo). A Tabela 3.19 mostra os parâmetros propostos por diferentes regulamentações para reúso de água em aplicações urbanas.

Tabela 3.19 Comparação dos critérios de qualidade estabelecidos por diferentes normas para reúso urbano na Espanha.

Aplicação	Parâmetros	Proposta MMA	C.H. Tajo	Cataluña	Baleares
Usos e serviços urbanos; irrigação de campos de golf	Ovos de nematodos, ovosL <sup>-1</sup>	<1	<1	<1	<1
	E. coli, ufc/100 mL	<200	<200	<200	<200
	SST, mgL <sup>-1</sup>	<20	<25	<20	<30
	DBO <sub>5</sub> , mgL <sup>-1</sup>	---	<25	---	<20
	Turbidez, NTU	<10	---	<5	<5
	Cloro residual, mgL <sup>-1</sup>	---	---	---	0,3

Fonte: ESTEBAN e MIGUEL (2008).

Segundo SEMURA *et al.* (2005), os parâmetros adotados pela SABESP para a água de reúso foram baseados na norma espanhola, já que este país possuía larga experiência em tratamento de esgotos para fornecimento de água de reúso.

Após as regulamentações publicadas pela EPA (2004) e as diretrizes da WHO (2005), o MMA espanhol atualizou seus critérios. Os padrões para diversas aplicações são apresentados na Tabela 3.20.

Tabela 3.20 Critério de qualidade do efluente tratado para diversas aplicações, estabelecido pelo MMA espanhol.

Aplicação		Ovos de nematodos intestinais	E. Coli (ufc/100 mL)	Sólidos Suspensos (mgL <sup>-1</sup> )	Turbidez (NTU)
Reúso Urbano	Residencial - Rega de jardins, descarga em sanitários, sistemas de aquecimento ou refrigeração centrais.	<1 ovo/ 10 L	0	<10	<2
	Serviços Urbanos - Irrigação de parques, campos esportivos, lavagem de ruas, combate a incêndios, fontes e chafarizes, lavagem de veículos.	<1 ovo/ 10 L	<200	<20	<10
Reúso Agrícola	Irrigação de culturas consumidas cruas; árvores frutíferas irrigadas por aspersão.	<1 ovo/ 10 L	<200	<20	<10
	Irrigação de pastagens, alimentos enlatados, árvores frutíferas (exceto por aspersão); aquicultura	<1 ovo/ 1 L	<1.000	<35	NE <sup>(1)</sup>
	Irrigação de culturas industrialmente processadas, sementes de oleaginosas e cereais, flores decorativas.	<1 ovo/ 1 L	<10.000	<35	NE
Reúso Industrial	Refrigeração industrial, exceto da indústria alimentícia	NE	<10.000	<35	<15
Reúso Recreacional	Irrigação de campos de golf, lagos para uso recreacional (exceto banho).	<1 ovo/ 10 L	<200	<20	<10

Fonte: ESTEBAN e MIGUEL (2008).

<sup>(1)</sup> NE - Não especificado.

### 3.4.2.5 Tunísia

Devido à baixa disponibilidade de água para abastecimento, em 1989 um decreto regulamentou o uso de água recuperada na Tunísia para irrigação na agricultura. Foi levada em consideração a proteção da saúde dos cultivadores, consumidores e do meio ambiente. A irrigação dos vegetais que podem ser consumidos crus é proibida. A maioria do efluente tratado é utilizado na irrigação de vinhedos, árvores frutíferas (azeitonas, pêssegos, pêras, maçãs, etc.), pastagens (alfafa, sorgo, etc.), colheitas industriais (algodão, tabaco, etc.), cereais, campos de golfe e jardins de alguns hotéis. A Tabela 3.21 mostra os padrões usados pela Tunísia para o reúso agrícola.

Tabela 3.21 Padrões para água de reúso na irrigação agrícola na Tunísia.

Parâmetros	Valor Máximo Permitido
pH	6,5 – 8,5
Condutividade Elétrica, $\mu\text{Scm}^{-1}$	7.000
DQO, $\text{mgL}^{-1}$	90
DBO <sub>5</sub> , $\text{mgL}^{-1}$	30
Sólidos Suspensos, $\text{mgL}^{-1}$	30
Cloro, $\text{mgL}^{-1}$	2.000
Flúor, $\text{mgL}^{-1}$	3,0
Hidrocarbonetos Halogenados, $\text{mgL}^{-1}$	0,001
Arsênio, $\text{mgL}^{-1}$	0,1
Boro, $\text{mgL}^{-1}$	3,0
Cádmio, $\text{mgL}^{-1}$	0,01
Cobalto, $\text{mgL}^{-1}$	0,1
Cromo, $\text{mgL}^{-1}$	0,1
Cobre, $\text{mgL}^{-1}$	0,5
Ferro, $\text{mgL}^{-1}$	5,0
Manganês, $\text{mgL}^{-1}$	0,5
Mercúrio, $\text{mgL}^{-1}$	0,001
Níquel, $\text{mgL}^{-1}$	0,2
Chumbo, $\text{mgL}^{-1}$	1,0
Selênio, $\text{mgL}^{-1}$	0,05
Zinco, $\text{mgL}^{-1}$	5,0
Nematodos intestinais (média aritmética) n.º de ovos por litro	<1,0

Fonte: ANGELAKIS (1999)

#### *3.4.2.6 Israel*

Devido à combinação de severa escassez de água, contaminação dos recursos hídricos, densidade populacional em áreas urbanas e irrigação agrícola intensiva, o tratamento e reúso de efluentes estão no topo da lista de prioridades nacionais de Israel. Pela sua condição geográfica, o setor hídrico de Israel foi obrigado a oferecer soluções avançadas aos seus cidadãos. Situado em uma das regiões mais áridas do mundo, o país foi pioneiro e lidera os conceitos de gestão nacional de água, irrigação por gotejamento, reciclagem e purificação de efluentes, além de dessalinização da água. Israel possui hoje um dos sistemas de gestão da água mais avançados, com os métodos de irrigação mais desenvolvidos e a maior taxa de reutilização de efluentes do mundo.

Segundo INBAR (2007), devido ao aumento do reúso de água e com o objetivo de garantir a minimização de danos aos recursos hídricos, à flora, ao solo e à saúde pública, o governo de Israel decidiu, em 2005, revisar os critérios existentes e propor novas regulamentações para reúso de água. Os novos parâmetros (Tabela 3.22) exigem um alto nível de tratamento e permitem o reúso da água em irrigação irrestrita e descarga em rios e no mar.

Tabela 3.22 Parâmetros de qualidade para reúso de água na irrigação irrestrita e descarga em corpos d'água de Israel.

<b>Parâmetros</b>	<b>Irrigação Irrestrita</b>	<b>Descarga em rios</b>
Condutividade Elétrica, dSm <sup>-1</sup>	1,4	---
DBO, mgL <sup>-1</sup>	10	10
SST, mgL <sup>-1</sup>	10	10
DQO, mgL <sup>-1</sup>	100	70
N-NH <sub>4</sub> , mgL <sup>-1</sup>	20	1,5
N total, mgL <sup>-1</sup>	25	10
P total, mgL <sup>-1</sup>	5	1
Cloro, mgL <sup>-1</sup>	250	400
Flúor, mgL <sup>-1</sup>	2	---
Sódio, mgL <sup>-1</sup>	150	200
Coliformes fecais, unidades/100 mL	10	200
Oxigênio Dissolvido, mgL <sup>-1</sup>	>0,5	>3
pH	6,5-8,5	7,0-8,5
Cloro residual, mgL <sup>-1</sup>	1	0,05
Detergente aniônico, mgL <sup>-1</sup>	2	0,5
Óleo mineral, mgL <sup>-1</sup>	---	1
Boro, mgL <sup>-1</sup>	0,4	---
Arsênio, mgL <sup>-1</sup>	0,1	0,1
Mercúrio, mgL <sup>-1</sup>	0,002	0,0005
Cromo, mgL <sup>-1</sup>	0,1	0,05
Níquel, mgL <sup>-1</sup>	0,2	0,05
Selênio, mgL <sup>-1</sup>	0,02	---
Chumbo, mgL <sup>-1</sup>	0,1	0,008
Cádmio, mgL <sup>-1</sup>	0,01	0,005
Zinco, mgL <sup>-1</sup>	2	0,2
Ferro, mgL <sup>-1</sup>	2	---
Cobre, mgL <sup>-1</sup>	0,2	0,02
Manganês, mgL <sup>-1</sup>	0,2	---
Alumínio, mgL <sup>-1</sup>	5	---
Molibdênio, mgL <sup>-1</sup>	0,01	---
Vanádio, mgL <sup>-1</sup>	0,1	---
Berílio, mgL <sup>-1</sup>	0,1	---
Cobalto, mgL <sup>-1</sup>	0,05	---
Lítio, mgL <sup>-1</sup>	2,5	---
Cianeto, mgL <sup>-1</sup>	0,1	0,005

Fonte: INBAR (2007)

## 4 EXPERIMENTAL

### 4.1 MATERIAIS

#### 4.1.1 Água ácida de mina de carvão - DAM

Os estudos de neutralização, floculação e flotação por ar dissolvido de alta taxa (processo NF-FADAT) foram realizados com a Drenagem Ácida de Minas (DAM), da boca de mina extinta SS-16, localizada na comunidade de São Simão em Criciúma-SC (Figura 4.1). O córrego de água ácida possui um fluxo que varia entre 30-200 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup>. As principais características químicas e físico-químicas da DAM bruta são apresentadas na Tabela 4.1. No dia 29/11/2007 foi medido também o oxigênio dissolvido no córrego de DAM, apresentando valor médio de 8,6 mgL<sup>-1</sup>.



Figura 4.1 Boca de mina SS-16 no município de Criciúma-SC.

Tabela 4.1 Características químicas e físico-químicas da DAM bruta.

Parâmetro	Bruta										Média	Desvio Padrão
	17/5/07	29/6/07	12/7/07	23/7/07	24/7/07	17/8/07	5/9/07	29/11/07	30/11/07	6/12/07		
pH	3,0	2,4	2,7	3,1	3,1	3	3,1	3	3,1	3,1	<b>3,0</b>	<b>0,2</b>
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> , mgL <sup>-1</sup>	815	779	285	712	679	544	512	594	680	623	<b>622</b>	<b>152</b>
Mn, mgL <sup>-1</sup>	2,9	2,1	2,3	1,9	1,7	2,2	1,5	1,8	1,7	1,7	<b>2,0</b>	<b>0,4</b>
Fe, mgL <sup>-1</sup>	2,6	3	2,1	1,4	1,4	1,1	1,2	0,3	0,4	0,6	<b>1,4</b>	<b>0,9</b>
Al, mgL <sup>-1</sup>	37	34	33	38	28	34	30	27	26	26	<b>31</b>	<b>4</b>
Condutividade, µScm <sup>-1</sup>	1400	1153	1405	1335	1293	1271	1270	1316	1294	1158	<b>1290</b>	<b>85</b>
Cor, Hazen	15	19	12	21	22	8	9	8	7	6	<b>13</b>	<b>6</b>
COT, mgL <sup>-1</sup>	-	0,9	0,7	0,7	0,6	0,6	0,5	0,7	0,6	0,5	<b>0,6</b>	<b>0,1</b>
Tensão Superficial, mNm <sup>-1</sup>	-	65	72	71	68	65	74	74	74	74	<b>71</b>	<b>4</b>
Turbidez, NTU	1,2	0,3	0,4	0,8	0,5	0,6	0,3	1	1	1	<b>0,7</b>	<b>0,3</b>
Dureza, mgL <sup>-1</sup> de CaCO <sub>3</sub>	-	274	427	242	227	405	500	428	391	421	<b>368</b>	<b>96</b>
Sólidos Dissolvidos, mgL <sup>-1</sup>	1347	1279	1250	1048	1003	974	937	1054	1029	1222	<b>1114</b>	<b>145</b>

Foram realizadas análises para verificar a presença de outros parâmetros inorgânicos na DAM (Tabela 4.2). Estas foram realizadas no Laboratório de Análises de Solo da UFRGS, e são comparadas com os limites do CONAMA 357 para emissão de efluentes.

Tabela 4.2 Análises complementares de parâmetros inorgânicos na DAM Bruta.

<b>Parâmetro</b>	<b>Medida da DAM (mgL<sup>-1</sup>)</b>	<b>Metodologia aplicada / LD<sup>(1)</sup> (mgL<sup>-1</sup>)</b>	<b>Padrão CONAMA 357 (mgL<sup>-1</sup>)</b>
Bário Total	0,02	ICP-OES <sup>(5)</sup> / 0,01	5,0
Boro Total	0,07	EAM <sup>(2)</sup> /curcumina / 0,01	5,0
Cádmio Total	<0,002	ICP-OES / 0,002	0,2
Chumbo Total	0,02	ICP-OES / 0,02	0,5
Cromo Total	0,005	ICP-OES / 0,004	0,5
Cobre Dissolvido <sup>(4)</sup>	0,1	EAA / 0,03	1,0
Mercúrio Total	<0,0002	EAA <sup>(3)</sup> /vapor frio, SnCl <sub>2</sub> / 0,0002	0,01
Níquel Total	0,15	ICP-OES / 0,002	2,0
Zinco Total	0,61	ICP-OES / 0,02	5,0

<sup>(1)</sup>Limite de Detecção;

<sup>(2)</sup>Espectrofotômetro de Absorção Molecular;

<sup>(3)</sup>Espectrofotômetro de Absorção Atômica;

<sup>(4)</sup>Análise realizada no LTM;

<sup>(5)</sup> Espectrometria de emissão com plasma indutivamente acoplado;

#### 4.1.2 Reagentes

Os reagentes utilizados nos ensaios a pH 7 e 9 foram Ca(OH)<sub>2</sub> (cal calcítica hidratada da Qualical) para ajuste de pH (neutralização) e precipitação, e FLONEX 9045 (polímero catiônico de alto peso molecular) na formação dos flocos. Na etapa de flotação, utilizou-se também ácido oléico como agente hidrofobizante (“coletor”).

A pH 12 foram utilizados, além de cal e ácido oléico, PAC TE 1018 (policloreto de alumínio) e Alupan K (aluminato de potássio) para precipitar íons sulfato na forma de etringita, além de Qemifloc 1020 PWG (polímero não-iônico) para formação dos flocos (CADORIN, 2007).

Os flocculantes e o coletor foram dissolvidos em água potável, fornecida pela CASAN (Companhia Catarinense de Águas e Saneamento), antes de serem dosados no sistema.

Todos os reagentes usados foram de caráter comercial e pré-determinados em estudos na escala laboratorial.

#### 4.1.3 Equipamentos

Os equipamentos presentes na estação de tratamento SS-16 e utilizados no estudo foram:

##### **Unidade de preparo e dosagem de floculante**

Esta unidade é composta por:

- Um tanque de poliestireno com 20 litros de capacidade e um misturador do tipo hélice
- Uma bomba dosadora peristáltica (marca Exatta®).

##### **Unidade de preparo e dosagem do ácido oléico**

- Um tanque de poliestireno com 20 litros de capacidade e um misturador do tipo hélice
- Uma bomba dosadora peristáltica (marca Exatta®).

##### **Unidade de ar comprimido**

- Um compressor da marca Wind Pressure, modelo WP 10/130 2 HP

##### **Bombas de alimentação**

- Uma bomba centrífuga para alimentação de DAM nos tanques de neutralização/precipitação
- Uma bomba helicoidal (Netzsch® – Modelo 2NE-30A) para alimentação do efluente na unidade de separação sólido/líquido
- Uma bomba centrífuga multifase (BCMF-Edur™)

##### **Unidade de neutralização/precipitação**

- Dois tanques de fibra de vidro de 2 m<sup>3</sup>
- Dois agitadores do tipo hélice

##### **Unidade de floculação**

- Um Floculador Serpentinado (FS)

Atua como dispersante do polímero adicionado, com elevado gradiente de velocidade ( $> 1800 \text{ s}^{-1}$ ) e curto tempo de residência ( $< 5 \text{ s}$ ). O FS utilizado, constituído por tubos de cloreto de polivinila (PVC) de 1" de diâmetro interno, está apresentado na Figura 4.2

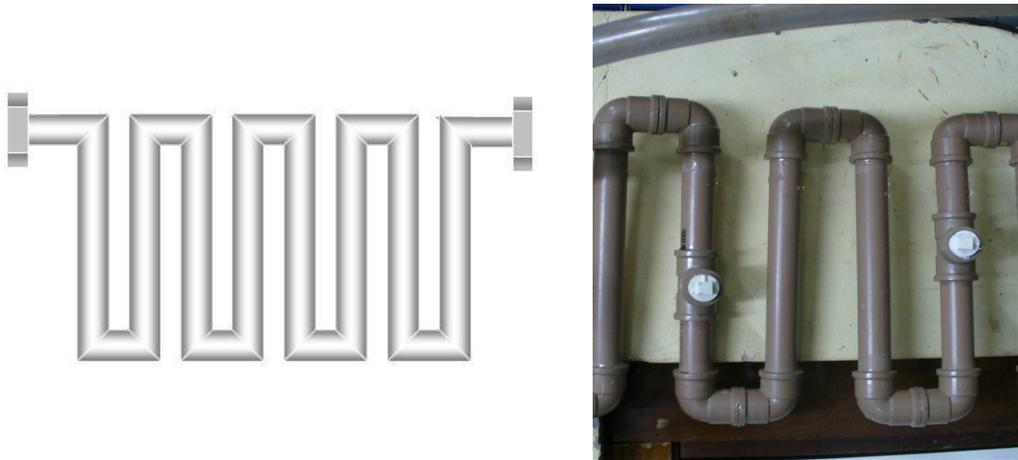


Figura 4.2 Unidade de floculação hidráulica em linha (FS – Floculador Serpentinado), usada como condicionador do RGF<sup>®</sup>

- Um Reator Gerador de Flocos (RGF<sup>®</sup>)

O RGF<sup>®</sup> consiste em um reator helicoidal para a agregação de partículas e aumento do tamanho dos flocos, sendo caracterizado por um gradiente de velocidade próximo a  $1000 \text{ s}^{-1}$ . A agitação necessária é realizada com o aproveitamento da energia cinética do fluxo hidráulico ao longo do reator tubular helicoidal (CARISSIMI, 2007). O RGF<sup>®</sup> é mostrado na Figura 4.3, sendo constituído por um tubo flexível (mangueira comercial trançada com fio de poliéster) com diâmetro interno de  $\frac{1}{2}$ " envolto na parte externa de uma coluna rígida de PVC, com um raio interno de 0,05 m.

Os principais parâmetros e características dos equipamentos utilizados na geração de flocos são apresentados na Tabela 4.3

Tabela 4.3 Parâmetros de construção e operacionais dos flocladores hidráulicos usados na etapa de geração de flocos

Floculador hidráulico	Parâmetros	Valores
FS – Floculador Serpentinado	Número de elementos do floculador	8
	Comprimento dos elementos, m	0,7
	Diâmetro de tubos, polegadas	1”
	Tempo de residência, s	5
	Gradiente de velocidade (G), s <sup>-1</sup>	1880
RGF <sup>®</sup> – Reator Gerador de Flocos	Número de anéis	19
	Diâmetro de tubos, polegadas	½”
	Comprimento, m	12
	Volume, m <sup>3</sup>	5,9 x 10 <sup>-3</sup>
	Tempo de residência, s	18
	Gradiente de velocidade (G), s <sup>-1</sup>	1050

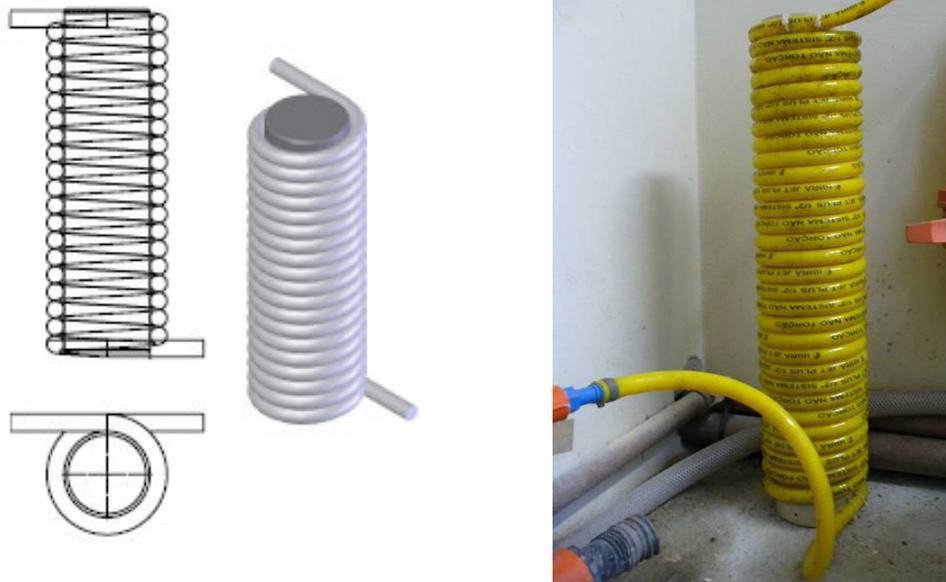


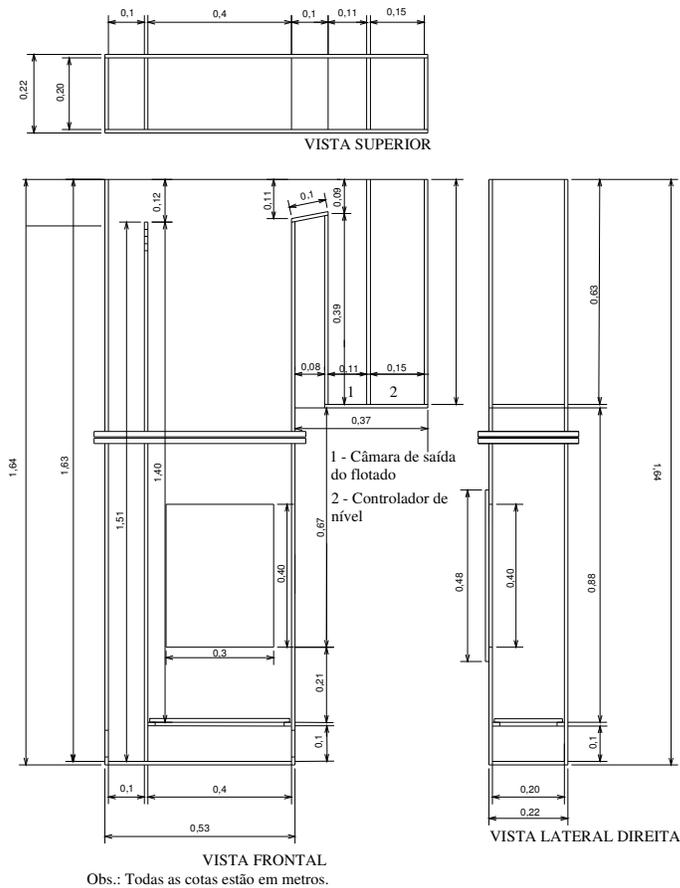
Figura 4.3. RGF<sup>®</sup> - Reator Gerador de Flocos, com detalhes na Tabela 4.3

### Unidade de separação sólido/líquido

As características hidráulicas e construtivas da célula de flotação por ar dissolvido de alta taxa (FADAT), que foi projetada, construída e montada na estação SS-16, são apresentadas na Tabela 4.4 e Figura 4.4, respectivamente.

Tabela 4.4 Parâmetros hidráulicos da célula FADAT – Flotação por Ar Dissolvido de Alta Taxa

Processo	Parâmetro	Valor
FADAT – Célula de Flotação por Ar Dissolvido de Alta taxa	Volume útil, m <sup>3</sup>	0,15
	Tempo de residência, s	594
	Taxa de aplicação, m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup>	13



(a) (b)  
 Figura 4.4 Características construtivas (a) e imagem da célula FADAT (b) utilizada neste estudo.

A célula de separação em escala piloto de 1-1,5 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> foi construída em acrílico, com peças de fixação em aço inoxidável e a tubulação e demais singularidades em PVC com diâmetro de 40 mm. O tanque de separação possui uma grande profundidade e lamelas (placas paralelas de 15x15 cm, inclinadas em 130° no sentido anti-horário) na parte superior, para permitir que as microbolhas, que eventualmente são arrastadas com o fluxo hidráulico para a região inferior da célula, possam ficar aderidas nas lamelas, coalescer, retornar à superfície e serem removidas juntamente com o material flotado.

Ainda, o fundo do tanque é constituído por uma placa perfurada, permitindo que o fluxo da água tratada seja laminar, sem turbulências.

A estação piloto de tratamento SS-16 em Criciúma-SC, onde foi desenvolvido este estudo, é mostrada em detalhes na Figura 4.5



Figura 4.5 Estação piloto de tratamento de DAM-SS16-Criciúma/SC (a); Tanques de neutralização/precipitação dos íons metálicos e íons sulfato (b); Instrumentação para controle de vazão e pressão (c); Detalhe da célula FADAT (d).

## 4.2 METODOLOGIA

A DAM-SS16 foi captada do córrego, cuja vazão é apresentada na Figura 4.6, usando uma moto-bomba centrífuga e destinada a dois reservatórios (volume de  $2 \text{ m}^3$ ) para a neutralização/precipitação em batelada. A vazão média do córrego, medida entre 2003 e 2007 pelo SIECESC, foi de  $82 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ . As medidas foram realizadas com auxílio de molinete e em três pontos no perfil do córrego.

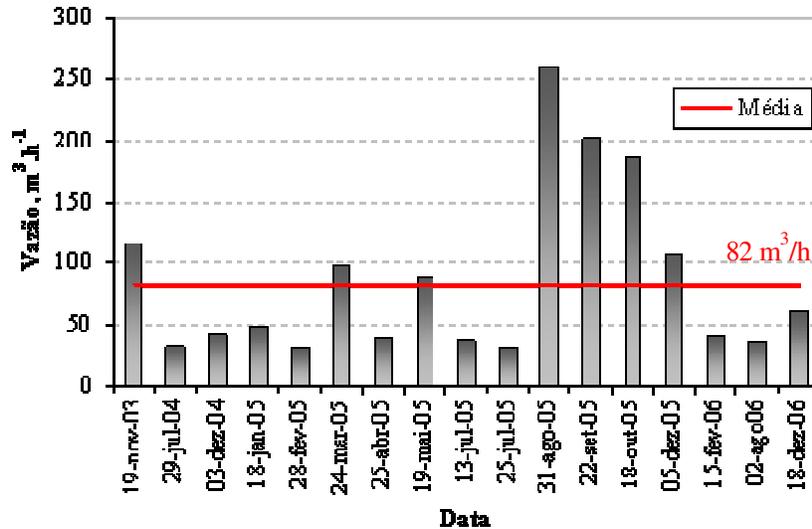


Figura 4.6 Vazão do córrego de DAM-SS16 na comunidade São Simão-Criciúma/SC.

A neutralização/precipitação ocorreu pela adição de cal comercial à DAM, mantida sob agitação constante nos tanques de 2 m<sup>3</sup>. Após a neutralização da DAM e precipitação dos metais nos tanques, uma bomba helicoidal (Netsch® – Modelo 2NE-30A) alimentava a suspensão resultante no sistema de floculação em linha e na célula de flotação (FADAT). A floculação dos precipitados foi realizada utilizando floculadores hidráulicos em linha, desenvolvidos pelo LTM/UFRGS (Floculador Serpentinado e Reator Gerador de Flocos®). Bombas dosadoras (Exatta®) foram empregadas na adição da solução de polímero floculante e do agente hidrofobizante na corrente de alimentação dos floculadores.

A vazão nominal da célula FADAT foi mantida em aproximadamente 1 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup>. A Figura 4.7 apresenta o desenho esquemático do sistema empregado nos estudos de tratamento da DAM.

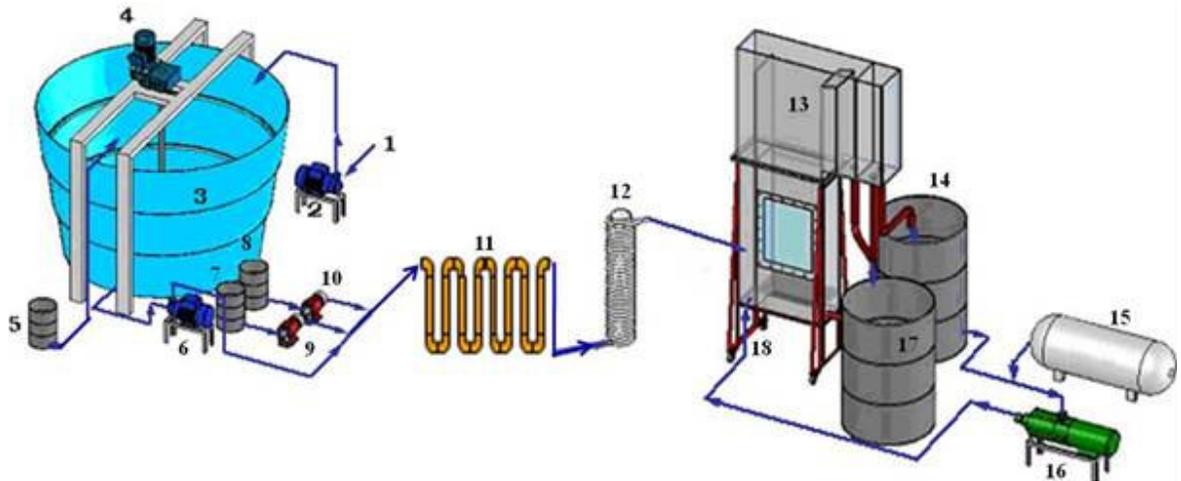


Figura 4.7 Estação piloto projetada para o tratamento de DAM-SS16-Criciúma/SC  
(Processo NF-FADAT)

1 – Captação de DAM	12 – Reator Gerador de Flocos (RGF <sup>®</sup> )
2 – Bomba de captação de DAM	13 – Célula de Flotação (FADAT)
3 – Tanque de neutralização/precipitação	14 – Tanque de armazenamento de água tratada
4 – Agitador mecânico	15 – Compressor de ar
5 – Tanque de cal	16 – Bomba multifase (reciclo de água saturada)
6 – Bomba de alimentação	17 – Tanque de armazenamento do lodo gerado
7 – Tanque de floculante	18 – Válvula agulha (geração de bolhas)
8 – Tanque de “coletor”	
9 e 10 – Bombas dosadoras de reagentes	
11 – Floculador Serpentinado	

#### 4.2.1 Estudos de neutralização de DAM – Consumo de cal

Foram realizados testes de neutralização do efluente em bancada, visando quantificar o consumo da cal comercial usada na neutralização e precipitação das espécies metálicas contidas na drenagem ácida estudada (DAM-SS16). Nesses ensaios, um volume de 500 ml de DAM, mantida em um béquer sob agitação magnética, foi neutralizado com cal (Qualical). O pH da amostra foi monitorado e a quantidade de cal utilizada (em mg) foi determinada para os distintos valores de pH com o auxílio de uma balança analítica (SARTORIUS®, modelo BP 210 S, precisão de  $\pm 0,1$  mg).

#### 4.2.2 Precipitação química de íons metálicos – Efeito do pH

Devido à característica da drenagem ácida estudada, com diferentes espécies e diferentes concentrações de íons de metais presentes em solução, foi necessário avaliar e comparar diferentes faixas de pH na precipitação dos hidróxidos metálicos. Estudos de precipitação química, floculação e separação sólido-líquido em uma célula de flotação (FADAT) foram realizados em três níveis de pHs para avaliar a eficiência de remoção dos íons de metais e do ânion sulfato da DAM-SS16. Os valores de pHs estudados foram 7, 9 e 12 e a eficiência do processo foi determinada pela remoção dos íons ferro, manganês, alumínio e sulfato.

Na estação SS-16, a cal era adicionada aos tanques de neutralização/precipitação e estes foram mantidos sob agitação constante, com agitadores do tipo hélice. O pH foi monitorado com o auxílio do pHmetro Analion PM 608. Após atingir o valor de pH desejado, iniciava-se a etapa de floculação e flotação com a alimentação da célula FADAT.

#### 4.2.3 Precipitação química do ânion sulfato ( $\text{SO}_4^{-2}$ )

Nos estudos a pH 12 para remoção de sulfato, após a adição de cal e alcançado o pH desejado, foram adicionados  $1 \text{ mL}^{-1}$  de PAC TE 1018,  $0,5 \text{ mL}^{-1}$  de Alupan K para proporcionar a condição estequiométrica de formação da etringita (CADORIN, 2007). Em seguida, o sistema foi mantido sob agitação constante por um período de 30 min e, a seguir, encaminhado à unidade de floculação em linha. A etringita apresenta a fórmula  $3\text{CaO} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ , que se forma, *in situ*, após atingir o equilíbrio entre as concentrações de cálcio, sulfato e alumínio. Maiores detalhes são relatados por Cadarin (2007).

#### 4.2.4 Floculação hidráulica dos precipitados

Os estudos de floculação empregando a DAM-SS16, com a aplicação dos reatores de floculação hidráulica em série (FS e RGF, nessa ordem), foram realizados a pH 7 e 9 com o polímero floculante Flonex 9045 (poliacrilamida catiônica) e a pH 12 com Qemifloc 1020 PWG (polímero não-iônico) para formação dos flocos. A concentração utilizada de ambos floculantes foi  $5 \text{ mgL}^{-1}$ . A “solução-mãe” foi

preparada com concentração de  $1000 \text{ mgL}^{-1}$  e mantida em reservatório de poliestireno com 20 litros de capacidade e um misturador do tipo hélice. A solução foi aplicada em linha utilizando-se uma bomba dosadora peristáltica.

#### 4.2.5 Hidrofobização dos flocos formados

O agente hidrofobizante (coletor) utilizado no estudo foi o ácido oléico, cuja “solução-mãe” foi preparada com concentração de  $4000 \text{ mgL}^{-1}$  em um reservatório de poliestireno com 20 litros, com um misturador do tipo hélice. A solução foi aplicada em linha usando uma bomba dosadora peristáltica, logo após a adição do polímero floculante. Para os estudos a pH 7 e 9 foram aplicados  $15 \text{ mgL}^{-1}$  de ácido oléico e, para pH 12,  $30 \text{ mgL}^{-1}$ .

#### 4.2.6 Separação sólido-líquido por FADAT – Flotação por Ar Dissolvido de Alta Taxa

Após a formação e condicionamento dos flocos, estes eram encaminhados à célula FADAT para a separação sólido-líquido e finalização do tratamento da DAM. Parte da água clarificada era coletada na parte inferior da célula e saturada com ar comprimido antes de ser novamente injetada na célula (água de reciclo). Esta injeção foi feita utilizando-se um constritor de fluxo (válvula agulha), proporcionando a depressurização e liberação do ar contido no líquido na forma de microbolhas. O ar utilizado para saturação da água foi proveniente de um compressor de ar e a injeção de microbolhas ocorria logo abaixo da alimentação dos flocos na célula. A taxa de reciclo da água saturada foi de 30% para os estudos a pH 7 e 9 e 40% para pH 12. A pressão de saturação foi de  $8 \text{ kgf/cm}^2$ .

#### 4.2.7 Sistema de coleta e preservação de amostras

Os estudos de tratamento da DAM-SS16 foram realizados em bateladas, em tanques de  $2 \text{ m}^3$ . A vazão de tratamento foi mantida constante em aproximadamente  $1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ . Sendo que o tanque não era completamente cheio para que a agitação não causasse o transbordamento e que antes de iniciar as coletas era necessário aguardar o preenchimento de todos os equipamentos com a DAM, cada batelada tinha duração aproximada de 80 minutos. As amostras (500 mL) eram coletadas a cada 20 minutos

com o auxílio de uma proveta graduada, produzindo uma amostra composta de 2L que era, a seguir, separada em frascos e preservada de acordo com os parâmetros a serem analisados. A Tabela 4.5 apresenta as medidas adotadas quanto ao tipo de frasco e preservação adequada para cada parâmetro.

Tabela 4.5 Medidas de preservação de amostras adotadas no estudo.

Parâmetro	Frasco	Preservação
pH	P, V	Análise imediata
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	P, V	Refrigeração
Mn		
Fe	P	Adição de HNO <sub>3</sub> até pH<2
Al		
Condutividade	P, V	Refrigeração
Cor	P, V	Refrigeração
COT	V	Refrigeração; Adição de H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ou H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> até pH<2
Turbidez	P, V	Refrigeração; Armazenamento em frasco escuro
Dureza	P, V	Adição de HNO <sub>3</sub> até pH<2
Sólidos	P, V	Refrigeração

Fonte: APHA *et al.*, 1995. (P = plástico; V = vidro)

Também foram feitas análises para verificar a ocorrência de variações na qualidade da DAM tratada em relação ao tempo de ensaio em cada batelada, que poderiam ser causadas devido ao maior tempo de detenção da DAM sob agitação no pH ajustado. Nestes casos, as amostras coletadas a cada período de 20 minutos não foram misturadas e sim analisadas individualmente.

#### 4.2.8 Neutralização da DAM-SS16 após tratamento a pH 12

Após a etapa de separação sólido-líquido da DAM tratada a pH 12, foi necessário a neutralização da água para posterior reúso ou mesmo descarte no meio ambiente. Estudos mostraram que a adição de 2 mL<sup>-1</sup> de HCl 10% é suficiente para que o pH fique próximo a 7,5 (CARISSIMI *et al.*, 2007).

#### 4.2.9 Análise de contaminações orgânicas e biológicas

Para uma caracterização mais completa do efluente a ser tratado e da qualidade da água a ser fornecida para a comunidade, foram feitas análises para determinar a presença de fenóis, surfactantes, óleos e graxas, DBO<sub>5</sub> e coliformes (fecais e totais). Essas análises foram realizadas pela Laborquímica - Laboratório de Análises Químicas (Canoas/RS) e as metodologias empregadas para cada parâmetro são apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 Metodologias aplicadas nas análises de contaminações orgânicas e biológicas da DAM-SS16.

Parâmetro	Unidade	Metodologia	Limite de Detecção
D.B.O., 5 dias	mg/l O <sub>2</sub>	Potenciometria-Eletrodo de Membrana	1,0
Fenóis	mg/l C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH	Espectroscopia de Absorção Molecular UV-V CHCl <sub>3</sub>	0,001
Surfactantes	mg/l ABS	Espectroscopia de Absorção Molecular-Azul Metileno	0,01
Óleos e Graxas Minerais	mg/l	Gravimetria-Partição	5,0
N.M.P. Coliformes fecais	N.M.P./ 100 ml	Substrato Enzimático	2,0
N.M.P. Coliformes totais	N.M.P./ 100 ml	Substrato Enzimático	2,0

#### 4.2.10 Verificação do teor de sólidos no lodo gerado pelo processo de tratamento NF-FADAT

Foram coletadas quatro amostras de lodo flotado em diferentes bateladas de tratamento da DAM-SS16 pelo processo NF-FADAT a pH 9. Também foram analisadas amostras de duas bateladas de tratamento da DAM-SS16 a pH 12. O lodo, analisado no Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental, foi pesado (utilizando-se uma balança analítica - SARTORIUS<sup>®</sup>, modelo BP 210 S, precisão de ± 0,1 mg) em béquer de 50 mL e colocado para secar a 103-105°C. Depois de seca, a amostra foi novamente pesada, determinando a quantidade e o percentual de sólidos presentes.

#### 4.2.11 Pré-avaliação econômica

Com o objetivo de avaliar os custos envolvidos na operação do processo NF-FADAT, foi realizado um monitoramento do consumo energético e de reagentes na operação da planta piloto. O consumo energético, em kWh, foi acompanhado no relógio de medição instalado na planta piloto. A estimativa dos custos pelo consumo de reagentes foi realizada com base nas concentrações aplicadas para cada um dos pHs analisados no tratamento da DAM-SS16, além dos custos comerciais atualizados dos mesmos.

### 4.3 TÉCNICAS ANALÍTICAS

A turbidez foi analisada com um turbidímetro da marca Hach modelo 2100N. A medida feita pelo princípio nefelométrico, consiste na leitura da luz desviada pelas partículas em um ângulo de 90° em relação à luz incidente. O resultado é expresso em NTU (unidades nefelométricas de turbidez).

A cor aparente foi analisada em um equipamento de absorção molecular Merck modelo SQ 118, e os resultados expressos em unidades Hazen de cor (equivalentes a  $\text{mgL}^{-1}$  Pt-Co).

As análises de sólidos totais foram realizadas de acordo com o método gravimétrico, a partir da evaporação da amostra a 103-105°C e pesagem (utilizando-se uma balança analítica) em béquer até constância da massa. A análise de sólidos suspensos corresponde à fração remanescente em filtro com porosidade de 1,2  $\mu\text{m}$  (marca Schleicher e Schuell). A concentração de sólidos dissolvidos foi determinada pela diferença entre a concentração de sólidos totais e sólidos suspensos. Todos os resultados de sólidos foram expressos em  $\text{mgL}^{-1}$ .

A determinação da condutividade elétrica foi realizada utilizando o medidor de condutividade Digimed modelo DM-3P, cujo resultado é expresso em  $\mu\text{Scm}^{-1}$  a 25°C.

A dureza total foi determinada pelo método titulométrico com EDTA, e o resultado expresso em  $\text{mgL}^{-1}$  de  $\text{CaCO}_3$ .

A tensão superficial foi medida em duplicata em um tensiômetro NIMA modelo DST 9005, sendo este método baseado no princípio do anel Du Noüy. Este método baseia-se na força que é necessária exercer sobre um anel de platina para separá-lo da

superfície de um líquido. Os erros são da ordem de 0,5% e os resultados são expressos em  $\text{mNm}^{-1}$ .

A análise de sulfato foi realizada pelo método turbidimétrico com o equipamento Hach modelo 2100N e expressa em  $\text{mgL}^{-1}$ . Este método tem como princípio a reação entre o sulfato e o cloreto de bário formando precipitados cristalinos de sulfato de bário.

As medidas de pH e oxigênio dissolvido foram realizadas em campo (na estação de tratamento) empregando o pHmetro Analion PM 608 e oxímetro DigimedDM-4P, respectivamente.

Os metais foram analisados pelo método AAS (Espectrofotometria de Absorção Atômica-por chama) no equipamento SPECTRAA-110 Marca Varian e expressos em  $\text{mgL}^{-1}$ .

O COT (Carbono Orgânico Total) foi analisado por Absorção em Infravermelho Não Dispersivo no modelo Semi-Automatic Benchtop StarToc - Marca Star instruments, Inc., sendo expresso em  $\text{mgL}^{-1}$ .

Todas as análises foram realizadas de acordo com o *Standard Methods for Water and Wastewater Examination* (Apha et al., 1995).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 ESTUDO DE LABORATÓRIO

#### Curvas de neutralização/precipitação de DAM

A Figura 5.1 apresenta a curva de neutralização (“titulação”) da DAM-SS16 usando cal calcítica hidratada da Qualical.

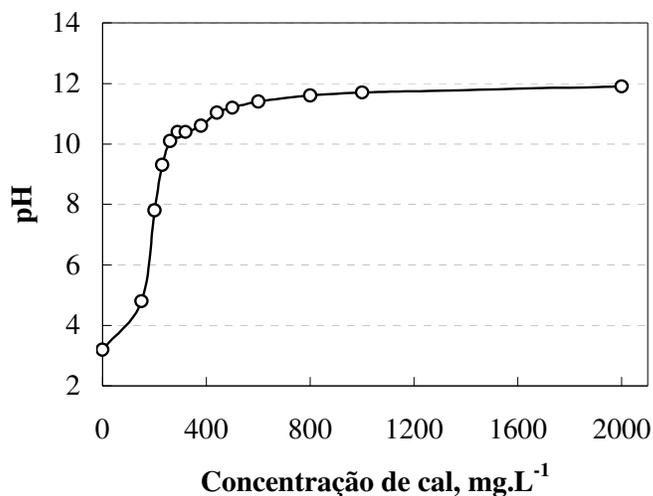


Figura 5.1 Curva de titulação (concentração de cal versus pH) da DAM-SS16 utilizando cal calcítica hidratada (Qualical).

A titulação demonstrou que a quantidade de cal necessária para atingir os pHs 7 e 9 é bastante similar, sendo aproximadamente 200 e 250 mgL<sup>-1</sup>, respectivamente. Para elevar o pH da DAM-SS16 até 12, são necessárias aproximadamente 2000 mgL<sup>-1</sup> de cal, o que eleva consideravelmente os custos desta etapa.

### 5.2 ESTUDO PILOTO DE TRATAMENTO DA DAM-SS16 PELO PROCESSO NF-FADAT

#### 5.2.1 Estudo piloto de tratamento da DAM-SS16 a pH 7

A Tabela 5.1 apresenta as características da DAM após tratamento por NF-FADAT a pH 7.

Tabela 5.1 Características físico-químicas das amostras DAM-SS16 tratadas a pH 7 pelo processo NF-FADAT.

<b>5.2.1.1.1.1 Parâmetro</b>	<b>Ensaio A 12/7/07</b>	<b>Ensaio B 05/9/07</b>	<b>Ensaio C 29/11/07</b>
pH	7,0	7,3	7,0
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> , mgL <sup>-1</sup>	268	534	518
Mn, mgL <sup>-1</sup>	0,8	1,1	1,5
Fe, mgL <sup>-1</sup>	LOD	0,1	0,2
Al, mgL <sup>-1</sup>	3,6	5,6	LOD
Condutividade, µScm <sup>-1</sup>	1239	1083	1062
Cor, Hazen	9	9	4
COT, mgL <sup>-1</sup>	1,3	1,3	0,7
Tensão Superficial, mNm <sup>-1</sup>	68	73	73
Turbidez, NTU	9	1	6
Dureza, mgL <sup>-1</sup> de CaCO <sub>3</sub>	728	636	614
Sólidos Dissolvidos, mgL <sup>-1</sup>	1190	964	1077

\*LOD: abaixo do limite de detecção do equipamento (Limite inferior de detecção do Espectrômetro de Absorção Atômica: Fe – 0,06 mgL<sup>-1</sup>; Al – 0,3 mgL<sup>-1</sup>; Mn – 0,02 mgL<sup>-1</sup>).

Nestes estudos, a concentração residual do Mn apresenta-se fora do limite de emissão de efluentes (1 mgL<sup>-1</sup>), estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005, nos ensaios B e C. Este fato demonstra que a remoção deste íon a pH 7 é incompleta, sendo que a faixa de pH em que ocorre a precipitação de Mn é normalmente de 9,0-9,5. Além disso, a baixa concentração deste íon na DAM bruta também reduz a eficiência do processo de tratamento.

Também foram realizados ensaios visando analisar as variações nas características da água tratada ao longo do tempo. As amostras foram coletadas em intervalos de 20 minutos e os resultados a pH 7 estão apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 Características físico-químicas da água tratada pelo processo NF-FADAT a pH 7 em função do tempo de ensaio em uma batelada (29/11/2007).

Parâmetro	Ensaio D			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
	20 min	40 min	60 min	80 min
pH	7	7	7	7
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> , mgL <sup>-1</sup>	593	573	564	563
Mn, mgL <sup>-1</sup>	1,4	1,5	1,5	1,6
Fe, mgL <sup>-1</sup>	0,2	0,3	0,3	0,3
Al, mgL <sup>-1</sup>	LOD	LOD	LOD	LOD
Condutividade, µScm <sup>-1</sup>	1027	1052	1060	1067
Cor, Hazen	6	5	6	7
COT, mgL <sup>-1</sup>	0,5	0,6	0,7	0,4
Tensão Superficial, mNm <sup>-1</sup>	74	73	73	73
Turbidez, NTU	11	11	13	10
Dureza, mgL <sup>-1</sup> de CaCO <sub>3</sub>	640	643	640	643
Sólidos Dissolvidos, mgL <sup>-1</sup>	1012	1062	995	1084

\*LOD: abaixo do limite de detecção do equipamento (Limite inferior de detecção do Espectrômetro de Absorção Atômica: Fe – 0,06 mgL<sup>-1</sup>; Al – 0,3 mgL<sup>-1</sup>; Mn – 0,02 mgL<sup>-1</sup>).

As concentrações residuais dos metais Fe e Mn, bem como a condutividade das amostras tratadas, mostram uma ligeira elevação ao longo do ensaio. Este fato pode ter ocorrido devido apenas ao erro inerente ao método de análise e/ou processo, como um mau ajuste do pH da DAM no tanque de neutralização/precipitação, tendo sido medido antes da completa mistura da cal adicionada. Neste ensaio, a concentração residual de Mn excedeu o limite de emissão de efluentes do CONAMA 357/2005 em todas as análises. Não houve praticamente nenhuma remoção do íon Fe, devido à concentração deste íon já ser extremamente baixa na DAM bruta (0,3 mgL<sup>-1</sup>). Apesar da baixa eficiência de remoção de Fe e Mn, todos os íons metálicos analisados na DAM tratada encontram-se dentro dos padrões exigidos pela EPA (Tabela 3.16) para reúso de água na irrigação de culturas por um período de até 20 anos.

As Figuras 5.2 a 5.4 ilustram a remoção de íons de metais pesados (Fe, Mn e Al, respectivamente) a pH 7 no processo NF-FADAT. Os limites de emissão indicados são

dados pela resolução nº 357 do CONAMA, com exceção do Al, que não está incluído nesta resolução e para o qual foi adotado o valor dado pelo CONSEMA nº 128/2006.

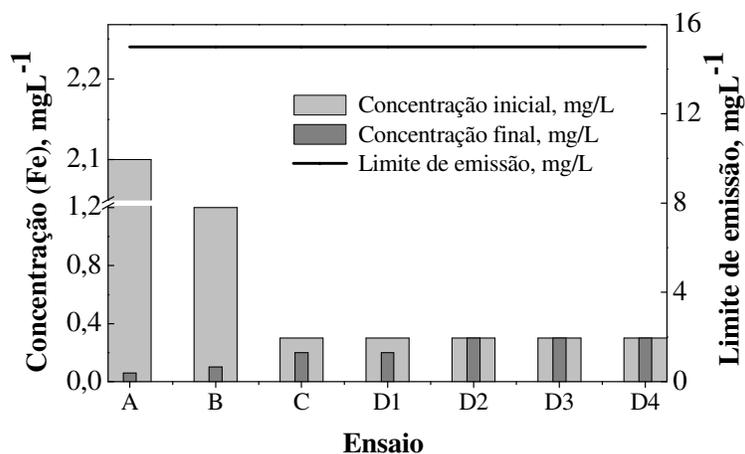


Figura 5.2 Tratamento da DAM-SS16 pelo processo NF-FADAT – Remoção de Fe a pH  $7,0 \pm 0,5$ . Dados de concentração inicial, final e limite de emissão de Fe. Condições:

[Flonex 9045] =  $5 \text{ mgL}^{-1}$ , [ácido oléico] =  $15 \text{ mgL}^{-1}$ .

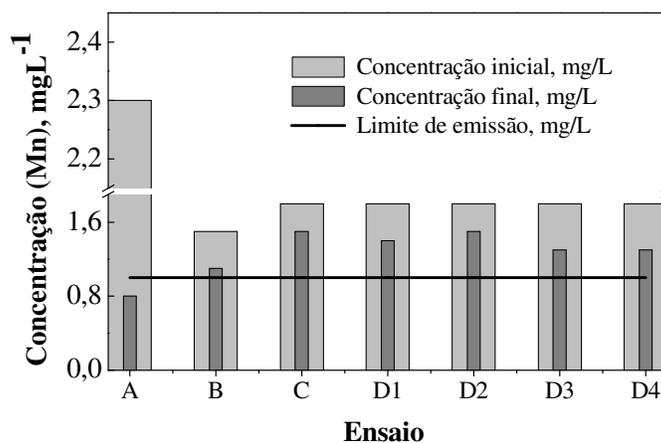


Figura 5.3 Tratamento da DAM-SS16 pelo processo NF-FADAT – Remoção de Mn a pH  $7,0 \pm 0,5$ . Dados de concentração inicial, final e limite de emissão de Mn. Condições:

[Flonex 9045] =  $5 \text{ mgL}^{-1}$ , [ácido oléico] =  $15 \text{ mgL}^{-1}$ .

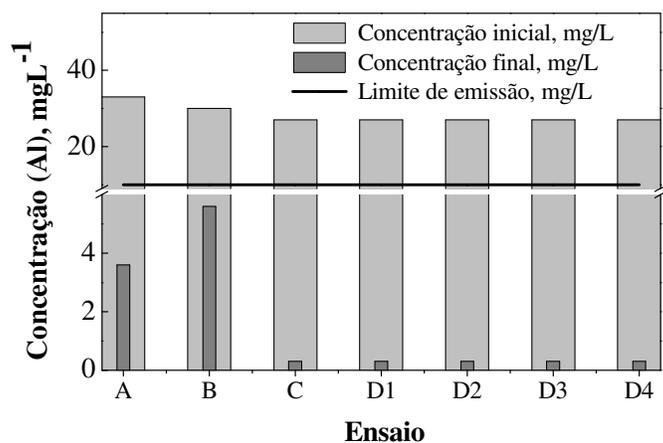


Figura 5.4 Tratamento da DAM-SS16 pelo processo NF-FADAT – Remoção de Al a pH  $7,0 \pm 0,5$ . Dados de concentração inicial, final e limite de emissão de Al. Condições:

$[\text{Flonex 9045}] = 5 \text{ mgL}^{-1}$ ,  $[\text{ácido oléico}] = 15 \text{ mgL}^{-1}$ .

### 5.2.2 Estudo piloto de tratamento da DAM-SS16 a pH 9

As características químicas e físico-químicas da DAM tratada a pH 9 são apresentadas na Tabela 5.3. Os resultados dos ensaios realizados para verificar as variações na qualidade da água tratada em função do tempo decorrido de ensaio em cada batelada são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.3 Características químicas e físico-químicas das amostras de DAM-SS16 tratadas a pH 9, pelo processo NF-FADAT.

<b>5.2.2.1.1.1 Parâmetro</b>	<b>Ensaio E 12/7/07</b>	<b>Ensaio F 17/8/07</b>	<b>Ensaio G 05/9/07</b>	<b>Ensaio H 05/9/07</b>	<b>Ensaio I 29/11/07</b>
pH	9,0	9,3	9,3	9,3	9,0
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> , mgL <sup>-1</sup>	267	521	520	517	592
Mn, mgL <sup>-1</sup>	LOD	0,5	0,3	0,7	1,4
Fe, mgL <sup>-1</sup>	LOD	LOD	0,2	0,1	0,1
Al, mgL <sup>-1</sup>	5,9	3,7	4,1	3,2	LOD
Condutividade, µScm <sup>-1</sup>	1275	1075	1082	1104	1127
Cor, Hazen	12	10	9	14	5
COT, mgL <sup>-1</sup>	0,8	0,8	0,9	0,8	0,6
Tensão Superficial, mNm <sup>-1</sup>	65	66	70	74	73
Turbidez, NTU	12	3	1	4	7
Dureza, mgL <sup>-1</sup> de CaCO <sub>3</sub>	764	628	677	631	666
Sólidos Dissolvidos, mgL <sup>-1</sup>	1202	975	965	941	1109

\*LOD: abaixo do limite de detecção do equipamento (Limite inferior de detecção do Espectrômetro de Absorção Atômica: Fe – 0,06 mgL<sup>-1</sup>; Al – 0,3 mgL<sup>-1</sup>; Mn – 0,02 mgL<sup>-1</sup>).

Tabela 5.4 Características químicas e físico-químicas das amostras de DAM-SS16 tratadas pelo processo NF-FADAT a pH 9, em função do tempo de ensaio.

Parâmetro	29/11/2007				30/11/07			
	Ensaio J				Ensaio K			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
	20 min	40 min	60 min	80 min	20 min	40 min	60 min	80 min
pH	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> , mgL <sup>-1</sup>	592	575	602	586	573	571	573	597
Mn, mgL <sup>-1</sup>	1,3	1,3	1,3	1,4	0,9	1,0	1,0	1,1
Fe, mgL <sup>-1</sup>	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
Al, mgL <sup>-1</sup>	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
Condutividade, µScm <sup>-1</sup>	1103	1113	1091	1098	1028	1082	1054	1018
Cor, Hazen	7	7	5	6	7	6	8	8
COT, mgL <sup>-1</sup>	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,5	0,6	0,5
Tensão Superficial, mNm <sup>-1</sup>	73	74	74	72	73	73	71	71
Turbidez, NTU	15	14	12	18	6	6	5	5
Dureza, mgL <sup>-1</sup> de CaCO <sub>3</sub>	677	682	677	675	636	629	634	650
Sólidos Dissolvidos, mgL <sup>-1</sup>	1130	1019	1087	1127	1077	1080	1092	1080

\*LOD: abaixo do limite de detecção do equipamento (Limite inferior de detecção do Espectrômetro de Absorção Atômica: Fe – 0,06 mgL<sup>-1</sup>; Al – 0,3 mgL<sup>-1</sup>; Mn – 0,02 mgL<sup>-1</sup>).

Nos cinco ensaios realizados a pH 9 (Tabela 5.3), quatro amostras apresentaram uma concentração residual de Mn abaixo de  $1 \text{ mgL}^{-1}$ . O residual de Al neste pH é superior aos encontrados na DAM tratada a pH 7 pois este íon precipita da solução em valores de pH >5 mas se solubiliza novamente em pH > 9.

As análises das amostras coletadas a cada 20 minutos em duas bateladas diferentes (Tabela 5.4), não apresentaram indicações claras de que a condutividade ou a concentração residual dos metais aumente ao longo do tempo de ensaio em uma batelada, como sugeriram os ensaios a pH 7. Nos ensaios realizados no dia 29/11/2007, problemas operacionais na estação SS-16 e dificuldades no processo de flotação levaram a resultados mais elevados de turbidez e baixa eficiência na remoção de Mn.

Todas as amostras apresentaram concentrações residuais de íons metálicos dentro dos padrões exigidos pela EPA para reúso de água em irrigação de culturas por um período de até 20 anos (Tabela 3.16).

As Figuras 5.5 a 5.7 apresentam, respectivamente, a remoção dos íons Fe, Mn e Al a pH 9 no processo FADAT.

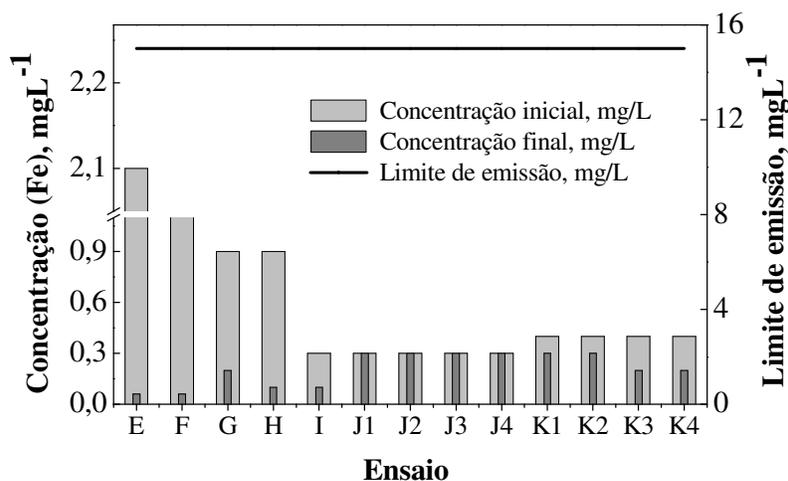


Figura 5.5 Tratamento da DAM-SS16 pelo processo NF-FADAT – Remoção de Fe a pH  $9,0 \pm 0,5$ . Dados de concentração inicial, final e limite de emissão de Fe. Condições: [Flonex 9045] =  $5 \text{ mgL}^{-1}$ , [ácido oléico] =  $15 \text{ mgL}^{-1}$ .

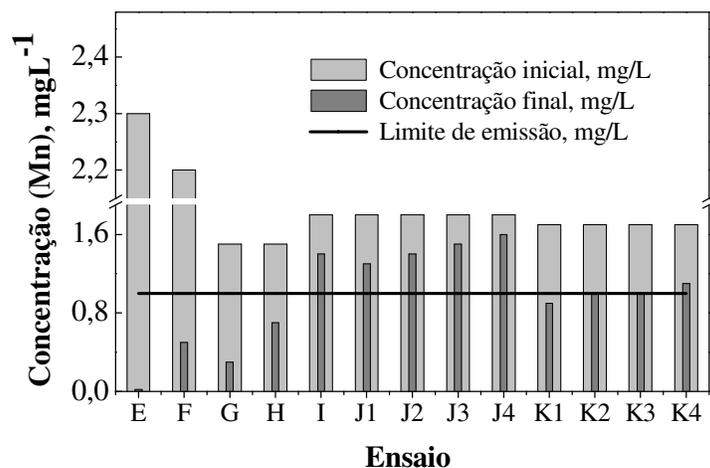


Figura 5.6 Tratamento da DAM-SS16 pelo processo NF-FADAT – Remoção de Mn a pH  $9,0\pm 0,5$ . Dados de concentração inicial, final e limite de emissão de Mn. Condições: [Flonex 9045] =  $5\text{ mgL}^{-1}$ , [ácido oléico] =  $15\text{ mgL}^{-1}$ .

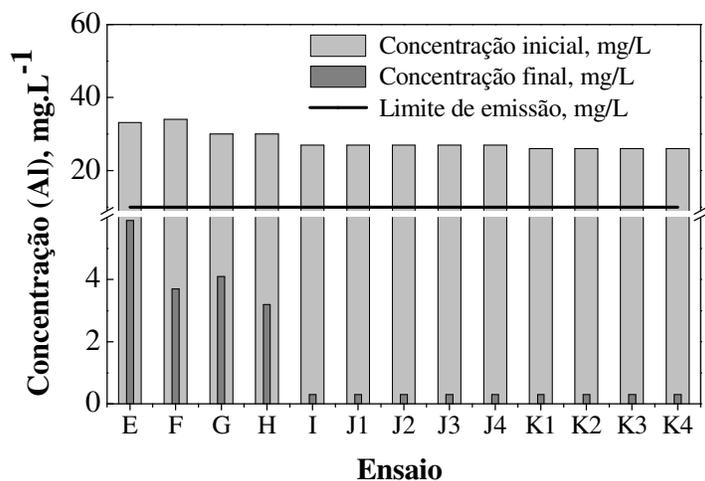


Figura 5.7 Tratamento da DAM-SS16 pelo processo NF-FADAT – Remoção Al a pH  $9,0\pm 0,5$ . Dados de concentração inicial, final e limite de emissão de Al. Condições: [Flonex 9045] =  $5\text{ mgL}^{-1}$ , [ácido oléico] =  $15\text{ mgL}^{-1}$ .

### 5.2.3 Estudo piloto de tratamento da DAM-SS16 a pH 12

Foram realizados 13 ensaios a pH 12, em 17/5/2007, nos quais foi analisada a remoção de Fe, Mn, Al e  $\text{SO}_4^{-2}$ . A Tabela 5.5 apresenta os resultados destes ensaios quanto à eficiência de remoção.

Tabela 5.5. Eficiência de remoção e concentração residual de íons metálicos (Mn, Al e Fe) e íons sulfato pelo processo NF-FADAT em pH 12. Concentrações iniciais desses elementos são descritos na Tabela 4.1.

Estudo	Fe, $\text{mgL}^{-1}$	R Fe, %	Mn, $\text{mgL}^{-1}$	R Mn, %	Al, $\text{mgL}^{-1}$	R Al, %	$\text{SO}_4^{-2}$ , $\text{mgL}^{-1}$	R $\text{SO}_4^{-2}$ , %
L	0,3	90	0,2	93	2,8	92	143	83
M	0,1	95	0,2	94	2,2	94	189	78
N	0,1	96	0,2	92	3,4	91	195	77
O	0,1	97	0,04	99	1,2	97	195	77
P	0,1	98	0,1	96	2,3	94	116	86
Q	0,1	98	0,4	87	2,3	94	142	83
R	0,1	97	0,1	97	1,6	96	111	87
S	0,1	97	0,2	95	1,0	97	196	77
T	0,1	98	0,2	93	2,0	94	125	85
U	0,1	97	0,1	98	1,8	95	130	85
V	0,1	98	0,1	96	1,9	95	111	87
X	0,1	97	0,1	98	2,4	93	104	88
Z	0,1	98	0,2	92	1,4	96	164	81
<b>Média</b>	<b>0,1</b>	<b>97</b>	<b>0,2</b>	<b>95</b>	<b>2,0</b>	<b>94</b>	<b>148</b>	<b>83</b>

As Figuras 5.8 a 5.11 ilustram as concentrações iniciais da DAM bruta e residuais, após o tratamento a pH 12 para Fe, Mn, Al e  $\text{SO}_4^{-2}$ , respectivamente.

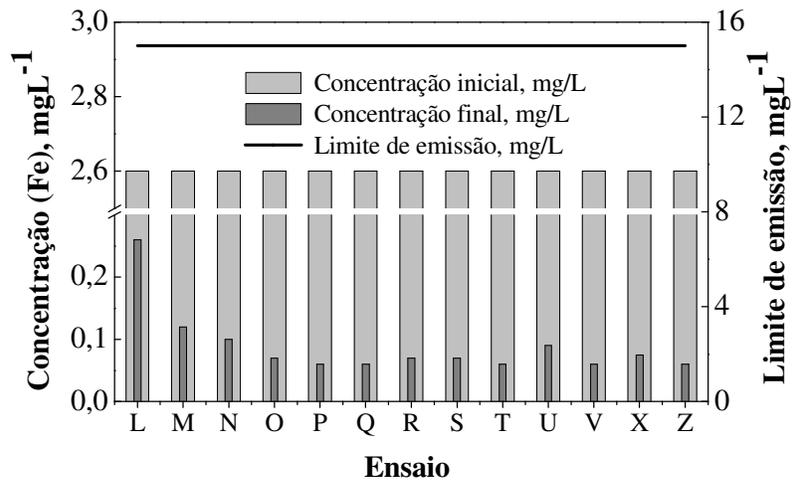


Figura 5.8 Tratamento da DAM-SS16 pelo processo NF-FADAT – Remoção de íons Fe a pH  $12,0 \pm 0,5$ . Dados de concentração inicial, final e limite de emissão de Fe. Condições: [Qemifloc 1020] =  $5 \text{ mgL}^{-1}$ , [ácido oléico] =  $30 \text{ mgL}^{-1}$ , [PAC TE 1018] =  $1 \text{ mLL}^{-1}$ , [Alupan K] =  $0,5 \text{ mLL}^{-1}$ .

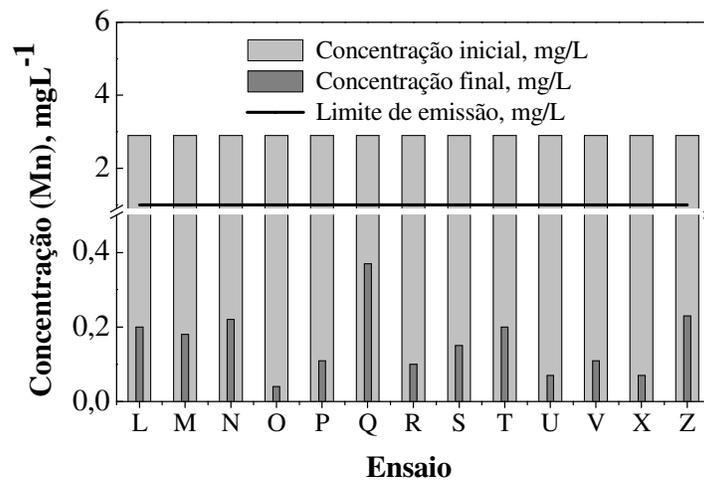


Figura 5.9 Tratamento da DAM-SS16 pelo processo NF-FADAT – Remoção de íons Mn a pH  $12,0 \pm 0,5$ . Dados de concentração inicial, final e limite de emissão de Mn. Condições: [Qemifloc 1020] =  $5 \text{ mgL}^{-1}$ , [ácido oléico] =  $30 \text{ mgL}^{-1}$ , [PAC TE 1018] =  $1 \text{ mLL}^{-1}$ , [Alupan K] =  $0,5 \text{ mLL}^{-1}$ .

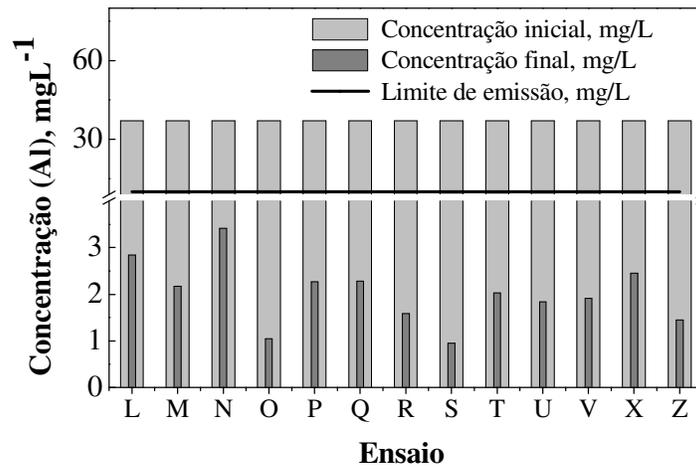


Figura 5.10 Tratamento da DAM-SS16 pelo processo NF-FADAT – Remoção de íons Al a pH  $12,0\pm 0,5$ . Dados de concentração inicial, final e limite de emissão de Al. Condições: [Qemifloc 1020] =  $5 \text{ mgL}^{-1}$ , [ácido oléico] =  $30 \text{ mgL}^{-1}$ , [PAC TE 1018] =  $1 \text{ mL}^{-1}$ , [Alupan K] =  $0,5 \text{ mL}^{-1}$ .

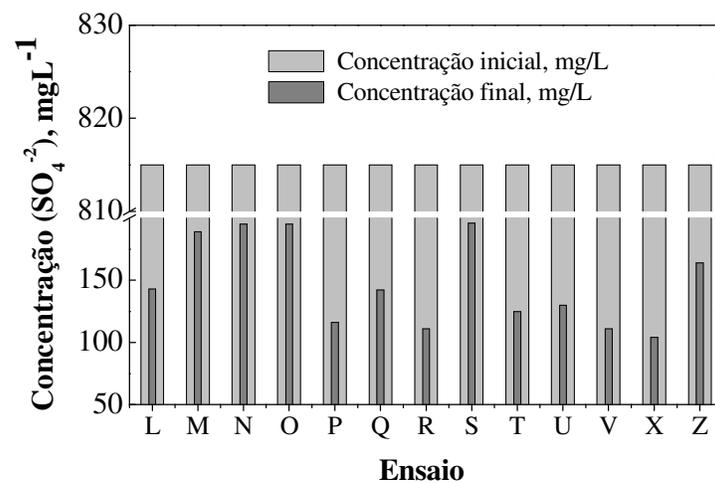


Figura 5.11 Tratamento da DAM-SS16 pelo processo NF-FADAT – Remoção de íons  $\text{SO}_4^{2-}$  a pH  $12,0\pm 0,5$ . Dados de concentração inicial e final de  $\text{SO}_4^{2-}$ . Condições: [Qemifloc 1020] =  $5 \text{ mgL}^{-1}$ , [ácido oléico] =  $30 \text{ mgL}^{-1}$ , [PAC TE 1018] =  $1 \text{ mL}^{-1}$ , [Alupan K] =  $0,5 \text{ mL}^{-1}$ .

O tratamento da DAM-SS16 a pH 12 apresentou resultados bastante elevados em termos de eficiência de remoção de íons metálicos e sulfato. A remoção média para Fe, Mn e Al foi superior a 90% e para o sulfato foi de 83%.

Apesar da diversidade de tratamentos já desenvolvidos para remoção de sulfato, muitos são de difícil operacionalidade, pouco efetivos e/ou economicamente inviáveis, não existindo, portanto, um processo efetivo e de baixo custo para remoção desses íons (CADORIN, 2007).

A concentração residual média dos íons metálicos atende aos padrões não apenas da EPA, como também aos mais rigorosos como Canadá, Tunísia, Israel e Arábia Saudita para reúso de água na agricultura e irrigação irrestrita. O residual médio de sulfato ( $148 \text{ mgL}^{-1}$ ), atende ao padrão de potabilidade da água no Brasil ( $250 \text{ mgL}^{-1}$ ), dado pela Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde.

A Tabela 5.6 apresenta uma média dos parâmetros medidos na DAM bruta e na tratada a pH 7, 9 e 12, no sistema FADAT. Neste cálculo, considerou-se primeiramente uma média de cada um dos ensaios em relação ao tempo (D a pH 7; J e K a pH 9) e, a seguir, foi calculada uma média geral entre estes resultados e os demais ensaios realizados.

Tabela 5.6 Tratamento da DAM-SS16 - média dos parâmetros analisados nas amostras brutas e tratadas a pH 7, 9 e 12, pelo processo NF-FADAT.

Parâmetro	Bruta	Tratada		
		pH 7	pH 9	pH 12
pH	3,0	7	9	12
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> , mgL <sup>-1</sup>	622	473	512	148
Mn, mgL <sup>-1</sup>	2,0	1,2	0,7	0,2
Fe, mgL <sup>-1</sup>	1,4	0,2	0,2	0,1
Al, mgL <sup>-1</sup>	31	2,5	2,9	2,0
Condutividade, µScm <sup>-1</sup>	1290	1109	1116	-
Cor, Hazen	13	7	9	-
COT, mgL <sup>-1</sup>	0,6	1,0	0,7	-
Tensão Superficial, mNm <sup>-1</sup>	71	72	70	-
Turbidez, NTU	0,7	7	7	-
Dureza, mgL <sup>-1</sup> de CaCO <sub>3</sub>	368	655	669	-
Sólidos Dissolvidos, mgL <sup>-1</sup>	1114	1067	1052	-

Os resultados demonstram que a eficiência do tratamento da DAM-SS16 pelo processo NF-FADAT nos pHs 7 e 9 é bastante similar. A diferença mais importante é quanto ao Mn, embora pequena devido à baixa concentração desse íon no efluente bruto, o que dificulta a sua remoção. A pH 9 é possível conseguir uma água tratada com a concentração deste íon dentro do limite do CONAMA n° 357 para emissão de efluentes (1 mgL<sup>-1</sup>). Isso ocorre porque a faixa de pH onde acontece a precipitação do Mn geralmente varia de 9 a 9,5. A remoção deste íon a pH 7 é prejudicada e a concentração final fica um pouco acima do limite.

A eficiência alcançada pelo processo NF-FADAT é similar à encontrada no processo de tratamento de DAM por NFSL (neutralização, floculação e separação sólido/líquido por sedimentação lamelar), estudado por SILVA (2009). Neste estudo, a concentração final para os íons Mn, Fe e Al na DAM-SS16 tratada a pH 7 foi de 0,8, 0,06 e 3,6 mgL<sup>-1</sup> e para pH 9 foi de 0,02, 0,06 e 0,02 mgL<sup>-1</sup>.

A pH 12 obtém-se as mais baixas concentrações residuais dos íons Fe, Al, Mn e de sulfato (<150 mgL<sup>-1</sup>). Em compensação, o custo do tratamento é mais elevado, bem como a geração de lodo residual. A concentração final média dos íons analisados atende aos padrões mais restritivos de qualidade da água para reúso. A concentração final de sulfato atende, inclusive, ao padrão de potabilidade da água no Brasil (250 mgL<sup>-1</sup>), dado pela portaria nº 518/ 2004, do Ministério da Saúde

A Tabela 5.7 apresenta a eficiência de outros processos de tratamento de DAM para remoção de sulfato, citados em INAP (2003). A eficiência média de remoção de sulfato alcançada pelo processo NF-FADAT é compatível com as atingidas pelos diversos processos analisados, com a vantagem de ser um processo mais simples em relação àqueles que apresentam eficiências superiores.

Tabela 5.7 Eficiência de processos de remoção de íons sulfato de DAM.

<b>Processo</b>	<b>[SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>]<sub>inicial</sub>, mgL<sup>-1</sup></b>	<b>[SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>]<sub>final</sub>, mgL<sup>-1</sup></b>	<b>Eficiência, %</b>
Neutralização com Cal/CaCO <sub>3</sub>	3000	1219	59
Precipitação com BaS	2190	190	91
SAVMIN	649	69	89
CESR	1690	190	89
Osiose Reversa	4920	113	98
GYP-CIX (Troca iônica)	4472	240	95
Bioreator	2198	198	91
Wetland	1700	1540	9
Barreiras reativas permeáveis	2500	840	66

### 5.3 ANÁLISES DE CONTAMINAÇÕES ORGÂNICAS E BIOLÓGICAS

Foram analisadas as amostras da água bruta e a tratada por NF-FADAT a pH 9 pois, para os distintos valores de pH's analisados, foi o que apresentou a melhor remoção de íons metálicos com o menor consumo de reagentes. Avaliou-se contaminantes como fenóis, óleos e graxas, surfactantes, DBO<sub>5</sub> e coliformes (Tabela 5.8). A comparação dos valores

médios obtidos após tratamento da DAM-SS16 a pH 9, com parâmetros aplicados para reúso em diversas regiões do mundo e por várias organizações, é apresentada na Tabela 5.9.

Tabela 5.8 Qualidade da água bruta e tratada pelo processo NF-FADAT a pH 9 quanto a contaminantes orgânicos e biológicos.

Parâmetro	Unidade	Amostra Bruta	Amostra Tratada NF-FADAT	Limite de Detecção
D.B.O., 5 dias	mgL <sup>-1</sup> O <sub>2</sub>	N.D.	N.D.	1,0
Fenóis	mgL <sup>-1</sup> C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH	N.D.	0,002	0,001
Surfactantes	mgL <sup>-1</sup> ABS	N.D.	0,016	0,01
Óleos e Graxas Minerais	mgL <sup>-1</sup>	N.D.	N.D.	5,0
N.M.P. Coliformes fecais	N.M.P./100 ml	N.D.	N.D.	2,0
N.M.P. Coliformes totais	N.M.P./100 ml	2	N.D.	2,0

Os parâmetros analisados estão dentro dos limites sugeridos para reúso urbano segundo a EPA, que adota valores de DBO<sub>5</sub> ≤ 10 mgL<sup>-1</sup> e concentrações não detectáveis de coliformes fecais. Os parâmetros óleos e graxas minerais, fenóis e surfactantes apresentaram-se bem abaixo dos limites do CONAMA nº 357 para lançamento de efluentes, respectivamente ≤ 20 mgL<sup>-1</sup> e 0,5 mgL<sup>-1</sup>. A concentração de surfactantes encontra-se dentro do limite de potabilidade (0,5 mgL<sup>-1</sup>) dado pela Portaria nº 518 do Ministério da Saúde.

Tabela 5.9 Comparação entre valores médios de parâmetros medidos na DAM-SS16 tratada pelo processo NF-FADAT a pH 9 e padrões de qualidade para reúso da água sugeridos por diferentes locais e organizações.

Parâmetro	Valor médio (NF-FADAT)	Portaria 518 <sup>(2)</sup>	CONAMA 357 <sup>(3)</sup>	NBR 13.969 <sup>(4)</sup>	SABESP <sup>(5)</sup>	ANA <sup>(6)</sup>	EPA <sup>(8)</sup>	Califórnia <sup>(9)</sup>
pH	9	6-9,5	5-9	6-8	6-9	6-9	6-9	-
DBO, mgL <sup>-1</sup>	ND <sup>(1)</sup>	-	-	-	<25	≤10	≤10	≤10
Coliformes fecais, NPM/100 mL	ND	-	-	<200	<200	ND	ND	<2,2 <sup>(10)</sup>
COT, mgL <sup>-1</sup>	0,7	-	-	-	-	-	-	-
SDT, mgL <sup>-1</sup>	1052	1000	-	<200	-	≤500 <sup>(7)</sup>	500-2000	-
SST, mgL <sup>-1</sup>	ND	-	-	-	<35	≤5	≤5	-
Condutividade, µScm <sup>-1</sup>	1116	-	-	-	-	-	-	-
Cor, Hazen	9	15	-	-	-	≤10	-	-
Tensão superficial, mNm <sup>-1</sup>	70	-	-	-	-	-	-	-
Dureza, mgL <sup>-1</sup> de CaCO <sub>3</sub>	669	500	-	-	-	-	-	-
Turbidez, NTU	7	5	-	<5	<20	≤2	≤2	≤2
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , mgL <sup>-1</sup>	512	250	-	-	-	-	-	-
Alumínio, mgL <sup>-1</sup>	2,5	0,2	-	-	-	-	20	-
Bário, mgL <sup>-1</sup>	0,02	-	5	-	-	-	-	-
Boro, mgL <sup>-1</sup>	0,12	-	5	-	-	-	2	-
Cádmio, mgL <sup>-1</sup>	<0,002	-	0,2	-	-	-	0,05	-
Chumbo, mgL <sup>-1</sup>	0,02	-	0,5	-	-	-	10	-
Cromo, mgL <sup>-1</sup>	<0,004	-	0,5	-	-	-	1	-
Cobre, mgL <sup>-1</sup>	0,1	-	1	-	-	-	5	-
Ferro, mgL <sup>-1</sup>	0,2	0,3	15	-	-	-	20	-
Manganês, mgL <sup>-1</sup>	0,7	0,1	1	-	-	-	10	-
Mercúrio, mgL <sup>-1</sup>	<0,0002	-	0,01	-	-	-	-	-
Níquel, mgL <sup>-1</sup>	0,04	-	2	-	-	-	2	-
Zinco, mgL <sup>-1</sup>	0,1	-	5	-	-	-	10	-

Tabela 5.9 Comparação entre valores médios de parâmetros medidos na DAM-SS16 tratada pelo processo NF-FADAT a pH9 e padrões de qualidade sugeridos por diferentes locais e organizações. (continuação)

Parâmetro	Valor médio (NF-FADAT)	Canadá <sup>(11)</sup>	Espanha <sup>(13)</sup>	Japão <sup>(15)</sup>	Tunísia <sup>(16)</sup>	Israel <sup>(17)</sup>	Arábia Saudita <sup>(18)</sup>
pH	<b>9</b>	-	-	5,8-8,6	6,5-8,5	6,5-8,5	6,0-8,1
DBO, mgL <sup>-1</sup>	<b>ND<sup>(1)</sup></b>	-	-	10	30	10	10
Coliformes fecais, NPM/100 mL	<b>ND</b>	100	ND <sup>(14)</sup>	ND	-	10	2,2
COT, mgL <sup>-1</sup>	<b>0,7</b>	-	-	-	-	-	-
SDT, mgL <sup>-1</sup>	<b>1052</b>	500-3500	-	-	-	-	-
SST, mgL <sup>-1</sup>	<b>ND</b>	-	<10	-	30	10	10
Condutividade, µScm <sup>-1</sup>	<b>1116</b>	-	-	-	7000	1400	-
Cor, Hazen	<b>9</b>	-	-	-	-	-	-
Tensão superficial, mNm <sup>-1</sup>	<b>70</b>	-	-	-	-	-	-
Dureza, mgL <sup>-1</sup> de CaCO <sub>3</sub>	<b>669</b>	-	-	-	-	-	-
Turbidez, NTU	<b>7</b>	-	<2	2	-	-	1
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , mgL <sup>-1</sup>	<b>512</b>	-	-	-	-	-	-
Alumínio, mgL <sup>-1</sup>	<b>2,5</b>	5	-	-	-	-	5
Bário, mgL <sup>-1</sup>	<b>0,02</b>	-	-	-	-	-	-
Boro, mgL <sup>-1</sup>	<b>0,12</b>	0,5-6	-	-	3	0,4	0,5
Cádmio, mgL <sup>-1</sup>	<b>&lt;0,002</b>	0,0051	-	-	0,01	0,01	0,01
Chumbo, mgL <sup>-1</sup>	<b>0,02</b>	0,2	-	-	1	0,1	0,1
Cromo, mgL <sup>-1</sup>	<b>&lt;0,004</b>	0,0049 <sup>(12)</sup>	-	-	0,1	0,1	0,01
Cobre, mgL <sup>-1</sup>	<b>0,1</b>	0,2-1	-	-	0,5	0,2	0,4
Ferro, mgL <sup>-1</sup>	<b>0,2</b>	5	-	-	5	2	5
Manganês, mgL <sup>-1</sup>	<b>0,7</b>	0,2	-	-	0,5	0,2	0,2
Mercúrio, mgL <sup>-1</sup>	<b>&lt;0,0002</b>	-	-	-	0,001	0,002	0,001
Níquel, mgL <sup>-1</sup>	<b>0,04</b>	0,2	-	-	0,2	0,2	0,02
Zinco, mgL <sup>-1</sup>	<b>0,1</b>	1-5	-	-	5,0	2	4

- (1) ND - Não detectável;
- (2) Padrão de aceitação para consumo humano, Portaria do Ministério da Saúde nº 518/2004.
- (3) Parâmetros de emissão de efluentes;
- (4) Reúso Classe 1 (Lavagem de carros e outros usos que requerem contato direto do usuário com a água, com possível aspiração de aerossóis pelo operador incluindo chafarizes), 1997.
- (5) Reúso Urbano. (Fonte: SEMURA *et al.*, 2005)
- (6) Água de reúso classe 1 - descarga de bacias sanitárias, lavagem de pisos, roupas e veículos e fins ornamentais. (Fonte: ANA, 2005);
- (7) Valor recomendado para lavagem de roupas e veículos;
- (8) Reúso urbano e irrigação agrícola para culturas comercializadas sem processamento (irrigação para períodos curtos, ou seja, até 20 anos). (Fonte: EPA, 2004);
- (9) Reúso urbano não-potável (Fonte: METCALF & EDDY, 2006);
- (10) Coliformes totais, ufc/100mL;
- (11) Critérios de qualidade da água para uso agrícola. (Fonte: CCME, 2005);
- (12) Valor para  $\text{Cr}^{\text{III}}$  .  $\text{Cr}^{\text{VI}} = 0,008 \text{ mgL}^{-1}$ ;
- (13) Reúso urbano. (Fonte: ESTEBAN e MIGUEL, 2008);
- (14) *Escherichia coli*, ufc/100mL;
- (15) Reúso urbano. (Fonte: METCALF & EDDY, 2006 e EPA, 2004);
- (16) Reúso Agrícola. (Fonte: ANGELAKIS *et al.*, 1999);
- (17) Irrigação irrestrita. (Fonte: INBAR, Y., 2007);
- (18) Irrigação irrestrita (Fonte: ABU-RIZAIZA, O.S.,1999);

A grande maioria dos padrões apresentados são extremamente rígidos e não levam em conta a atual capacidade técnica e econômica dos sistemas de tratamento de efluentes existentes. Como exemplo disso pode-se citar a turbidez, parâmetro para o qual muitos países exigem valores inferiores a 2 NTU, situação muito difícil de ser atingida.

Existem também restrições desnecessárias quanto a contaminantes químicos, já que muitos são prejudiciais apenas para a irrigação de um pequeno grupo de culturas mais sensíveis. Isto acaba desqualificando águas de reúso para a irrigação em geral e leva ao desperdício deste valioso recurso.

No Brasil, a água potável deve estar em conformidade com o padrão de aceitação para o consumo humano, dado pela Portaria 518/2004, do Ministério da Saúde. Alguns parâmetros de qualidade exigidos para a água de reúso, como sólidos dissolvidos totais (SDT), cor e turbidez, acabam sendo tão (se não mais) restritivos quanto os padrões para a água potável, não apenas no exterior como também dentro do País.

A definição de normas e parâmetros a serem atingidos deve levar em conta fatores econômicos, ambientais e sociais locais, para que a saúde e o meio ambiente sejam preservados, sem a necessidade de atingir níveis de potabilidade na água de reúso, o que torna o processo economicamente inviável.

#### 5.4 VERIFICAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS DO LODO GERADO NO TRATAMENTO DA DAM-SS16 PELO PROCESSO NF-FADAT

Foram analisadas duas amostras de lodo, gerado no processo de tratamento da DAM-SS16 a pH 12, além de quatro amostras de lodo gerado a pH 9, em diferentes bateladas. Todas as amostras continham 50 mL de lodo. Os resultados são apresentados na Tabela 5.10 e 5.11, respectivamente.

Tabela 5.10 Análise da concentração de sólidos do lodo flotado no tratamento da DAM-SS16 a pH 12, pelo processo NF-FADAT.

Estudo	Massa de sólidos, g	Concentração de sólidos, gL <sup>-1</sup>
1	0,9	18,6
2	0,9	18,8
<b>MÉDIA</b>		<b>18,7</b>

Tabela 5.11 Análise da concentração e teor de sólidos do lodo flotado no tratamento da DAM-SS16 a pH 9, pelo processo NF-FADAT.

Estudo	Massa de sólidos, g	% de sólidos	Concentração de sólidos, gL <sup>-1</sup>
1	1,1	2,2	22,0
2	1,1	2,2	21,9
3	0,9	1,8	17,8
4	0,9	1,8	18,3
<b>MÉDIA</b>		<b>2,0</b>	<b>20,0</b>

O lodo gerado a pH 12 apresentou concentração de 18,7 gL<sup>-1</sup> e uma vazão estimada de 0,16 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup>. Estes resultados são semelhantes aos encontrados por CARISSIMI *et al* (2007), de 17 gL<sup>-1</sup> e 0,17 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup>.

O percentual médio de sólidos encontrado no lodo gerado pelo tratamento a pH 9 foi de 2,0%. Este valor é bastante reduzido, indicando a necessidade de um processo de desidratação antes do lodo ser reutilizado ou mesmo encaminhado à disposição final. A concentração encontrada para o lodo do tratamento a pH 9 (20,0 gL<sup>-1</sup>) foi superior à do pH 12 (18,7 gL<sup>-1</sup>). Provavelmente, este fato deve-se ao sistema de coleta do lodo flotado, processo manual e sujeito a variações de acordo com o operador, já que o lodo gerado a pH 12 é visualmente mais espesso. Os ensaios mostraram que há uma geração significativa de lodo (aproximadamente 2% do volume de efluente tratado), sendo necessário o estudo de um destino adequado, como na indústria do cimento, indústria cerâmica, etc.

Entre as alternativas para o adensamento do lodo estão:

- Leitões de secagem;
- Centrifugação;
- Filtros prensa;

Se introduzidos, estes processos de desidratação aumentarão os custos de tratamento da DAM devido ao consumo de energia, à necessidade de maior área disponível e ao custo dos equipamentos.

## 5.5 PRÉ-AVALIAÇÃO DE CUSTOS OPERACIONAIS DO PROCESSO NF-FADAT

Foram realizadas estimativas dos custos envolvidos no processo NF-FADAT para pH 7, 9 e 12. Foi medido o consumo energético dos equipamentos pelo monitoramento do relógio de medição implantado no local, indicando um consumo de 1,75 kWh para o processo NF- FADAT. Como a vazão de água a ser tratada foi mantida em  $1 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ , o consumo de energia em relação à vazão foi de  $1,75 \text{ kWh.m}^{-3}$ . A tarifa de energia elétrica cobrada pela Central Elétrica de Santa Catarina (CELESC), para as atividades de saneamento, água e tratamento de esgoto é da ordem de  $0,24 \text{ R\$.kWh}^{-1}$ , o que resulta em um custo de aproximadamente  $0,42 \text{ R\$\text{m}^{-3}}$  de efluente tratado na operação da planta piloto. A estimativa de custos com reagentes é mostrada na Tabela 5.12, para pH 7 e 9, e na Tabela 5.13, para pH 12.

Tabela 5.12 Estimativa de custo com reagentes para o tratamento da DAM-SS16 a pH 7 e 9.

Reagentes	Unidade	Custo unitário, R\$	Dosagem requerida, $\text{mgL}^{-1}$	Custo do tratamento, $\text{R\$\text{m}^{-3}}$
Cal Calcítica Hidratada (Qualical) – pH 7	t	435,50	200	0,09
Cal Calcítica Hidratada (Qualical) – pH 9	t	435,50	250	0,11
Flonex 9045	t	12.000,00	5	0,06
Ácido Oléico	L	17,00	15	0,29
<b>Total</b>	<b>pH 7</b>			<b>0,44</b>
	<b>pH 9</b>			<b>0,46</b>

O ácido oléico é um importante auxiliar da flotação, porém, representa uma grande parcela no custo do tratamento da DAM nos pHs 7 e 9. Por esse motivo é interessante a realização de ensaios visando diminuir o seu consumo e avaliar o impacto dessa redução na qualidade final do efluente tratado.

Tabela 5.13 Estimativa de custo com reagentes para o tratamento a pH 12 (remoção de metais pesados e íons sulfato) de DAM-SS16 com Panfloc TE 1018 e Alupan.

Reagentes	Unidade	Custo unitário, R\$	Dosagem requerida, mgL <sup>-1</sup>	Custo do tratamento, R\$m <sup>-3</sup>
Panfloc TE 1018	t	800,00	1.351	1,08
Alupan	t	2.000,00	1.545	3,09
Cal Calcítica Hidratada (Qualical)	t	435,50	2.000	0,87
Qemifloc PWG 1020	t	10.000,00	5	0,06
Ácido Oléico	L	17,00	30	0,60
Ácido Clorídrico	L	1,20	236	0,28
<b>Total</b>				<b>6,0</b>

A estimativa de custo do tratamento pelo processo NF-FADAT para os diversos pHs analisados é apresentada na Tabela 5.14, considerando os custos com reagentes e de consumo energético.

Tabela 5.14 Custos estimados para o tratamento da DAM SS16 por NF-FADAT.

pH	Custo reagentes, R\$m <sup>-3</sup>	Custo energético, R\$m <sup>-3</sup>	Custo do tratamento, R\$m <sup>-3</sup>
7	0,44	0,42	0,86
9	0,46	0,42	0,88
12	6,0	0,42	6,42

Os custos dos tratamentos a pH 7 e 9 são muito similares. Estes custos são muito vantajosos em relação à tarifa cobrada pela água tratada (potável). No caso de SC, a CASAN (Companhia Catarinense de Águas e Saneamento), cobra R\$m<sup>-3</sup> 5,10 pela tarifa residencial classe 3 (consumo entre 26 e 50 m<sup>3</sup>/mês). O custo do tratamento por flotação a pH 12 não considera a receita gerada com a venda da água tratada nem o possível reaproveitamento da etringita gerada no processo como, por exemplo, em indústrias cerâmicas ou na produção de cimento (CADORIN, 2007), o que eventualmente poderia reduzir/abater esse valor.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos mostraram que o processo NF-FADAT é tecnologicamente viável e possui um elevado potencial como técnica de tratamento da DAM, com uma elevada taxa de aplicação, reduzida área ocupada e a possibilidade de reúso da água tratada para fins não-potáveis. O processo de tratamento de DAM por flotação com ar dissolvido em escala industrial foi adotado em 2004 com uma unidade de 5-10 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> na estação de embarque da Carbonífera Metropolitana S.A.(SC) e, em 2007, na mina Esperança da mesma empresa, com capacidade para tratar 250 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup>.

Muitas organizações estabelecem critérios para qualidade da água de reúso extremamente rígidos, inibindo a sua prática, especialmente para usos não nobres. Como exemplo pode-se citar a turbidez, para a qual muitas vezes são requeridos valores inferiores a 2 NTU, níveis dificilmente atingidos pelos tratamentos. Tais padrões refletem a preocupação com a contaminação biológica, problema que não está presente na DAM-SS16.

Assim como a turbidez, outros parâmetros de qualidade exigidos para a água de reúso, como sólidos dissolvidos totais (SDT) e cor, acabam sendo mais restritivos do que os padrões para a água potável no Brasil, dados pela Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde. Este fato ocorre não somente com parâmetros fixados por outros países, como quanto àqueles estabelecidos por normas e instituições nacionais.

Mais importante do que focar em uma qualidade próxima à potabilidade para a água de reúso, deve-se aplicar uma gestão eficiente dos recursos hídricos, identificar os diferentes tipos de aplicações para a água e estabelecer padrões para cada caso (*fit-for-purpose*).

Na definição destes padrões, fatores econômicos, ambientais e sociais locais devem ser considerados detalhadamente. Neste contexto, é importante que especialistas em ciências sociais, economia, saúde pública e meio ambiente sejam consultados, em razão da independência e inter-relação destes fatores. É importante ainda que existam melhores conexões entre órgãos governamentais/poder legislativo e universidades/centros de pesquisas. Finalmente, os padrões devem ser periodicamente revisados e atualizados, acompanhando sempre as novas pesquisas.

A prática de reúso da água industrial tratada é uma excelente forma de preservar os recursos naturais e de gerenciar águas e efluentes, porém, deve ocorrer

simultaneamente com outras medidas de racionalização do uso da água e prevenção da poluição. Além disso, deve ser devidamente planejada para não apresentar riscos às atividades que a utilizarem. O estabelecimento de padrões nacionais para o reúso de água, viáveis técnica e economicamente, bem como seguros para a saúde da população, é de extrema importância. Por outro lado, esta legislação pode evitar riscos e estimular a prática do reúso, tendo uma maior aceitação pública e contribuindo para uma maior preservação ambiental.

## 7 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitem estabelecer as seguintes conclusões:

1. O tratamento de DAM por NF-FADAT – Neutralização, Floculação e Flotação por Ar Dissolvido de Alta Taxa mostrou ser um processo eficiente, validado durante um período longo. Em pH 7, a água tratada apresentou concentrações finais médias de 0,2 (Fe), 1,2 (Mn) e 2,5 (Al)  $\text{mgL}^{-1}$ , respectivamente. O tratamento a pH 9 foi o que apresentou melhor custo-benefício, pois obteve uma remoção de Mn superior à do pH 7 com um custo operacional similar. A concentração final dos íons Fe, Mn e Al para o tratamento neste pH foi 0,2, 0,7 e 2,9  $\text{mgL}^{-1}$ ;
2. A qualidade da água tratada pelo processo NF-FADAT a pH 9 apresentou-se adequada aos limites de emissão de efluentes determinados pela resolução nacional (CONAMA 357/05) e a parâmetros para a qualidade da água de reúso estabelecidos por critérios nacionais (NBR 13.969, SABESP, ANA) e internacionais (EPA, WHO).
3. A remoção de sulfato a pH 12 via precipitação de etringita ( $3\text{CaO}\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot 31\text{H}_2\text{O}$ ) mostrou-se uma alternativa eficiente (em média 83% de remoção), com concentração final em torno de 148  $\text{mgL}^{-1}$ , além de elevada remoção de metais (concentrações finais de 0,1, 0,2 e 2,0  $\text{mgL}^{-1}$  para Fe, Mn e Al, respectivamente). Estes valores atendem aos padrões nacionais e internacionais mais restritivos para a água de reúso. A concentração final de sulfato atende aos padrões brasileiros de potabilidade da água, dados pela portaria nº 518/2004, do Ministério da Saúde;
4. Os custos operacionais aproximados do tratamento da DAM-SS16 foram de  $\text{R}\$\text{m}^{-3}$  0,86, 0,88 e 6,40 para os pH's 7, 9 e 12, respectivamente. O custo do tratamento a pH 12 não leva em conta a possibilidade de obtenção de receita com a venda da água de reúso ou a utilização do lodo gerado no processo em indústrias cerâmicas, por exemplo, o que poderia diminuir custos;
5. Ainda não existe no Brasil legislação que defina os parâmetros para a água de reúso, não havendo, portanto, respaldo legal para esta atividade. Apesar disso, algumas instituições como a ANA e SABESP divulgam os parâmetros adotados por elas. Também vale ressaltar que a NBR 13.969, que sugere aplicações e

respectivos valores de parâmetros para reúso de esgotos domésticos, não foi regulamentada por decreto, não tendo valor legal no País. O mesmo ocorre com os índices adotados por instituições internacionais como a EPA, que serve apenas como um indicativo. A qualidade da drenagem ácida tratada pelo método NF-FADAT se enquadra em algumas classes de usos estabelecidas pelas referidas normas/instituições, e, segundo estas, poderia ser aplicada em diversos usos não-potáveis, urbanos ou industriais, tais como:

- ✓ Irrigação de jardins, canteiros de ruas e avenidas, parques e praças;
- ✓ Irrigação agrícola (pomares, cereais, forragens, pastagens para gados e outros cultivos);
- ✓ Chafarizes e espelhos d'água;
- ✓ Lavagem de ruas, pisos e calçadas;
- ✓ Descarga em sanitários;
- ✓ Construção civil (lavagem de agregados, preparação de concreto, compactação do solo e controle de poeira.);
- ✓ Desobstrução de rede de esgotos e águas pluviais.

## **8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Otimização do processo NF-FADAT em testes longos (validação), utilizando vazões maiores e no tratamento de DAMs mais carregadas;
- Realização de ensaios para avaliar a possibilidade de redução do consumo de ácido oléico como agente hidrofobizante no tratamento da DAM, ou sua substituição por produto similar de menor custo.
- Estudos ecotoxicológicos para determinar a viabilidade de aplicação da DAM-SS16 tratada nas atividades de aqüicultura;
- Estudos de permeabilidade do solo local para avaliação da influência da salinidade da água e a viabilidade do seu uso na irrigação de culturas locais;
- Testes utilizando a água tratada em atividades como irrigação de jardins e áreas verdes, preparação de concreto, etc, visando confirmar a viabilidade do reúso;
- Estudos e pesquisas voltadas a auxiliar o país, estados e/ou municípios na definição de critérios para o reúso de água, levando em consideração aspectos locais de qualidade necessária para a água versus eficiência de tratamentos existentes, viáveis economicamente;
- Estudos visando novas alternativas para aplicação e disposição final dos lodos gerados no processo de tratamento da DAM.

## REFERÊNCIAS

Abu-Rizaiza, O.S.; Modification of the standards of wastewater reuse in Saudi Arabia. **Water Research: Grã Bretanha**, v. 33, n 11, p. 2601-2608, 1999.

ANA, FIESP, SindusCon-SP; **Conservação e Reúso da Água em Edificações**, São Paulo, 2005.

Angelakis A. N.; Marecos do Monte, M.H.F.; Bontoux, L.; Asano, T. The status of wastewater reuse practice in the Mediterranean basin: need for guidelines. **Water Research: Grã Bretanha**, v. 33, n 10, p. 2201-2217, 1999.

APHA, AWWA, WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 19ª Edição. American Public Health Association, Washington, D. C., 1074 p., 1995.

Aquaflot. Estudo piloto e projeto básico para o tratamento do efluente do beneficiamento de carvão da mina Santa Cruz por espessador de lamelas. **Relatório Técnico**, Aquaflot Industrial Ltda. 2005.

Asano, T.; Levine, A.D. Wastewater reclamation, recycling and reuse: past, present, and future. **Water Science and Technology**, v. 33, n° 10-11, p.1-14, 1996.

Bandeira, L.F.M.; Araújo, R.V.V.; Lemos, F. A. Estudo de reúso de água industrial após remoção de metais pesados e íons sulfatos. **Anais XII Jornada de Iniciação Científica do CETEM**. Rio de Janeiro, 10 p., 2004.

Bratby, J.; **Coagulation and Flocculation: with an emphasis on water and wastewater treatment**; Uplands Press, England, 354 p., 1980

Celesc - Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A.. Disponível em <[www.celesc.com.br](http://www.celesc.com.br)> . Data: 21/02/2008.

Cadorin, L.M. **Desenvolvimento de técnicas para o tratamento de efluentes ácidos de minas por precipitação química e flotação por ar dissolvido**. Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da UFRGS, orientador: Jorge Rubio, 83 p., 2007.

Cadorin, L. M., Tabosa, E., Paiva, M. P., Rubio, J. Tratamiento de riles mineros ácidos por precipitación química y flotación por aire disuelto. **Anais IX Congreso Iberoamericano de Metalurgia y Materiales**, 8 a 13 de outubro de 2006, La Habana – Cuba, 12 p., 2006.

Canadian Council of Minister of the Environment. **Canadian Environmental Quality Guidelines for the protection agricultural water uses-Summary Table**, 7 p., 1999, updated 2005.

Capponi, F.; Sartori, M; Souza, M. L.; Rubio, J. Modified column flotation of adsorbing iron hydroxide colloidal precipitates. **International Journal of Mineral Processing**, v. 79, n. 3, p. 167-173, 2006

Carissimi, E. **Reator Gerador de Flocos – RGF: concepção e desenvolvimento básico**. Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais da UFRGS, orientador: Jorge Rubio, 75 p., 2003.

Carissimi, E.; Rubio, J. The flocs generator reactor – FGR: a new basis for flocculation and solid-liquid separation. **International Journal of Mineral Processing**, 75 (3-4), p. 237-247, 2005.

Carissimi, E. **Desenvolvimento do Reator Gerador de Flocos (RGF): Aspectos Teóricos e Aplicações no Tratamento e Reúso de Águas e Efluentes**. Tese de Doutorado PPGEM – UFRGS, orientador: Jorge Rubio, 2007.

Carissimi, E.; Gomes, C.B.; Cadorin, L.; Matiolo, E.; Rubio, J. Reaproveitamento de Águas Ácidas Residuais da Mineração de Carvão. **XXII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**, Ouro Preto-MG, 2007.

**Casan - Companhia Catarinense de Águas e Saneamento**. Disponível em <[www.casan.com.br](http://www.casan.com.br)>. Data: 21/02/2008.

CNRH. **Resolução n° 54**. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água, e dá outras providências. Conselho Nacional de Recursos Hídricos, 3 p., em vigor desde 9 de março de 2006.

CONAMA. **Resolução n° 357**. Classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamentos de efluentes, e dá outras providências. Ministério do Meio Ambiente; Conselho Nacional do Meio Ambiente, 23 p., em vigor desde 17 de março de 2005.

CONSEMA. **Resolução n° 128**. Dispõe sobre a fixação de Padrões de Emissão de Efluentes Líquidos para fontes de emissão que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul. Conselho Estadual do Meio Ambiente, 9p., em vigor desde 24 de novembro de 2006.

**Decreto Estadual n.º 4.934**. Cria o Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio Urussanga – Comitê Urussanga. Governo do Estado de Santa Catarina, 4 p., em vigor desde 01 de dezembro de 2006.

**Decreto Estadual n.º 14.250**. Regulamenta dispositivos da Lei n.º 5.793, de 15 de outubro de 1980, referentes à proteção e a melhoria da qualidade ambiental. Governo do Estado de Santa Catarina, 33 p., em vigor desde 9 de junho de 1981.

Di Bernardo, L.; Dantas, A. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**, 2ª ed., v. 1, 792 p., 2005.

Englert, A.H.; dos Santos, C.C.; Gobbi, S. A.; Rubio, J. Adsorbing flocs in expanded/fluidised bed reactors: A new basis for pollutants removal. **Minerals Engineering**, v. 19, n. 9, p. 918-924, 2006.

EPA. **Acid Mine Drainage Prediction**. U. S. Environmental Protection Agency, Technical Document, Washington, DC, EPA/530/R-94/036, 52 p., 1994.

EPA. **Guidelines for water reuse**. U. S. Environmental Protection Agency, Municipal Support Division, Washington, DC, EPA/625/R-04/108, 449 p., 2004.

Esteban, R.I.; Miguel, E.O. Present and future of wastewater reuse in Spain. **Desalination**, n. 218, p. 105-119, 2008.

Filippov, L.O.; Joussemet, R.; Houot, R.; Bubble spargers in column flotation: Adaptation to precipitate flotation; **Minerals Engineering**, v. 13, n. 1, p. 37-51, 2000.

Fo, O. S. Num paraíso da água e da mata, o inferno da pedra fósil. **Relatório da 5ª Estadia profissional**, Unicamp, Campinas/SP, 17 p, 2001.

Galatto, S.L.; Lopes, R.P.; Back, A.J.; Bif, D.Z.; Santo, E.L.;Emprego de coberturas secas no controle da drenagem ácida de mina - Estudo em campo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**; v. 12; Nº 2; p. 229-236; 2007.

Hedberg, T.; Dahlquist, J.; Karlsson, D.; Sörman, L. Development of an air removal system for dissolved air flotation. **Water Science and Technology**, v. 37, nº 9, p.81-88, 1998.

Hespanhol, I.; Potencial de reúso de água no Brasil – Agricultura, indústria, municípios, recarga de aquíferos; **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**; v. 7; n. 4; p. 75-95; 2002.

IBRAM, ANA. **A gestão dos recursos hídricos e a mineração**, 2006.

INAP. **Treatment of Sulphate in Mine Effluents**. International Network for Acid Prevention. Lorax Environmental, 129 p., Outubro, 2003. Disponível em <[http://www.inap.com.au/public\\_downloads/Research\\_Projects/Treatment\\_of\\_Sulphate\\_in\\_Mine\\_Effluents\\_-\\_Lorax\\_Report.pdf](http://www.inap.com.au/public_downloads/Research_Projects/Treatment_of_Sulphate_in_Mine_Effluents_-_Lorax_Report.pdf)> Data: 13/08/07.

Inbar, Y. New standards for treated wastewater reuse in Israel. In: Zaidi, M.K.(ed). **Wastewater Reuse –Risk Assessment, Decision-Making and Environmental Security**, Session 8, p. 291–296, 2007.

Johnson, D. B.; Hallberg, K. B. The microbiology of acidic mine waters. **Research in Microbiology**, v. 154, nº 7, p. 466-473, 2003.

Kiuri, H. J. Development of dissolved air flotation technology from the first generation to the newest (third) one (DAF in turbulent flow conditions). **Water Science and Technology**, v. 43, nº 8, p. 1-7, 2001.

Kontopoulos, A.;Acid Mine Drainage Control. In: Castro, S.H., Vergara, F. e Sanches, M.A., (Eds.). **Effluent Treatment in the Mining Industry**, University of Concepción, Chile, p.57-118, 1998.

**Lei Estadual Nº 13.517**; Dispõe sobre a política estadual de saneamento; Governo do Estado de Santa Catarina; 8 p.; 2005.

**Lei Federal Nº 9.433**; Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos; Governo Federal; 8 p.; 1997.

Lins, F. F.; Adamian, R. **Minerais coloidais, teoria DLVO estendida e forças estruturais**. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, 29 p., 2000.

Mancuso, P.C.S.; Santos, H.F. **Reuso de Água**. Manole, São Paulo; 579 p.; 2003.

Matlock, M.M., Howerton, B.S., Atwood, D.A. **Chemical precipitation of heavy metals from acid mine drainage**. *Water Research*, v. 36, p.4757 – 4764, 2002.

Metcalf & Eddy. **Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse**. McGraw-Hill, 1ª Ed., 1541 p., 2006.

Metcalf & Eddy. **Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications**. McGraw-Hill, 3ª Ed., 1334 p., 1991.

Menezes, C. T. B.; Santo, E. L.; Rubio, J.; Da Rosa, J. J.; Leal Fº, L. S.; Galato, S. L.; Izidoro, G. Tratamento de drenagem ácida de mina: Experiência da Carbonífera Metropolitana. **XX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**, Florianópolis, SC. 15-18 de junho de 2004, v. 1, Sessão 04 – Drenagem Ácida de Mina, p. 599-608, 2004.

**Plano de gestão e gerenciamento da bacia do Rio Araranguá**. UNESC/NUPEA – CPRM – Governo de SC, 1997.

**Plano Nacional dos Recursos Hídricos**; Panorama e estado dos recursos hídricos do Brasil: Volume 1 / Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos – Brasília: MMA, 2006.

Possa, M.V.; Santos, M.D.C.; Tratamento de Drenagem Ácida de Mina por Processo de Neutralização Controlada; **Centro de Tecnologia Mineral – CETEM**; Seminário Brasil - Canadá de Recuperação Ambiental de Áreas Mineradas, Florianópolis, SC, v. 1, p 233-252, 2003.

Rodrigues, R. S. **As dimensões legais e institucionais do reúso de água no Brasil: proposta de regulamentação do reúso no Brasil**. Dissertação de mestrado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, orientador: Ivanildo Hespanhol, 2005.

Rodrigues, R. T. **Desenvolvimento da técnica LTM-BSizer para a caracterização de bolhas e avaliação de parâmetro no processo de flotação**. Tese de Doutorado PPGEM – UFRGS, orientador: Jorge Rubio, 2004.

Rodrigues, R. T., Rubio, J. New basis for measuring the size distribution of bubbles. **Minerals Engineering**, v. 16, p. 757-765, 2003.

Rodrigues, R. T., Rubio, J. DAF–dissolved air flotation: Potential applications in the mining and mineral processing industry. **International Journal of Mineral Processing**, v. 82, n. 1, p. 1-13, 2007.

Rosa, J.J. **Tratamento de efluentes oleosos por floculação pneumática em linha e separação por flotação: Processo FF**, Tese de Doutorado PPGEM – UFRGS, orientador: Jorge Rubio, p.126, 2001.

Rosa, J. J., Rubio, J. The FF (flocculation-flotation) process. **Minerals Engineering**, 18, p. 701-707, 2005.

Rubio, J. Aspectos ambientais no setor minero-metalúrgico. Em: Capítulo 13 do livro “**Tratamento de Minérios**”; A.B. da Luz, M.V. Possa e S. L. de Almeida (Eds), CETEM-CNPq-MCT, p.537-570, 1998a.

Rubio, J. Environmental applications of the flotation process. Em: **Effluent Treatment in the Mining Industry**. 389 p. (S.H.Castro, F. Vergara and M. Sanchez, Eds), University of Concepción-Chile, Chapter 9, p.335-364, 1998b.

Rubio, J.; Tessele, F.; Porcile, P.A. e Marinkovic, E. Flotación como proceso de remoción de contaminantes: Principios básicos, técnicas y aplicaciones. **Minerales**, 56, Nº 242, p. 9-18, 2001.

Rubio, J.; Tessele, F.; Porcile, P.A. e Marinkovic, E. Flotación como proceso de remoción de contaminantes: Avances y aplicaciones en la flotación por aire disuelto. **Minerales**, 57, nº 243, p. 21-28, 2002a.

Rubio, J.; Souza, M. L.; Smith R.W. Overview of flotation as a wastewater treatment technique. **Minerals Engineering**, v. 15, p. 139-155, 2002b.

Rubio, J.; Carissimi, E.; Rosa, J. J. Flotation in water and wastewater treatment and reuse: recent trends in Brazil. **Int. J. Environment and Pollution**, v. 30, n. 2, p. 193-207, 2007(a).

Rubio, J.; Silva, R.; Silveira, A. Técnicas para tratamento e alternativas de reuso de águas ácidas de minas de carvão. **III Workshop Gestão e Reuso de Água na Indústria**. Jurerê Beach Village Florianópolis, Santa Catarina, Brasil. 2007(b).

SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. Disponível em <[www.sabesp.com.br](http://www.sabesp.com.br)>. Data:04/10/07.

Semura, K.A.; Riccitelli, M.; Gonçalves, M.C.; Estudo para implantação de reúso e proposição de parâmetros de qualidade para usos urbanos não potáveis a partir das ETEs da RMSP. **Anais 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Campo Grande, 2005.

Shaw, D.J.; Introdução à química dos colóides e de superfícies; tradução: Juergen Heinrich Maar. São Paulo, Edgard Blücher, Ed. da Universidade de São Paulo, 181 p., 1975.

Silva, R.D.R.; **Tratamento de drenagens ácidas de minas de carvão pelo processo NFSL – Neutralização, Floculação e Sedimentação Lamelar**. Dissertação de mestrado PPGEM – UFRGS, orientador: Jorge Rubio, 106 p., 2009.

SIRHESC - Sistema de informações sobre Recursos Hídricos do Estado de Santa Catarina. Disponível em <<http://www.sirhesc.sds.sc.gov.br/>> Data: 13/08/09.

Tessele, F.; da Rosa, J. e Rubio, J.; Os avanços da flotação no tratamento de águas, esgotos e efluentes - Parte I: Fundamentos e mecanismos. **Saneamento Ambiental**, nº 102, p. 30-36, 2004.

Tributsch, H. Direct versus indirect bioleaching. **Hydrometallurgy**, v. 59, nº 2-3, p. 177-185, 2001.

Tundisi, J.G., Recursos Hídricos, **Revista Interdisciplinar dos Centros e Núcleos da Unicamp - MultiCiência**, Instituto Internacional de Ecologia, São Carlos - SP, 2003

UNESC/NUPEA– CPRM – Governo de SC. **Plano de gestão e gerenciamento da bacia do Rio Araranguá**, 1997.

UNESCO. **Water for People, Water for Life** - UN World Water Development Report (WWDR) – Executive Summary, 2003. Disponível em: <[http://www.unesco.org/water/wwap/wwdr/ex\\_summary/](http://www.unesco.org/water/wwap/wwdr/ex_summary/)> Data: 10/07/07.

WHO. **Reuse of Effluents: Methods of Wastewater Treatment and Health Safeguards**. Report of a WHO Meeting of Experts. World Health Organization, Technical Report Series nº 517, Geneva, 1973.

WHO. **Health guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture**. Technical Report Series nº 778, World Health Organization, Geneva, 1989.

WHO. **Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater**. World Health Organization, Geneva, 2006.

**ANEXO - Publicações associadas à dissertação**

ARTIGO SUBMETIDO PARA PUBLICAÇÃO NO PERIÓDICO

“INTERNATIONAL JOURNAL OF MINERAL PROCESSING”: **TREATMENT OF ACID MINE DRAINAGE (AMD) IN SOUTH BRAZIL. COMPARATIVE ACTIVE PROCESSES AND WATER REUSE. (EM AVALIAÇÃO)**

TRABALHO PUBLICADO NO VI SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL-ABES: **TÉCNICAS PARA TRATAMENTO E ALTERNATIVAS DE REÚSO DE ÁGUAS ÁCIDAS DE MINAS DE CARVÃO.**

TRABALHO PUBLICADO NO III WORKSHOP GESTÃO E REÚSO DE ÁGUA NA INDÚSTRIA: **TÉCNICAS PARA TRATAMENTO E APROVEITAMENTO DE ÁGUAS ÁCIDAS RESIDUAIS DA MINERAÇÃO DE CARVÃO.**