

Serviço de Pós-Graduação · ESC/USP

**EXEMPLAR REVISADO**

Data de entrada no Serviço: 10.../03.../03

Ass.: *Leila Jorge Patrizzi*

**REMOÇÃO DE FERRO, MANGANÊS E  
SUBSTÂNCIAS HÚMICAS DE ÁGUA PARA  
ABASTECIMENTO, COM USO DE FLOTAÇÃO  
POR AR DISSOLVIDO DE ALTA TAXA E  
OXIDAÇÃO QUÍMICA**

**LEILA JORGE PATRIZZI**

DEDALUS - Acervo - EESC



31100043027

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Civil na área de Hidráulica e Saneamento.

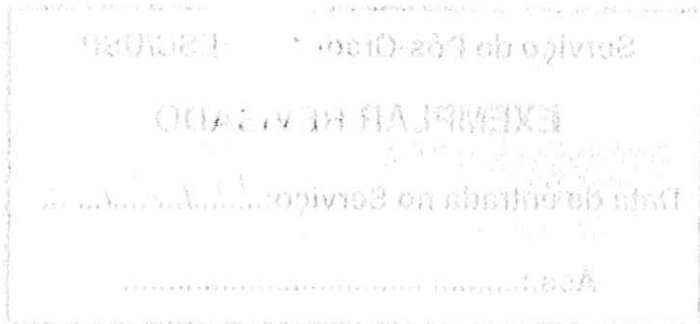
Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Penalva Reali

São Carlos

2002



Class. TESE-EESC ✓  
 Curt. P4380f  
 Tombo T074/03  
 Sysno 1310988



REMOÇÃO DE FERRO, MANGANÊS E  
 SUBSTÂNCIAS HÚMICAS DE ÁGUA PARA  
 ABASTECIMENTO, COM USO DE FLOTAÇÃO  
 POR AR DISSOLVIDO DE ALTA TAXA E  
 OXIDAÇÃO QUÍMICA

LEILA JORGE PATRIZZI

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
 da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

P314r Patrizzi, Leila Jorge  
 Remoção de ferro, manganês e substâncias húmicas de  
 água para abastecimento, com uso de flotação por ar  
 dissolvido de alta taxa e oxidação química / Leila  
 Jorge Patrizzi. -- São Carlos, 2002.


Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São  
 Carlos-Universidade de São Paulo, 2002.  
 Área: Hidráulica e Saneamento.  
 Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Penalva Reali.

1. Flotação por ar dissolvido de alta taxa. 2.  
 Remoção de substâncias húmicas, ferro, manganês de  
 água para abastecimento. 3. Oxidação de ferro e  
 manganês. I. Título.

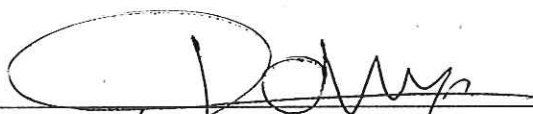
FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **LEILA JORGE PATRIZZI**

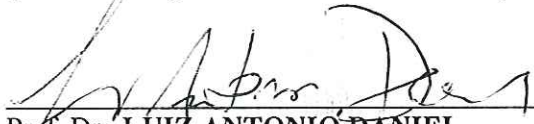
Tese defendida e julgada em 05-12-2002 perante a Comissão Julgadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **MARCO ANTONIO PENALVA REALI** (Orientador)  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)


Aprovada

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Tit. **JOSÉ ROBERTO CAMPOS**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADA

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **LUIZ ANTONIO DANIEL**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)


APROVADA

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **JORGE RUBIO ROJAS**  
(Universidade Federal do Rio Grande do Sul/UFRGS)

Aprovada

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **BERNARDO ARANTES DO NASCIMENTO TEIXEIRA**  
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Aprovada

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Associada **MARIA DO CARMO CALIJURI**  
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia (Hidráulica e Saneamento) e  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

*Aos meus pais, Lea e Fiore Patrizzi,  
meus primeiros professores, com  
quem aprendi a importância do  
saber.*

*Ao meu esposo Fábio H. T. de Carvalho,  
pela incalculável ajuda na realização  
deste trabalho, nos ensaios  
experimentais, na confecção das  
figuras, na perfeita formatação da tese  
e, principalmente, pelo carinho e  
compreensão.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, saúde e capacidade para realização deste trabalho.

De maneira muito especial ao Prof. Dr. Marco Antonio Penalva Reali, pela fundamental e competente orientação e por sua compreensão.

Ao Prof. José Roberto Campos, por todo o seu apoio e colaboração.

Ao Prof. Luiz Daniel, pelas valiosas sugestões e pronto atendimento.

Ao Prof. Bohdan, pela valiosa ajuda na tentativa de análises de imagens.

A Profa. Ruth Gouvêa Duarte, pela revisão do texto.

Ao CNPq, pela bolsa de estudo concedida.

Ao amigo Rodrigo Braga Moruzzi, de forma muito especial, pela parceria na realização da Fase 1 do trabalho, por toda a sua ajuda, amizade e compreensão.

Aos amigos, Rogério e Luci, pelas valiosas contribuições para a realização deste trabalho.

Aos amigos Renata e Marcelo, pela parceria na realização dos ensaios com a câmara de saturação.

A amiga Andréa Paula Buzzini, pelo constante apoio e amizade.

Ao Fernando Brizola que, como aluno de iniciação científica, colaborou na realização de parte dos ensaios.

Ao técnico Roberto Bérnago, de forma muito especial, pela pronta ajuda em todos os momentos e por toda a instalação hidráulica.

Ao técnico Evaldo, pela construção do módulo e por toda a ajuda nos detalhes das instalações.

Ao técnico Wagner Lamon, por toda a ajuda nas instalações elétricas.

Aos técnicos Paulo, Júlio, pelo constante apoio e por todas as determinações de ferro e manganês.

Aos técnicos Cidinha, Edson, Luís, Janja, Eloísa, pela ajuda em todos os momentos.

Ao técnico Francisco Carlos Bergamim, pela colaboração nas instalações em escala piloto e auxílio no laboratório.

A Ana Paula, técnica do LATAR, pela pronta ajuda.

Aos eletricitas, Edson e Cláudio, pelas instalações elétricas.

A oficina mecânica, Luiz Penazzi, José Lombardo, Carlos Camargo e Agno Correia, pelo pronto atendimento e construção da unidade piloto de FAD de aço inox.

Aos funcionários do departamento, Sá, Pavi, Márcia, Valderez, Cecília, Rose, Fábio, Sérgio, Valdecir, Flávia e Eduardo, pelo atencioso atendimento e por toda a ajuda em todos os momentos.

A todos os meus familiares, amigos, pela amizade e por todo o apoio.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE GRÁFICOS.....	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xxiv
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xxv
RESUMO.....	xxvi
<i>ABSTRACT</i> .....	xxvii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	4
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	5
3.1. SUBSTÂNCIAS HÚMICAS.....	5
3.1.1. Origem, Formação, Características e Propriedades Gerais.....	5
3.1.2. Definição.....	6
3.1.3. A Estrutura das Substâncias Húmicas.....	8
3.1.4. Características e Propriedades Gerais das Substâncias Húmicas.....	10
3.2. FERRO E MANGANÊS EM ÁGUAS DE ABASTECIMENTO.....	11
3.2.1. Ocorrência e Formas Predominantes em Água.....	11
3.2.2. Problemática da Presença de Concentrações de Ferro e Manganês.....	15
3.2.3. Toxicidade.....	16
3.2.4. Complexação do Ferro e Manganês com a Matéria Orgânica.....	17
3.2.5. Oxidação e Remoção.....	20
3.2.6. Formação de Trihalometanos.....	27
3.3. EVOLUÇÃO DA TECNOLOGIA DE FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO (FAD).....	28
3.3.1. Unidades Denominadas de Primeira Geração.....	28
3.3.2. Unidades Denominadas de Segunda Geração.....	29
3.3.3. Aplicação da FAD de Segunda Geração no Tratamento de Água.....	30
3.3.4. Unidades Denominadas Flotofiltro.....	33
3.3.5. Aplicação do Flotofiltro.....	34
3.3.6. Unidades Denominadas de Terceira Geração	35
3.3.7. Aplicação de Unidades de Terceira Geração com Escoamento Turbulento.....	36
3.3.8. Aplicação de Unidades de Terceira Geração com Escoamento Associado a Baixos Números de Reynolds.....	38
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
4.1. DESCRIÇÃO GERAL DAS ETAPAS DO TRABALHO.....	41
4.2. CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA DE ESTUDO.....	46
4.3. DESCRIÇÃO DAS INSTALAÇÕES UTILIZADAS NA PESQUISA.....	46

4.3.1. Colunas de Flotação em Escala de Laboratório – Flotatestes.....	47
4.3.2. Descrição da Instalação Piloto de FAD de Alta Taxa e Equipamentos Acessórios Utilizados.....	48
4.3.2.1. Descrição dos Principais Equipamentos Acessórios.....	48
4.3.2.2. Descrição Geral da Instalação e dos Principais Equipamentos Acessórios.....	50
4.3.2.3. Descrição da Unidade Piloto de FAD de Alta Taxa.....	52
4.3.3. Descrição da Unidade de Filtração Rápida Descendente com Leito em Areia.....	54
4.4. PROCEDIMENTOS ADOTADOS E PROGRAMAÇÃO DOS ENSAIOS.....	57
4.4.1. Procedimentos Adotados para Ensaios de Flotação e Sedimentação em Escala de Laboratório (ETAPA I).....	57
4.4.2. Procedimentos Adotados e Programação de Ensaios Realizados com a Instalação Piloto de Flotação de Alta Taxa (ETAPA II).....	61
4.4.2.1. Procedimentos Adotados para Ensaios de Estudo da Eficiência da Câmara de Saturação (Fase 1 da ETAPA II).....	62
4.4.2.2. Procedimentos Adotados para Ensaios da Fase 2 da ETAPA II.....	62
4.4.2.3. Procedimentos Adotados para Ensaios da Fase 3 da ETAPA II.....	63
4.4.2.4. Procedimentos Adotados para Ensaios da Fase 4 da ETAPA II.....	65
4.4.2.5. Procedimentos Adotados para Ensaios de Filtração em Escala de Laboratório (Fase 5 da ETAPA II).....	65
4.4.2.6. Procedimentos Adotados para Análise da Concentração Residual de Ar Presente no Efluente da Unidade de Flotação de Alta Taxa (Fase 6 da ETAPA II).....	66
4.5. MONITORAMENTO DOS ENSAIOS.....	67
4.5.1. Exames e Determinações Físico-Químicas.....	67
4.5.2. Monitoramento dos Parâmetros Operacionais Durante os Ensaios com as Instalações Piloto de FAD e Filtro em Areia.....	68
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	70
5.1. ENSAIOS DE REMOÇÃO DE FERRO E MANGANÊS COM USO DE OXIDAÇÃO QUÍMICA ASSOCIADA À FAD EM ESCALA DE LABORATÓRIO.....	71
5.1.1. Ensaios Tipo 1 – Aplicação do Oxidante e do Coagulante no Momento da Mistura Rápida.....	72
5.1.2. Ensaios Tipo 2 – Aplicação do Oxidante 5 Minutos Antes da Aplicação do Coagulante.....	76
5.1.3. Ensaios Tipo 3 – Aplicação do Oxidante após a Clarificação por Flotação.....	81
5.2. ENSAIOS COM VARIAÇÃO DA DOSAGEM DO OXIDANTE.....	86
5.3. ENSAIOS PARA ADEQUAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE FLOCULAÇÃO PARA FLOTAÇÃO... ..	88
5.4. ESTUDO DA REMOÇÃO DE FERRO E MANGANÊS COM USO DE OXIDAÇÃO QUÍMICA ASSOCIADA À SEDIMENTAÇÃO.....	97
5.4.1. Ensaios Tipo 1 – Aplicação do Oxidante e do Coagulante no Momento da Mistura Rápida (Fase 2 da ETAPA I).....	97



5.4.2. Resumo e Comparação dos Melhores Resultados Obtidos nos Ensaios de Flotação (Fase 1) e de Sedimentação (Fase 2).....	116
5.5. ESTUDO DA REMOÇÃO DE FERRO E MANGANÊS UTILIZANDO A OXIDAÇÃO QUÍMICA ASSOCIADA À FAD EM ESCALA PILOTO.....	123
5.5.1. Resultados Obtidos no Estudo da Eficiência da Câmara de Saturação (Fase 1 da ETAPA II).....	123
5.5.2. Resultados dos Ensaios da Fase 2 da ETAPA II.....	126
5.5.3. Resultados dos Ensaios da Fase 3 da ETAPA II.....	137
5.5.3.1. Resultados dos Ensaios da Fase 3a.....	137
5.5.3.2. Resultados dos Ensaios da Fase 3b.....	148
5.5.3.3. Resultados dos Ensaios da Fase 3c.....	158
5.5.3.4. Resultados dos Ensaios da Fase 3d.....	168
5.5.4. Comparação dos Resultados das Fases 3a, 3b, 3c e 3d da ETAPA II de estudo.....	175
5.5.5. Estudo da Dosagem de Coagulante e Oxidante (Fase 4 da ETAPA II).....	184
5.5.6. Filtração do Efluente da Unidade Piloto de FAD de Alta Taxa em Filtro Rápido Descendente com Leito em Areia.....	197
5.5.7. Análise do Oxigênio Dissolvido Presente no Flotador (Fase 6 da ETAPA II).....	209
5.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	212
6. CONCLUSÕES.....	218
7. SUGESTÕES.....	221
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	223

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1	Classificação da matéria orgânica.....	7
FIGURA 3.2	Principais grupos funcionais das substâncias húmicas.....	8
FIGURA 3.3	Esquema do tanque denominado de primeira geração.....	29
FIGURA 3.4	Esquema do tanque denominado de segunda geração.....	29
FIGURA 3.5	Esquema do tanque denominado de Flotofiltro.....	34
FIGURA 3.6	Esquema do tanque denominado de terceira geração.....	36
FIGURA 4.1	Esquema ilustrativo das fases do estudo realizado em escala de laboratório (ETAPA I) utilizando equipamento de flotação e de sedimentação em colunas.....	42
FIGURA 4.2	Esquema ilustrativo das fases do estudo em escala piloto (ETAPA II).....	45
FIGURA 4.3	Flotateste utilizado para os ensaios em escala de laboratório.....	48
FIGURA 4.4	Fotografia dos reservatórios (15 m <sup>3</sup> cada).....	49
FIGURA 4.5	Fotografia dos medidores de vazão.....	49
FIGURA 4.6	Fotografia do aquecedor da <i>CUMULUS</i> .....	49
FIGURA 4.7	Fotografia das bombas dosadoras e galões de produtos químicos com medidor volumétrico.....	49
FIGURA 4.8	Fotografia da instalação da bomba de recalque e da câmara de saturação	49
FIGURA 4.9	Fotografia com vista geral da instalação piloto, com ênfase na unidade de flotação de alta taxa e da câmara de saturação a direita.....	49
FIGURA 4.10	Esquema ilustrativo das instalações utilizadas na pesquisa.....	51
FIGURA 4.11	Fotografia das instalações da unidade piloto de FAD de alta taxa com módulo.....	53
FIGURA 4.12	Esquema da instalação piloto de flotação por ar dissolvido de alta taxa com módulo.....	53
FIGURA 4.13	Câmara de saturação do sistema de flotação.....	54
FIGURA 4.14	Distribuição granulométrica da areia utilizada como meio filtrante.....	55
FIGURA 4.15	Esquema ilustrativo da camada suporte do meio filtrante.....	55
FIGURA 4.16	Esquema ilustrativo do filtro de areia em escala de laboratório.....	56
FIGURA 4.17	Fotografia do filtro em areia.....	56
FIGURA 4.18	Fluxograma ilustrativo dos ensaios Tipo 1 (aplicação do oxidante junto com o coagulante) efetuados durante a Fase 1 da ETAPA I.....	58
FIGURA 4.19	Fluxograma ilustrativo dos ensaios Tipo 2 (aplicação do oxidante antes do coagulante) efetuados durante a Fase 1 da ETAPA I.....	58
FIGURA 4.20	Fluxograma ilustrativo dos ensaios Tipo 3 (aplicação do oxidante após pré-clarificação por FAD) efetuados durante a Fase 1 da ETAPA I.....	59
FIGURA 4.21	Fluxograma ilustrativo dos ensaios para investigação da dosagem de oxidante efetuados durante a Fase 1 da ETAPA I.....	59

FIGURA 4.22	Fluxograma ilustrativo dos ensaios para investigação dos parâmetros tempo de floculação e gradiente médio de velocidade na floculação, (Fase 1 da ETAPA I).....	60
FIGURA 4.23	Fluxograma ilustrativo do conjunto de ensaios Tipo 1, efetuados durante a Fase 2 da ETAPA I.....	60
FIGURA 4.24	Fluxograma ilustrativo do conjunto de ensaios Tipo 2, efetuados durante a Fase 2 da ETAPA I.....	61
FIGURA 4.25	Fluxograma ilustrativo do conjunto de ensaios Tipo 3, efetuados durante a Fase 2 da ETAPA I.....	61
FIGURA 4.26	Fluxograma ilustrativo do conjunto de ensaios efetuados durante a Fase 2 da ETAPA II.....	62
FIGURA 4.27	Fluxograma ilustrativo do conjunto de ensaios efetuados durante a Fase 3 da ETAPA II.....	63
FIGURA 4.28	Fluxograma ilustrativo do conjunto de ensaios efetuados durante a Fase 4 da ETAPA II.....	65
FIGURA 4.29	Fluxograma ilustrativo do conjunto de ensaios da Fase 5 da ETAPA II.....	65
FIGURA 4.30	Esquema ilustrativo dos pontos de coleta.....	67
FIGURA 5.1	Esquema dos pontos de coleta ao longo do reator.....	209
FIGURA 5.2	Estrutura conceitual da Flotação por ar.....	215

## LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1	Propriedades físicas e químicas dos ácidos húmicos e fúlvicos.....	9
TABELA 3.2	Lista das unidades de FAD utilizadas no tratamento de água na América Latina.....	32
TABELA 3.3	Resumo das dosagens dos produtos químicos aplicados nas respectivas localizações.....	38
TABELA 4.1	Características básicas da água do poço da EESC – USP.....	46
TABELA 4.2	Características básicas da água do estudo.....	46
TABELA 4.3	Parâmetros utilizados na unidade piloto de FAD de alta taxa.....	64
TABELA 5.1	Condições fixadas durante os ensaios de remoção de ferro e manganês utilizando a FAD conjugada à oxidação química.....	71
TABELA 5.2	Resultados referentes aos ensaios de FAD conjugada à oxidação química (ensaio Tipo 1) em diferentes valores de pH e diferentes dosagens de cloreto férrico (DCF).....	73
TABELA 5.3	Resumo dos melhores resultados referentes aos ensaios de FAD conjugada à oxidação (ensaio Tipo 1).....	75
TABELA 5.4	Resultados referentes aos ensaios de FAD conjugada à oxidação química (ensaio Tipo 2) em diferentes valores de pH e diferentes dosagens de cloreto férrico (DCF).....	77
TABELA 5.5	Resumo dos melhores resultados referentes aos ensaios de FAD conjugada à oxidação (ensaio Tipo 2).....	80
TABELA 5.6	Resultados referentes aos ensaios de FAD conjugada à oxidação (ensaio Tipo 3) em diferentes valores de pH e diferentes dosagens de cloreto férrico (DCF).....	82
TABELA 5.7	Resumo dos melhores resultados referentes aos ensaios de FAD conjugada à oxidação (ensaio Tipo 3).....	85
TABELA 5.8	Resumo dos melhores resultados referentes aos ensaios de FAD conjugada à oxidação (ensaio Tipo 1, 2 e 3).....	85
TABELA 5.9	Resultados referentes aos ensaios de FAD conjugada à oxidação para DCF=30 mg/L, em diferentes valores de pH e diferentes dosagens de oxidante).....	87
TABELA 5.10	Resumos dos melhores resultados referentes aos ensaios de FAD conjugada à oxidação para DCF=30 mg/L em diferentes dosagens de oxidante.....	88
TABELA 5.11	Resultados referentes aos ensaios de floculação para flotação conjugada à oxidação (ensaio Tipo 1).....	89
TABELA 5.12	Condições fixadas durante os ensaios de remoção de ferro e manganês	

	utilizando a sedimentação conjugada à oxidação química.....	97
TABELA 5.13	Características da água bruta utilizada para a realização dos ensaios que visaram a remoção de ferro e manganês com utilização da sedimentação conjugada à oxidação química.....	97
TABELA 5.14	Resultados referentes aos ensaios de sedimentação conjugada à oxidação (ensaios Tipo 1) em diferentes valores de pH com DCF=30 mg/L.....	102
TABELA 5.15	Resultados referentes aos ensaios de sedimentação conjugada à oxidação (ensaios Tipo 1, 2 e 3) no valor de pH=6,2.....	108
TABELA 5.16	Resultados referentes aos ensaios de sedimentação conjugada à oxidação (ensaios Tipo 1, 2 e 3) no valor de pH=8,5 e DCF de 30 mg/L....	109
TABELA 5.17	Melhores resultados obtidos nos ensaios de sedimentação conjugada à oxidação química.....	110
TABELA 5.18	Resultados referentes aos ensaios de sedimentação conjugada à oxidação (ensaios Tipo 1) em diferentes valores de pH com DCF=45 mg/L.....	111
TABELA 5.19	Resultados referentes aos ensaios de sedimentação conjugada à oxidação (ensaios Tipo 1, 2 e 3) no valor de pH=6,2 e DCF=45 mg/L.....	113
TABELA 5.20	Resultados referentes aos ensaios de sedimentação conjugada à oxidação (ensaios Tipo 1, 2 e 3) no valor de pH=8,1 e DCF=45 mg/L.....	115
TABELA 5.21	Resumo dos melhores resultados obtidos nos ensaios de sedimentação conjugada à oxidação química.....	116
TABELA 5.22	Quantidade de ar na câmara de saturação para pressão de saturação de 450 kPa e temperatura de 25 °C.....	124
TABELA 5.23	Quantidade de ar fornecida para o flotor e taxas utilizadas na câmara de saturação para pressão de saturação de 450 kPa e temperatura de 25°C.....	125
TABELA 5.24	Características principais da água bruta de estudo para os ensaios de 1 a 9 da Fase 2 da ETAPA II.....	135
TABELA 5.25	Características principais da água coagulada para os ensaios de 1 a 9 da Fase 2 da ETAPA II.....	135
TABELA 5.26	Tabela resumo dos resultados das amostras compostas obtidas nos ensaios de flotação de 1 a 9 da Fase 2 da ETAPA II.....	136
TABELA 5.27	Características principais da água bruta de estudo para os ensaios de 10 a 18 da Fase 3a da ETAPA II.....	146
TABELA 5.28	Características principais da água coagulada para os ensaios de 10 a 18 da Fase 3a da ETAPA II.....	146
TABELA 5.29	Tabela resumo dos resultados das amostras compostas obtidas nos ensaios de flotação de 10 a 18 da Fase 3a da ETAPA II.....	147
TABELA 5.30	Características principais da água bruta de estudo para os ensaios de 19 a 27 da Fase 3b da ETAPA II.....	156

TABELA 5.31	Características principais da água coagulada para os ensaios de 19 a 27 da Fase 3b da ETAPA II.....	156
TABELA 5.32	Tabela resumo dos resultados das amostras compostas obtidas nos ensaios de flotação de 19 a 27 da Fase 3b da ETAPA II.....	157
TABELA 5.33	Características principais da água bruta de estudo para os ensaios de 28 a 36 da Fase 3c da ETAPA II.....	166
TABELA 5.34	Características principais da água coagulada para os ensaios de 28 a 36 da Fase 3c da ETAPA II.....	166
TABELA 5.35	Tabela resumo dos resultados das amostras compostas obtidas nos ensaios de flotação de 28 a 36 da Fase 3c da ETAPA II.....	167
TABELA 5.36	Características principais da água bruta de estudo para os ensaios de 37 a 42 da Fase 3d da ETAPA II.....	173
TABELA 5.37	Características principais da água coagulada para os ensaios de 37 a 42 da Fase 3d da ETAPA II.....	173
TABELA 5.38	Tabela resumo dos resultados das amostras compostas obtidas nos ensaios de flotação de 37 a 42 da Fase 3d da ETAPA II.....	174
TABELA 5.39	Resumo das condições de ensaios na instalação piloto de flotação de alta taxa que forneceram os melhores resultados referentes a cada tempo de floculação e TAS investigados (Fases 3a, 3b, 3c e 3d).....	183
TABELA 5.40	Características principais da água bruta de estudo para os ensaios de 43 a 48 da Fase 4 da ETAPA II.....	195
TABELA 5.41	Características principais da água coagulada para os ensaios de 43 a 48 da Fase 4 da ETAPA II.....	195
TABELA 5.42	Resumo dos resultados das amostras compostas obtidas nos ensaios de flotação de 43 a 48 da Fase 4 da ETAPA II.....	196
TABELA 5.43	Características principais da água bruta de estudo para os ensaios de 49 a 50 da Fase 5 da ETAPA II.....	206
TABELA 5.44	Características principais da água coagulada para os ensaios de 49 a 50 da Fase 5 da ETAPA II.....	206
TABELA 5.45	Resumo dos resultados das amostras compostas obtidas nos ensaios 49 de flotação e de filtração da Fase 5 da ETAPA II.....	207
TABELA 5.46	Resumo dos resultados das amostras compostas obtidas nos ensaios 50 de flotação e de filtração da Fase 5 da ETAPA II.....	208
TABELA 5.47	Comparação dos resultados obtidos com utilização dos métodos Winckler com modo de coleta tradicional e Winckler com modo de coleta apropriado para amostras com bolhas de ar, aplicados na determinação de oxigênio dissolvido presente em uma mesma amostra de água a 25 °C	210
TABELA 5.48	Resultados de oxigênio dissolvido através do Método Winckler com modo de coleta adaptado para amostras com bolhas de ar.....	210

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 5.1	Frações residuais remanescentes de turbidez, cor, ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 1.....	74
GRÁFICO 5.2	Frações residuais remanescentes de turbidez, cor, ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 1.....	74
GRÁFICO 5.3	Frações residuais remanescentes de turbidez, cor, ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 1.....	75
GRÁFICO 5.4	Frações residuais remanescentes de turbidez, cor, ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 1.....	75
GRÁFICO 5.5	Frações residuais remanescentes de turbidez, cor, ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 2.....	78
GRÁFICO 5.6	Frações residuais remanescentes de turbidez, cor, ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 2.....	79
GRÁFICO 5.7	Frações residuais remanescentes de turbidez, cor, ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 2.....	79
GRÁFICO 5.8	Frações residuais remanescentes de turbidez, cor, ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 2.....	79
GRÁFICO 5.9	Frações residuais remanescentes de turbidez, cor, ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 2.....	80
GRÁFICO 5.10	Frações residuais remanescentes de turbidez, cor, ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 2.....	80
GRÁFICO 5.11	Frações residuais remanescentes de turbidez, cor, ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 3 sem oxidação.....	84
GRÁFICO 5.12	Frações residuais remanescentes de turbidez, cor, ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 3 após oxidação seguida de filtração....	84
GRÁFICO 5.13	Frações residuais remanescentes de turbidez, cor, ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 3 sem oxidação.....	84
GRÁFICO 5.14	Frações residuais remanescentes de turbidez, cor, ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 3 após oxidação seguida de filtração....	85
GRÁFICO 5.15	Frações residuais remanescentes de turbidez para ensaios de flotação Tipo 1.....	92
GRÁFICO 5.16	Frações residuais remanescentes de cor para ensaios de flotação Tipo 1.....	92
GRÁFICO 5.17	Frações residuais remanescentes de turbidez para ensaios de flotação Tipo 1.....	92
GRÁFICO 5.18	Frações residuais remanescentes de cor para ensaios de flotação Tipo 1.....	93
GRÁFICO 5.19	Frações residuais remanescentes de turbidez para ensaios de	

	flotação Tipo 1.....	93
GRÁFICO 5.20	Frações residuais remanescentes de cor para ensaios de flotação Tipo 1.....	93
GRÁFICO 5.21	Frações residuais remanescentes de turbidez para ensaios de flotação Tipo 1.....	94
GRÁFICO 5.22	Frações residuais remanescentes de cor para ensaios de flotação Tipo 1.....	94
GRÁFICO 5.23	Frações residuais remanescentes de ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 1.....	94
GRÁFICO 5.24	Frações residuais remanescentes de ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 1.....	95
GRÁFICO 5.25	Frações residuais remanescentes de ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 1.....	95
GRÁFICO 5.26	Frações residuais remanescentes de ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 1.....	95
GRÁFICO 5.27	Frações residuais remanescentes em função de valores de pH para ensaios de sedimentação Tipo 1.....	103
GRÁFICO 5.28	Frações residuais remanescentes em função de valores de pH para ensaios de sedimentação Tipo 1.....	104
GRÁFICO 5.29	Frações residuais remanescentes em função de valores de pH para ensaios de sedimentação Tipo 1.....	104
GRÁFICO 5.30	Frações residuais remanescentes em função de valores de pH para ensaios de sedimentação Tipo 1.....	104
GRÁFICO 5.31	Frações residuais remanescentes de turbidez em função de valores de pH para ensaios de sedimentação Tipo 1.....	105
GRÁFICO 5.32	Frações residuais remanescentes de cor em função de valores de pH para ensaios de sedimentação Tipo 1.....	105
GRÁFICO 5.33	Frações residuais remanescentes de ferro em função de valores de pH para ensaios de sedimentação Tipo 1.....	105
GRÁFICO 5.34	Frações residuais remanescentes de manganês em função de valores de pH para ensaios de sedimentação Tipo 1.....	106
GRÁFICO 5.35	Frações residuais remanescentes de turbidez em função das velocidades de sedimentação para pH=6,2 e ensaios de sedimentação Tipo 1.....	106
GRÁFICO 5.36	Frações residuais remanescentes de turbidez em função das velocidades de sedimentação para pH=8,5 e ensaios de sedimentação Tipo 1.....	106
GRÁFICO 5.37	Frações residuais remanescentes de cor em função das velocidades de sedimentação para pH=6,2 e ensaios de sedimentação Tipo 1.....	107



GRÁFICO 5.38	Frações residuais remanescentes de cor em função das velocidades de sedimentação para pH=8,5 e ensaios de sedimentação Tipo 1.....	107
GRÁFICO 5.39	Frações residuais remanescentes de ferro e manganês em função dos valores de pH para ensaios de sedimentação Tipo 1.....	107
GRÁFICO 5.40	Frações residuais remanescentes de turbidez obtidas após ensaios de sedimentação Tipos 1, 2 e 3.....	108
GRÁFICO 5.41	Frações residuais remanescentes de cor obtidas após ensaios de sedimentação Tipos 1, 2 e 3.....	108
GRÁFICO 5.42	Frações residuais remanescentes de ferro e manganês obtidas após ensaios de sedimentação Tipos 1, 2 e 3.....	109
GRÁFICO 5.43	Frações residuais remanescentes de turbidez obtidas após ensaios de sedimentação Tipos 1, 2 e 3.....	109
GRÁFICO 5.44	Frações residuais remanescentes de cor obtidas após ensaios de sedimentação Tipos 1, 2 e 3.....	110
GRÁFICO 5.45	Frações residuais remanescentes de ferro e manganês obtidas após ensaios de sedimentação Tipos 1, 2 e 3.....	110
GRÁFICO 5.46	Frações residuais remanescentes em função de valores de pH para ensaios de sedimentação Tipo 1.....	112
GRÁFICO 5.47	Frações residuais remanescentes de turbidez e cor em função das velocidades de sedimentação para ensaios de sedimentação Tipo 1....	113
GRÁFICO 5.48	Frações residuais remanescentes de ferro e manganês em função de valores de pH para ensaios de sedimentação Tipo 1.....	113
GRÁFICO 5.49	Frações residuais remanescentes de turbidez obtidas após ensaios de sedimentação Tipos 1, 2 e 3.....	114
GRÁFICO 5.50	Frações residuais remanescentes de cor obtidas após ensaios de sedimentação Tipos 1, 2 e 3.....	114
GRÁFICO 5.51	Frações residuais remanescentes de ferro e manganês obtidas após ensaios de sedimentação Tipos 1, 2 e 3.....	114
GRÁFICO 5.52	Frações residuais remanescentes de turbidez obtidas após ensaios de sedimentação Tipos 1, 2 e 3.....	115
GRÁFICO 5.53	Frações residuais remanescentes de cor obtidas após ensaios de sedimentação Tipos 1, 2 e 3.....	115
GRÁFICO 5.54	Frações residuais remanescentes de ferro e manganês obtidas após ensaios de sedimentação Tipos 1, 2 e 3.....	116
GRÁFICO 5.55	Frações residuais remanescentes de flotação e de sedimentação que representam ensaios com maior eficiência.....	119
GRÁFICO 5.56	Relação entre os valores de pH e de potencial zeta.....	119
GRÁFICO 5.57	Quantidade de ar na câmara de saturação (SCS) em função da taxa de aplicação superficial (m/h) para pressão de saturação de 450 kPa	

	e temperatura 25 °C.....	124
GRÁFICO 5.58	Turbidez afluente e efluente nos ensaios de flotação 1, 2 e 3 da Fase 2 da ETAPA II.....	129
GRÁFICO 5.59	Cor afluente e efluente nos ensaios de flotação 1, 2 e 3 da Fase 2 da ETAPA II.....	129
GRÁFICO 5.60	Remoção de turbidez e cor nos ensaios de flotação 1, 2 e 3 da Fase 2 da ETAPA II.....	129
GRÁFICO 5.61	Ferro digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 1, 2 e 3.....	130
GRÁFICO 5.62	Ferro não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 1, 2 e 3.....	130
GRÁFICO 5.63	Manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 1, 2 e 3.....	130
GRÁFICO 5.64	Manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 1, 2 e 3.....	130
GRÁFICO 5.65	Remoção de ferro e manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 1, 2 e 3.....	130
GRÁFICO 5.66	Remoção de ferro e manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 1, 2 e 3.....	130
GRÁFICO 5.67	Turbidez afluente e efluente nos ensaios de flotação 4, 5 e 6 da Fase 2 da ETAPA II.....	131
GRÁFICO 5.68	Cor afluente e efluente nos ensaios de flotação 4, 5 e 6 da Fase 2 da ETAPA II.....	131
GRÁFICO 5.69	Remoção de turbidez e cor nos ensaios de flotação 4, 5 e 6 da Fase 2 da ETAPA II.....	131
GRÁFICO 5.70	Ferro digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 4, 5 e 6.....	132
GRÁFICO 5.71	Ferro não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 4, 5 e 6.....	132
GRÁFICO 5.72	Manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 4, 5 e 6.....	132
GRÁFICO 5.73	Manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 4, 5 e 6.....	132
GRÁFICO 5.74	Remoção de ferro e manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 4, 5 e 6.....	132
GRÁFICO 5.75	Remoção de ferro e manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 4, 5 e 6.....	132
GRÁFICO 5.76	Turbidez afluente e efluente nos ensaios de flotação 7, 8 e 9 da Fase 2 da ETAPA II.....	133
GRÁFICO 5.77	Cor afluente e efluente nos ensaios de flotação 7, 8 e 9 da Fase 2 da ETAPA II.....	133

GRÁFICO 5.78	Remoção de turbidez e cor nos ensaios de flotação 7, 8 e 9 da Fase 2 da ETAPA II.....	133
GRÁFICO 5.79	Ferro digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 7, 8 e 9.....	134
GRÁFICO 5.80	Ferro não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 7, 8 e 9.....	134
GRÁFICO 5.81	Manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 7, 8 e 9.....	134
GRÁFICO 5.82	Manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 7, 8 e 9.....	134
GRÁFICO 5.83	Remoção de ferro e manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 7, 8 e 9.....	134
GRÁFICO 5.84	Remoção de ferro e manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 7, 8 e 9.....	134
GRÁFICO 5.85	Turbidez afluente e efluente nos ensaios de flotação 10, 11 e 12 da Fase 2 da ETAPA II.....	140
GRÁFICO 5.86	Cor afluente e efluente nos ensaios de flotação 10, 11 e 12 da Fase 2 da ETAPA II.....	140
GRÁFICO 5.87	Remoção de turbidez e cor nos ensaios de flotação 10, 11 e 12 da Fase 2 da ETAPA II.....	140
GRÁFICO 5.88	Ferro digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 10, 11 e 12	141
GRÁFICO 5.89	Ferro não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 10, 11 e 12.....	141
GRÁFICO 5.90	Manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 10, 11 e 12.....	141
GRÁFICO 5.91	Manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 10, 11 e 12.....	141
GRÁFICO 5.92	Remoção de ferro e manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 10, 11 e 12.....	141
GRÁFICO 5.93	Remoção de ferro e manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 10, 11 e 12.....	141
GRÁFICO 5.94	Turbidez afluente e efluente nos ensaios de flotação 13, 14 e 15 da Fase 2 da ETAPA II.....	142
GRÁFICO 5.95	Cor afluente e efluente nos ensaios de flotação 13, 14 e 15 da Fase 2 da ETAPA II.....	142
GRÁFICO 5.96	Remoção de turbidez e cor nos ensaios de flotação 13, 14 e 15 da Fase 2 da ETAPA II.....	142
GRÁFICO 5.97	Ferro digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 13, 14 e 15	143
GRÁFICO 5.98	Ferro não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 13, 14 e 15.....	143

GRÁFICO 5.99	Manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 13, 14 e 15.....	143
GRÁFICO 5.100	Manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 13, 14 e 15.....	143
GRÁFICO 5.101	Remoção de ferro e manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 13, 14 e 15.....	143
GRÁFICO 5.102	Remoção de ferro e manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 13, 14 e 15.....	143
GRÁFICO 5.103	Turbidez afluente e efluente nos ensaios de flotação 16, 17 e 18 da Fase 2 da ETAPA II.....	144
GRÁFICO 5.104	Cor afluente e efluente nos ensaios de flotação 16, 17 e 18 da Fase 2 da ETAPA II.....	144
GRÁFICO 5.105	Remoção de turbidez e cor nos ensaios de flotação 16, 17 e 18 da Fase 2 da ETAPA II.....	144
GRÁFICO 5.106	Ferro digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 16, 17 e 18	145
GRÁFICO 5.107	Ferro não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 16, 17 e 18.....	145
GRÁFICO 5.108	Manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 16, 17 e 18.....	145
GRÁFICO 5.109	Manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 16, 17 e 18.....	145
GRÁFICO 5.110	Remoção de ferro e manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 16, 17 e 18.....	145
GRÁFICO 5.111	Remoção de ferro e manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 16, 17 e 18.....	145
GRÁFICO 5.112	Turbidez afluente e efluente nos ensaios de flotação 19, 20 e 21 da Fase 2 da ETAPA II.....	150
GRÁFICO 5.113	Cor afluente e efluente nos ensaios de flotação 19, 20 e 21 da Fase 2 da ETAPA II.....	150
GRÁFICO 5.114	Remoção de turbidez e cor nos ensaios de flotação 19, 20 e 21 da Fase 2 da ETAPA II.....	150
GRÁFICO 5.115	Ferro digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 19, 20 e 21	151
GRÁFICO 5.116	Ferro não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 19, 20 e 21.....	151
GRÁFICO 5.117	Manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 19, 20 e 21.....	151
GRÁFICO 5.118	Manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 19, 20 e 21.....	151
GRÁFICO 5.119	Remoção de ferro e manganês digerido afluente e efluente nos	

	ensaios de flotação 19, 20 e 21.....	151
GRÁFICO 5.120	Remoção de ferro e manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 19, 20 e 21.....	151
GRÁFICO 5.121	Turbidez afluente e efluente nos ensaios de flotação 22, 23 e 24 da Fase 2 da ETAPA II.....	152
GRÁFICO 5.122	Cor afluente e efluente nos ensaios de flotação 22, 23 e 24 da Fase 2 da ETAPA II.....	152
GRÁFICO 5.123	Remoção de turbidez e cor nos ensaios de flotação 22, 23 e 24 da Fase 2 da ETAPA II.....	152
GRÁFICO 5.124	Ferro digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 22, 23 e 24	153
GRÁFICO 5.125	Ferro não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 22, 23 e 24.....	153
GRÁFICO 5.126	Manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 22, 23 e 24.....	153
GRÁFICO 5.127	Manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 22, 23 e 24.....	153
GRÁFICO 5.128	Remoção de ferro e manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 22, 23 e 24.....	153
GRÁFICO 5.129	Remoção de ferro e manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 22, 23 e 24.....	153
GRÁFICO 5.130	Turbidez afluente e efluente nos ensaios de flotação 25, 26 e 27 da Fase 2 da ETAPA II.....	154
GRÁFICO 5.131	Cor afluente e efluente nos ensaios de flotação 25, 26 e 27 da Fase 2 da ETAPA II.....	154
GRÁFICO 5.132	Remoção de turbidez e cor nos ensaios de flotação 25, 26 e 27 da Fase 2 da ETAPA II.....	154
GRÁFICO 5.133	Ferro digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 25, 26 e 27	155
GRÁFICO 5.134	Ferro não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 25, 26 e 27.....	155
GRÁFICO 5.135	Manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 25, 26 e 27.....	155
GRÁFICO 5.136	Manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 25, 26 e 27.....	155
GRÁFICO 5.137	Remoção de ferro e manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 25, 26 e 27.....	155
GRÁFICO 5.138	Remoção de ferro e manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 25, 26 e 27.....	155
GRÁFICO 5.139	Turbidez afluente e efluente nos ensaios de flotação 28, 29 e 30 da Fase 2 da ETAPA II.....	160

GRÁFICO 5.140	Cor afluyente e efluente nos ensaios de flotação 28, 29 e 30 da Fase 2 da ETAPA II.....	160
GRÁFICO 5.141	Remoção de turbidez e cor nos ensaios de flotação 28, 29 e 30 da Fase 2 da ETAPA II.....	160
GRÁFICO 5.142	Ferro digerido afluyente e efluente nos ensaios de flotação 28, 29 e 30	161
GRÁFICO 5.143	Ferro não digerido afluyente e efluente nos ensaios de flotação 28, 29 e 30.....	161
GRÁFICO 5.144	Manganês digerido afluyente e efluente nos ensaios de flotação 28, 29 e 30.....	161
GRÁFICO 5.145	Manganês não digerido afluyente e efluente nos ensaios de flotação 28, 29 e 30.....	161
GRÁFICO 5.146	Remoção de ferro e manganês digerido afluyente e efluente nos ensaios de flotação 28, 29 e 30.....	161
GRÁFICO 5.147	Remoção de ferro e manganês não digerido afluyente e efluente nos ensaios de flotação 28, 29 e 30.....	161
GRÁFICO 5.148	Turbidez afluyente e efluente nos ensaios de flotação 31, 32 e 33 da Fase 2 da ETAPA II.....	162
GRÁFICO 5.149	Cor afluyente e efluente nos ensaios de flotação 31, 32 e 33 da Fase 2 da ETAPA II.....	162
GRÁFICO 5.150	Remoção de turbidez e cor nos ensaios de flotação 31, 32 e 33 da Fase 2 da ETAPA II.....	162
GRÁFICO 5.151	Ferro digerido afluyente e efluente nos ensaios de flotação 31, 32 e 33	163
GRÁFICO 5.152	Ferro não digerido afluyente e efluente nos ensaios de flotação 31, 32 e 33.....	163
GRÁFICO 5.153	Manganês digerido afluyente e efluente nos ensaios de flotação 31, 32 e 33.....	163
GRÁFICO 5.154	Manganês não digerido afluyente e efluente nos ensaios de flotação 31, 32 e 33.....	163
GRÁFICO 5.155	Remoção de ferro e manganês digerido afluyente e efluente nos ensaios de flotação 31, 32 e 33.....	163
GRÁFICO 5.156	Remoção de ferro e manganês não digerido afluyente e efluente nos ensaios de flotação 31, 32 e 33.....	163
GRÁFICO 5.157	Turbidez afluyente e efluente nos ensaios de flotação 34, 35 e 36 da Fase 2 da ETAPA II.....	164
GRÁFICO 5.158	Cor afluyente e efluente nos ensaios de flotação 34, 35 e 36 da Fase 2 da ETAPA II.....	164
GRÁFICO 5.159	Remoção de turbidez e cor nos ensaios de flotação 34, 35 e 36 da Fase 2 da ETAPA II.....	164
GRÁFICO 5.160	Ferro digerido afluyente e efluente nos ensaios de flotação 34, 35 e 36	165

GRÁFICO 5.161	Ferro não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 34, 35 e 36.....	165
GRÁFICO 5.162	Manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 34, 35 e 36.....	165
GRÁFICO 5.163	Manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 34, 35 e 36.....	165
GRÁFICO 5.164	Remoção de ferro e manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 34, 35 e 36.....	165
GRÁFICO 5.165	Remoção de ferro e manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 34, 35 e 36.....	165
GRÁFICO 5.166	Turbidez afluente e efluente nos ensaios de flotação 37, 38 e 39 da Fase 2 da ETAPA II.....	169
GRÁFICO 5.167	Cor afluente e efluente nos ensaios de flotação 37, 38 e 39 da Fase 2 da ETAPA II.....	169
GRÁFICO 5.168	Remoção de turbidez e cor nos ensaios de flotação 34, 35 e 36 da Fase 2 da ETAPA II.....	169
GRÁFICO 5.169	Ferro digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 37, 38 e 39	170
GRÁFICO 5.170	Ferro não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 37, 38 e 39.....	170
GRÁFICO 5.171	Manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 37, 38 e 39.....	170
GRÁFICO 5.172	Manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 37, 38 e 39.....	170
GRÁFICO 5.173	Remoção de ferro e manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 37, 38 e 39.....	170
GRÁFICO 5.174	Remoção de ferro e manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 37, 38 e 39.....	170
GRÁFICO 5.175	Turbidez afluente e efluente nos ensaios de flotação 40, 41 e 42 da Fase 2 da ETAPA II.....	171
GRÁFICO 5.176	Cor afluente e efluente nos ensaios de flotação 40, 41 e 42 da Fase 2 da ETAPA II.....	171
GRÁFICO 5.177	Remoção de turbidez e cor nos ensaios de flotação 40, 41 e 42 da Fase 2 da ETAPA II.....	171
GRÁFICO 5.178	Ferro digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 40, 41 e 42	172
GRÁFICO 5.179	Ferro não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 40, 41 e 42.....	172
GRÁFICO 5.180	Manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 40, 41 e 42.....	172
GRÁFICO 5.181	Manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação	

	40, 41 e 42.....	172
GRÁFICO 5.182	Remoção de ferro e manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 40, 41 e 42.....	172
GRÁFICO 5.183	Remoção de ferro e manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 40, 41 e 42.....	172
GRÁFICO 5.184	Residuais de turbidez em função da TAS.....	179
GRÁFICO 5.185	Residuais de turbidez em função do tempo de floculação.....	179
GRÁFICO 5.186	Residuais de cor aparente em função da TAS.....	179
GRÁFICO 5.187	Residuais de cor aparente em função do tempo de floculação.....	180
GRÁFICO 5.188	Residuais de ferro em função da TAS.....	180
GRÁFICO 5.189	Residuais de ferro em função do tempo de floculação.....	180
GRÁFICO 5.190	Residuais de manganês total em função da TAS.....	181
GRÁFICO 5.191	Residuais de manganês total em função do tempo de floculação.....	181
GRÁFICO 5.192	Diâmetro médio das partículas residuais após flotação em função do tempo de floculação.....	181
GRÁFICO 5.193	Diâmetro médio das partículas residuais após flotação em função da taxa de aplicação superficial.....	182
GRÁFICO 5.194	Turbidez afluente e efluente nos ensaios 43 de flotação (sem cloro) e 44 (com cloro).....	189
GRÁFICO 5.195	Cor afluente e efluente nos ensaios 43 de flotação (sem cloro) e 44 (com cloro).....	189
GRÁFICO 5.196	Remoção de turbidez e cor afluente e efluente nos ensaios 43 de flotação (sem cloro) e 44 (com cloro).....	189
GRÁFICO 5.197	Ferro residual afluente e efluente nos ensaios 43 de flotação (sem cloro) e 44 (com cloro).....	190
GRÁFICO 5.198	Manganês residual afluente e efluente nos ensaios 43 de flotação (sem cloro) e 44 (com cloro).....	190
GRÁFICO 5.199	Remoção de ferro e manganês residual nos ensaios 43 de flotação (sem cloro) e 44 (com cloro).....	190
GRÁFICO 5.200	Turbidez afluente e efluente nos ensaios 45 de flotação (sem cloro) e 46 (com cloro).....	191
GRÁFICO 5.201	Cor afluente e efluente nos ensaios 45 de flotação (sem cloro) e 46 (com cloro).....	191
GRÁFICO 5.202	Remoção de turbidez e cor afluente e efluente nos ensaios 45 de flotação (sem cloro) e 46 (com cloro).....	191
GRÁFICO 5.203	Ferro residual afluente e efluente nos ensaios 45 de flotação (sem cloro) e 46 (com cloro).....	192
GRÁFICO 5.204	Manganês residual afluente e efluente nos ensaios 45 de flotação (sem cloro) e 46 (com cloro).....	192



GRÁFICO 5.205	Remoção de ferro e manganês residual nos ensaios 45 de flotação (sem cloro) e 46 (com cloro).....	192
GRÁFICO 5.206	Turbidez afluente e efluente nos ensaios 47 de flotação (sem cloro) e 48 (com cloro).....	193
GRÁFICO 5.207	Cor afluente e efluente nos ensaios 47 de flotação (sem cloro) e 48 (com cloro).....	193
GRÁFICO 5.208	Remoção de turbidez e cor afluente e efluente nos ensaios 47 de flotação (sem cloro) e 48 (com cloro).....	193
GRÁFICO 5.209	Ferro residual afluente e efluente nos ensaios 47 de flotação (sem cloro) e 48 (com cloro).....	194
GRÁFICO 5.210	Manganês residual afluente e efluente nos ensaios 47 de flotação (sem cloro) e 48 (com cloro).....	194
GRÁFICO 5.211	Remoção de ferro e manganês residual nos ensaios 47 de flotação (sem cloro) e 48 (com cloro).....	194
GRÁFICO 5.212	Turbidez efluente no ensaio 49 de flotação e de filtração.....	201
GRÁFICO 5.213	Cor efluente no ensaio 49 de flotação e de filtração.....	201
GRÁFICO 5.214	Ferro digerido no ensaio 49 de flotação e de filtração.....	201
GRÁFICO 5.215	Ferro não digerido no ensaio 49 de flotação e de filtração.....	202
GRÁFICO 5.216	Manganês digerido no ensaio 49 de flotação e de filtração.....	202
GRÁFICO 5.217	Manganês não digerido no ensaio 49 de flotação e de filtração.....	202
GRÁFICO 5.218	Turbidez efluente no ensaio 50 de flotação e de filtração.....	203
GRÁFICO 5.219	Cor efluente no ensaio 50 de flotação e de filtração.....	203
GRÁFICO 5.220	Ferro digerido no ensaio 50 de flotação e de filtração.....	203
GRÁFICO 5.221	Ferro não digerido no ensaio 50 de flotação e de filtração.....	204
GRÁFICO 5.222	Manganês digerido no ensaio 50 de flotação e de filtração.....	204
GRÁFICO 5.223	Manganês não digerido no ensaio 50 de flotação e de filtração.....	204
GRÁFICO 5.224	Distribuição de tamanho das partículas presentes após flotação (TAS=13 m/h) e após filtração (TAS=10 m/h).....	205
GRÁFICO 5.225	Distribuição de tamanho das partículas presentes após flotação (TAS=13 m/h) e após filtração (TAS=10 m/h).....	205
GRÁFICO 5.226	Diâmetro médio das partículas após flotação e após filtração.....	205

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FAD	Flotação por Ar Dissolvido
ST (mg/L)	Sólidos Totais
SF (mg/L)	Sólidos Fixos
SV (mg/L)	Sólidos Voláteis
SST (mg/L)	Sólidos Suspensos Totais
SSF (mg/L)	Sólidos Suspensos Fixos
SSV (mg/L)	Sólidos Suspensos Voláteis
SS (mL/L)	Sólidos Sedimentáveis
COT (mg/L)	Carbono Orgânico Total
DQO (mg/L)	Demanda Química de Oxigênio
THM	Trihalometanos
TOX	Compostos Halogenados Totais
NPTOX	Compostos Organoclorados Não Voláteis
USEPA	<i>US Environmental Protection Agency</i>
TAS (m/h)	Taxa de Aplicação Superficial
FADEHBR	Flotação por Ar Dissolvido com Escoamento Horizontal e Baixo Número de Reynolds
DCF (mg/L)	Dosagem de Cloreto Férrico
DCI (mg/L)	Dosagem de Cloro
DSA (mg/L)	Dosagem de Sulfato de Alumínio
OD	Oxigênio Dissolvido
MOD	Matéria Orgânica Dissolvida
pH <sub>oxid</sub>	pH de Oxidação
PH <sub>coag</sub>	pH de Coagulação
D/ND	Digerido/Não Digerido
nd	Não Detectado
Rey	Número de Reynolds
Rh	Raio Hidráulico

## LISTA DE SÍMBOLOS

$G_F$	Gradiente Médio de Velocidade na Floculação ( $s^{-1}$ )
$t_F$	Tempo de Floculação (minutos)
$G_{MR}$	Gradiente Médio de Velocidade na Mistura Rápida ( $s^{-1}$ )
$t_{MR}$	Tempo de Mistura Rápida (segundos)
$S_{SC}$	Quantidade de Ar (em massa) Presente na Câmara de Saturação (g de ar/ $m^3$ de água)
$S_{FLO}$	Quantidade de Ar (em massa) Fornecido para a Flotação (g de ar/ $m^3$ de água)
$Q_{AF}$	Vazão de Entrada nos Floculadores (L/h)
$Q$	Vazão de Recirculação (L/h)

## RESUMO

**PATRIZZI, L. J. (2002).** Remoção de ferro, manganês e substâncias húmicas de água para abastecimento, com uso de flotação por ar dissolvido de alta taxa e oxidação química. São Carlos, 2002. 232p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

O presente trabalho teve como objetivos estudar a potencialidade da FAD associada à oxidação química e comparar com a sedimentação também conjugada à oxidação química, em escala de laboratório, além de avaliar a eficiência de uma unidade piloto de FAD lamelar de alta taxa com escoamento horizontal no tratamento de água contendo ferro, manganês e matéria orgânica em concentrações acima dos padrões de potabilidade. Nos ensaios de flotação em escala de laboratório, entre os valores de dosagem de coagulante (cloreto férrico) investigados (na faixa de 15 a 35 mg/L) – o valor de 30 mg/L associado ao pH em torno de 6,2 e à aplicação de 2,7 mg/L de cloro, na forma de hipoclorito de sódio – apresentou os melhores resultados de remoção de cor, turbidez, ferro e manganês. No caso da sedimentação, também em escala de laboratório, dentre os valores de dosagem de coagulante investigados (30 e 45 mg/L), foi o valor de 30 mg/L associado a valor de pH em torno de 8,5 e à aplicação de 2,7 mg/L de cloro, que forneceu os melhores resultados de remoção de turbidez, ferro e manganês. A comparação entre a clarificação por FAD e por sedimentação da água de estudo, consideradas as melhores condições de coagulação e de floculação, mostrou que a flotação apresentou resultados de remoção de turbidez, cor aparente e ferro muito superiores aos obtidos nos ensaios de sedimentação. A unidade piloto de FAD lamelar de alta taxa com escoamento horizontal apresentou elevada eficiência de clarificação da água de estudo após prévia adequação das condições de oxidação química, coagulação e floculação, em escala de laboratório. Essa unidade foi capaz de operar, com excelente desempenho, com taxas de até 39 m/h, desde que fossem fornecidos 4,3 g de ar/m<sup>3</sup> de água e tempo de floculação de 20 minutos. Finalmente, após o estudo e adequação das condições de coagulação, floculação e flotação por ar dissolvido, o efluente do flotador foi filtrado em unidade de filtração rápida descendente com leito de areia tendo apresentado residuais de turbidez em torno de 0,40 uT, cor aparente menor que 2 uC, ferro em torno de 0,10 mg/L e manganês igual a 0,02 mg/L, tanto para o efluente com taxa de flotação de 13 m/h quanto para 39 m/h, após 4 horas de filtração. Isto confirma a utilização, com elevada eficiência, da unidade piloto lamelar de alta taxa e escoamento horizontal com taxas de até 39 m/h, como pré-clarificação da água de estudo.

**PALAVRAS CHAVE:** Flotação por ar dissolvido de alta taxa; remoção de substâncias húmicas, ferro, manganês de água para abastecimento; oxidação de ferro e manganês.

## ***ABSTRACT***

**PATRIZZI, L. J. (2002).** Removal of iron, manganese and humic substances from source water by means of high-rate dissolved air flotation and chemical oxidation. São Carlos, 2002. 232p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The aim of this research was to study and compare the potentiality of DAF and sedimentation processes associated with chemical oxidation, using lab scale (batch) as well as to assess the efficiency of a high-rate dissolved air flotation piloto unit with horizontal flow followed by a rapid sand bed filtration system, in the treatment of water with high concentration of iron, manganese and humic substances. For the essays in lab scale, among the values of coagulant dosage investigated (ferric chloride, in the range of 15-35 mg/L), the dosage of 30 mg/L associated to a pH value around 6.2 and oxidant dosage 2.7 mg/L of chlorine, in the form of sodium hypochlorite, presented the best results, in terms of color, turbidity, iron and manganese removal. For the sedimentation essays, also performed in lab scale, among the values of coagulant dosage investigated (30-45 mg/L), the dosage of 30 mg/L associated to 2.7 mg/L of chlorine supplied the best removal results for turbidity, iron and manganese. The comparison between dissolved air flotation and sedimentation clarification in lab scale, when the best conditions of coagulation and flocculation were carried out to both processes, showed that the results for flotation were highly better than the results obtained by sedimentation, in terms of turbidity, color and iron removal. The high-rate DAF piloto unit with horizontal flow showed high clarification efficiency after previous adaptation of the conditions of chemical oxidation, coagulation and flocculation, as investigated at the lab essays. The unit operated with excellent performance using high rates up to 39 m/h, since it was supplied 4.3 g of air/m<sup>3</sup> of water and flocculation time of 20 minutes. The sand bed unit of rapid filtration showed high performance in removal of turbidity (around 0.40 uT), color (< 2 uC), iron (around 0.10 mg/L) and manganese (0.02 mg/L), with 4 hours of filtration, when rates from 13 to 39 m/h were used in the high-rate DAF piloto unit. This fact confirms that the use of the high-rate DAF piloto unit with rates up to 39 m/h is feasible with high efficiency as a pre-clarification to the water evaluated.

**Keywords:** High-rate DAF; removal of humic substances, iron and manganese from source water; oxidation of iron and manganese.

## 1. INTRODUÇÃO

As águas que contêm ferro e manganês em elevadas concentrações, além de causarem problemas relacionados à cor, sabor e manchas em aparelhos sanitários e tecidos, favorecem o crescimento de bactérias (que utilizam o ferro como fonte energética) e, ainda, podem obstruir canalizações e alterar a qualidade da água distribuída à população. Tudo isso interfere na confiança da comunidade em relação à qualidade da água que lhe é fornecida.

Segundo KNOCHE et al (1991), o ferro é complexado de forma eficiente com matéria orgânica dissolvida, tal como as substâncias húmicas, formando complexos orgânicos difíceis de serem removidos por oxidação, com subsequente precipitação do ferro.

As tecnologias de tratamento de água, destinadas ao abastecimento, devem garantir o fornecimento de água potável de acordo com os padrões de potabilidade, para dar segurança aos consumidores e bom funcionamento das unidades de distribuição. Os padrões de potabilidade limitam as concentrações máximas de ferro e manganês a miligramas do metal por litro de água. Nos diferentes países esses limites máximos variam de acordo com sua legislação, algumas mais restritivas que outras. A Portaria nº 1469 de 19 de Janeiro de 2001 do Ministério da Saúde do Brasil, assim como as legislações dos Estados Unidos da América e do Canadá, limitam concentrações de ferro e manganês em valores máximos de 0,30 mg/L e 0,10 mg/L, respectivamente. A legislação da Alemanha e a da própria Comunidade Econômica Européia adotam limites máximos de concentrações de ferro e manganês de 0,20 mg/L e de 0,05mg/L, respectivamente.

Atualmente, verifica-se número expressivo de sistemas convencionais de tratamento de água que apresentam problemas devido à presença de ferro e manganês em concentrações acima dos padrões de potabilidade pois, para a remoção destes, as estações normalmente elevam o valor do pH para valores superiores a 8,0 e aplicam dosagens elevadas de oxidante, o que acarreta consumo elevado de produtos químicos e, em grande número de casos, não garante eficiência de remoção. Neste contexto, KNOCHE et al (1991) comentam que, antes de 1975 o controle do ferro e manganês envolvia a aplicação do cloro isolado ou combinado com o permanganato de potássio em valores de pH alcalinos para promover a oxidação dos íons metálicos. Dosagens de cloro livre de 5 mg/L têm sido reportadas. Na última década, muitas dessas práticas têm sido reestruturadas em virtude da ênfase na remoção de matéria orgânica e controle dos subprodutos da cloração. A aplicação de oxidantes alternativos, mais recentemente, e de seus altos custos em relação ao cloro, tem forçado muitos projetistas a reduzirem a dosagem dos oxidantes. Em águas contendo matéria orgânica, a competição entre

estas e as formas reduzidas dos metais tem resultado em ineficientes oxidações do ferro  $Fe^{+2}$  e do manganês  $Mn^{+2}$ .

Para esse tipo de água, ao invés de se priorizar a obtenção de condições "ótimas" de oxidação dos metais, o mais recomendável seria buscar, primeiro, as melhores condições de coagulação para remoção de substâncias húmicas. Desta forma, como parte significativa dos metais (Fe e Mn) encontra-se complexada com tais substâncias, promover-se-ia, indiretamente, a remoção dos mesmos.

Por outro lado, sabe-se que a flotação por ar dissolvido (FAD) constitui, comprovadamente, alternativa eficaz para o tratamento de água com altas concentrações de substâncias húmicas (REALI, 1984, RESS 1979, REALI 1991, REALI & CAMPOS 1993, EDZWALD 1995, VAN PUFFELEN 1995, HEINANEN 1995, REALI & CAMPOS 1995, DOMBROSKI, REALI & MARCHETTO 1996, REALI & CAMPOS 1995, SANTOS 1997, entre outros).

A flotação por ar dissolvido, segundo ZABEL (1985), quando aplicada à clarificação de águas para abastecimento, apresenta algumas vantagens adicionais sobre a sedimentação, principalmente no tratamento de água que contém altas concentrações de substâncias húmicas. Como pode ser operada com altas taxas de aplicação superficial, resulta em unidades menores que mais rapidamente podem ser colocadas em operação e produzir lodo com elevado teor de sólidos.

EDZWALD et al (1992) relatam que a FAD tem sido utilizada em mais de 20 países na Europa e se tornou um dos métodos preferidos de clarificação na Inglaterra, Bélgica, Holanda e nos países Escandinavos.

No Brasil, a aplicação da FAD como etapa do tratamento de água para abastecimento, começou a ser estudada a partir da década de 80 por pesquisadores do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos EESC – USP. Um dos primeiros trabalhos foi apresentado por REALI, em 1984, seguido de outros desenvolvidos tanto em escala de laboratório quanto em escala piloto: COELHO, REALI & CAMPOS (1991), REALI & GIANOTTI (1993), REALI & CAMPOS (1993), REALI & CAMPOS (1995), LOBATO & REALI (1995), REALI & MARCHETTO (1996), DOMBROSKI, REALI & MARCHETTO (1996), REALI & DOMBROSKI (1996), REALI & SANTOS (1996), SANTOS & REALI (1996), MARCHETTO & REALI (1997), MARCHIORETTO & REALI (1997), MARCHETTO & REALI (1997), REALI & SARTORI (1998), PATRIZZI, REALI & CORDEIRO (1999), SARTORI & REALI (1999), REALI & SARTORI (2000), REALI & MARCHETTO (2000), REALI, PATRIZZI & CORDEIRO (2000) e MORUZZI, PATRIZZI & REALI (2001).

Dentro desta mesma linha de investigação, em projeto de pesquisa financiado pela FAPESP – Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (Processo nº 1993 / 2707 – 9) intitulado "Proposição e Avaliação de uma Unidade de FAD com escoamento Laminar Aplicada ao Tratamento de Água de Abastecimento", REALI (1993) propôs o emprego de unidades não convencionais de FAD (flotação por ar dissolvido de alta taxa) para o tratamento de águas de abastecimento. Neste tipo de unidade, obtém-se escoamento associado a baixos

---

valores de número de Reynolds através da implantação de módulos especiais contendo placas planas paralelas, no interior da unidade de flotação. Devido ao escoamento com baixo número de Reynolds, essas unidades apresentam grande compacidade, sendo capazes de operar com taxas tão elevadas quanto 40 m/h, com elevada eficiência de clarificação aliada à estabilidade operacional e rapidez para entrada em regime de equilíbrio dinâmico.

Com base nesses fatos, a proposta foi estudar a potencialidade dos processos de FAD associada à oxidação química e de sedimentação conjugada à oxidação química, em escala de laboratório (alimentação por batelada), e comparar esses resultados. Além disso, foi avaliada a eficiência de uma unidade piloto de flotação por ar dissolvido de alta taxa com escoamento horizontal e baixo número de Reynolds (FADEHBR), no tratamento de água contendo ferro, manganês e matéria orgânica em altas concentrações. O trabalho foi dividido em duas etapas, sendo a ETAPA I constituída de duas fases e a ETAPA II constituída de seis fases. A Fase 1 da ETAPA I foi desenvolvida em parceria com o aluno então mestrando Rodrigo Braga Moruzzi.



## 2. OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho consistiu da proposição e avaliação de sistema que combina os processos de oxidação química, coagulação, e de flotação por ar dissolvido de alta taxa aplicado ao tratamento de água com concentrações de substâncias húmicas, ferro e manganês acima dos padrões de potabilidade.

Para a consecução do objetivo geral, foram cumpridas diversas etapas de trabalho, as quais configuraram os seguintes objetivos específicos:

i) Com o emprego de unidades de flotação por ar dissolvido, em escala de laboratório com alimentação por batelada, investigar as melhores condições de oxidação com cloro (dentre três diferentes momentos de aplicação do oxidante), de coagulação química, de floculação e de flotação, que favorecessem melhor eficiência de remoção de substâncias húmicas, ferro e manganês da água de estudo.

ii) Com emprego de colunas de sedimentação, em escala de laboratório com alimentação por batelada, selecionar condições adequadas de coagulação química, floculação, sedimentação e melhor momento de aplicação do oxidante com vistas à remoção de substâncias húmicas, ferro e manganês da água de estudo, para possibilitar comparação com os estudos de flotação.

iii) Verificar a influência da taxa de aplicação superficial, do tempo de floculação, do gradiente médio de velocidade na floculação e da quantidade de ar requerida na eficiência da flotação, em unidade lamelar de alta taxa com escoamento horizontal (em escala piloto), aplicada à clarificação da água de estudo.

### 3. REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1. SUBSTÂNCIAS HÚMICAS

##### 3.1.1. Origem, Formação, Características e Propriedades Gerais

As substâncias húmicas, constituintes orgânicos mais importantes dos encontrados em sedimentos e solos, estão amplamente distribuídas pela superfície terrestre (SCHINITZER & KHAN, 1978).

As águas naturais, provenientes de lagos, rios ou grandes reservatórios, podem apresentar coloração que varia do amarelo ao marrom escuro ou preto. A cor de tais águas é consequência, principalmente, da decomposição de matéria orgânica - tanto animal quanto vegetal - existente nos próprios mananciais ou em suas margens e arredores.

As substâncias húmicas, principais responsáveis pela cor das águas naturais, originam-se da decomposição da matéria orgânica, através de mecanismos ainda pouco conhecidos. Elas têm propriedades ácidas e hidrofílicas e massas moleculares relativas da ordem de  $10^{-19}$  a  $10^{-16}$  mg. Dependendo do tipo de água, o conteúdo de substâncias húmicas varia de 50 a 80% da concentração média do carbono orgânico dissolvido nos sistemas aquáticos (BRAUN, FRIMMEL E SCHULTEN, 1989)<sup>1</sup> citados por SANTAELLA (1993).

De acordo com MYNENI, BROWN, MARTINEZ & MEYER-ILSE (1999), as substâncias húmicas são polieletrólitos naturais orgânicos formados pela decomposição bioquímica de plantas e animais. Sua estrutura macromolecular e química é determinada pelo processo biogeoquímico. Estudos realizados pelos autores, através da análise em espectromicroscopia de raio-x, evidenciam que as substâncias húmicas apresentam estrutura macromolecular que é função da sua origem, solução química e minerais associados. As substâncias húmicas não são formadas simplesmente por colóides ácidos, soluções eletrólitas fortes e estruturas alongadas em soluções alcalinas. A estrutura macromolecular dessas substâncias comumente é modificada por contaminantes solúveis, pela biotransformação e pelo ciclo do carbono nos solos e sedimentos.

Citando STEVENSON (1994)<sup>2</sup> e ORLOV (1995)<sup>3</sup>, MYNENI, BROWN, MARTINEZ & MEYER-ILSE (1999), afirmam que as substâncias húmicas existem primariamente como íons solúveis em baixas concentrações e formam colóides e precipitados em altas concentrações ou quando

1 BRAUN, G. A.; FRIMMEL, F. H.; SCHULTEN, H. R. (1987). Structural investigations of aquatic humic substances by pyrolysis-field ionization mass spectrometry and pyrolysis-gas chromatography mass spectrometry. *Water Research*, v.23, n.12, p.1045-1052.

2 STEVENSON, F. J. (1994). *Humus Chemistry*. Wiley, New York.

reagem com cátions e prótons. Essas mudanças podem afetar substancialmente a estrutura macromolecular das substâncias húmicas e, conseqüentemente, afetar a química de superfície dos colóides, a estabilidade dos organominerais agregados e a retenção de poluentes e carbono em solos e sedimentos.

### 3.1.2. Definição

Segundo BECKETT (1990), as substâncias húmicas (amareladas, vermelhas ou marrons), podem ser extraídas dos solos e sedimentos por soluções alcalinas. Sua importância tem despertado interesse primeiramente por cientistas que estudam o comportamento das substâncias húmicas no solo, suas condições (estrutura), retenção de umidade e fertilidade. A maioria dos trabalhos têm um desenvolvimento no sentido de caracterização da estrutura das substâncias húmicas. Recentemente, cientistas que estudam a água reconheceram compostos similares presentes na maioria das águas naturais com importante papel em muitos processos aquáticos. Com o incremento da ênfase da química ambiental, na última década mais pesquisas vêm focando a elucidação da estrutura das substâncias húmicas. O fato dessas substâncias húmicas não serem compostos simples, mas misturas complexas, é reflexo das vagas definições encontradas na literatura. As definições são mais uma informação operacional de como isolar estes compostos, sem indicar precisamente o que elas são.

Segundo o mesmo autor, não somente a complexidade da estrutura das substâncias húmicas impede elucidação de sua estrutura, mas também o fato de as moléculas compreenderem as diferentes fontes em que são coletadas no meio ambiente.

De acordo com TOLEDO (1973), as substâncias húmicas têm sido definidas na literatura de maneiras bem diversas, como conseqüência de sua natureza complexa e do fato de não constituírem uma classe definida, mas um grupo dinâmico de compostos heterogêneos que constantemente mudam com o tempo e a conjuntura ambiental.

Não é sabido, por exemplo, se todas as moléculas de um mesmo ácido húmico são idênticas em composição, ou se as diferentes moléculas são constituídas por diferentes componentes, por serem produtos de decomposição de diferentes resíduos (ALEKSANDROVA, 1975).

SNOEYINK (1980) comenta que os ácidos húmicos são um grupo extremamente complexo de compostos e, em virtude disso, nenhum modelo pode servir como representativo da estrutura deste grupo. No entanto, grupos funcionais fenólicos e carboxílicos são comuns em ácidos húmicos.

TOLEDO (1973) comentava terem sido adotadas definições de matéria orgânica, húmus, substâncias húmicas, ácido fúlvico, ácido húmico, humina e ácido himatomelânico conforme abaixo:

- **Matéria Orgânica:** é um sistema complexo, dinâmico, caracterizado pela contínua incorporação de resíduos orgânicos e sua transformação pela ação de fatores biológicos, químicos e físicos;
- **Húmus:** é a parte da matéria orgânica decomposta que não possui qualquer estrutura molecular reconhecível. É uma mistura heterogênea, polifuncional, em diferentes graus de polidispersão;
- **Substâncias Húmicas:** são substâncias com elevada massa molecular e coloração escura, presentes no húmus, cujas frações são definidas segundo suas características de solubilidade;
- **Ácido Fúlvico:** é a fração das substâncias húmicas solúveis em bases e ácidos minerais e insolúvel em solventes orgânicos;
- **Ácido Húmico:** é a fração das substâncias húmicas solúvel em bases e insolúvel em ácidos minerais e solventes orgânicos;
- **Humina:** é a fração da matéria orgânica insolúvel em bases;
- **Ácido Himatomelânico:** é a fração das substâncias húmicas solúvel em álcool.

A matéria orgânica classifica-se esquematicamente de acordo com a Figura 3.1.

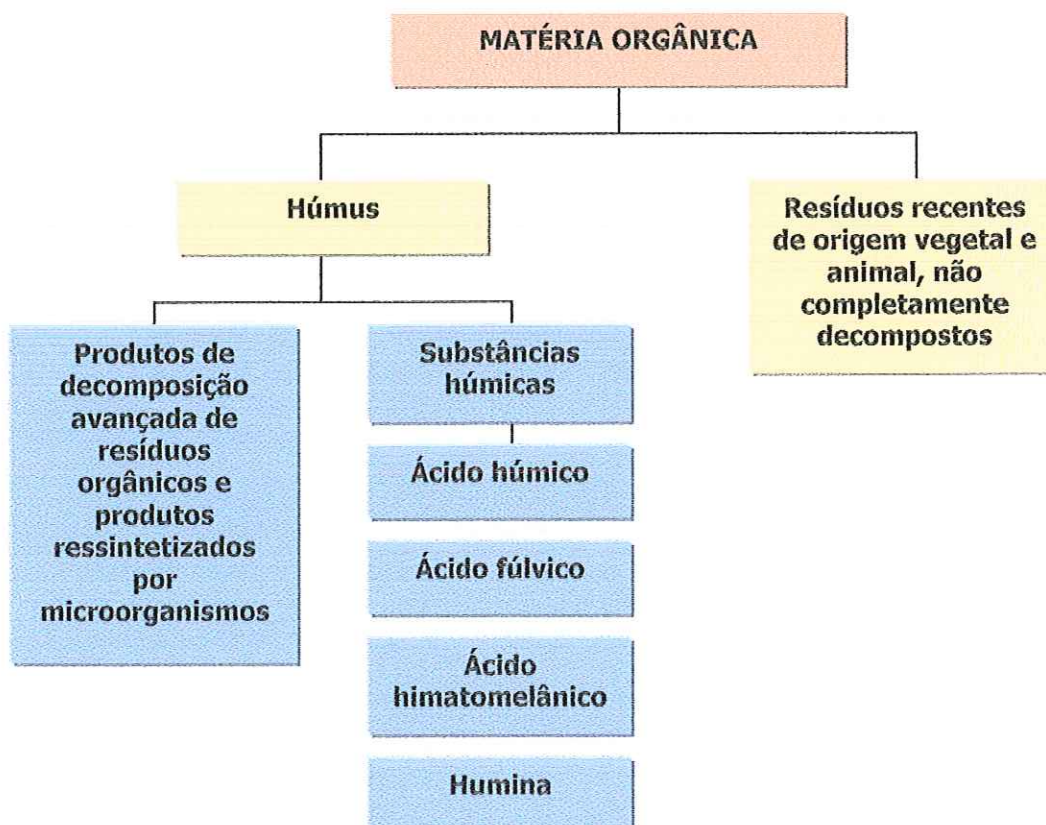


FIGURA 3.1- Classificação da matéria orgânica

Fonte: Santaella (1993)

### 3.1.3. A Estrutura das Substâncias Húmicas

Segundo SANTAELLA (1993), citando STEELINK (1963)<sup>4</sup> muito pouco se sabe sobre a estrutura das substâncias húmicas, pois esta depende do tipo de sedimento e solo, do tipo de vegetação e vida animal existentes e das condições climáticas em que se formam as substâncias húmicas. É, portanto, impossível extraí-las de uma fonte convenientemente reproduzível e generalizar suas propriedades físicas, sua fórmula empírica e sua estrutura. Não existe um único ácido húmico ou ácido fúlvico e por isso, estes devem ser descritos segundo seu ambiente e do procedimento de extração, pois existem indicações que a estrutura das substâncias húmicas pode variar com o método de extração empregado.

SNOEYINK (1980), sobre as substâncias húmicas comenta que elas são um grupo extremamente complexo e diverso de materiais orgânicos cuja estrutura não é bem definida. Formam uma mistura de produtos da decomposição e subprodutos da matéria orgânica natural produzida por plantas e animais. As substâncias húmicas têm suas características físicas e químicas pouco definidas e têm sido caracterizadas como: amorfas, marrons ou pretas, hidrofílicas, ácidas, polidispersas e de peso molecular que varia de centenas a dezenas de milhares.

As substâncias húmicas têm sido arbitrariamente divididas em três grupos diversos de compostos: ácidos fúlvicos solúveis em ácidos (pH  $\cong$  1) e base, ácidos húmicos solúveis em base mas que precipitam em ácido e humina, insolúvel em ácido e base. Porém, alguns pesquisadores classificam as substâncias húmicas em dois grupos: ácidos húmicos e fúlvicos, e assumem que a humina tem características dos ácidos húmicos, mas que sua solubilidade em base é impedida devido a sua associação com minerais de argila em águas naturais. Os ácidos fúlvicos apresentam-se como grupo predominante de substâncias húmicas em águas naturais, possuem peso molecular menor que os ácidos húmicos, contêm grande quantidade de oxigênio, que, na maioria das vezes, localiza-se nos grupos carboxílicos.

A estrutura química dos ácidos húmicos e fúlvicos não é muito bem conhecida, porém alguns grupos funcionais são conhecidos, conforme Figura 3.2.

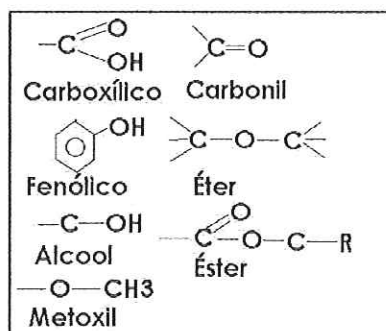


Figura 3.2: Principais grupos funcionais das substâncias húmicas

Fonte: SNOEYINK (1980)

<sup>4</sup> STEELINK, C. (1963). What is humic acid? *Journal of Chemical Education*. v.40, n.7, p.379-384.

A Tabela 3.1 apresenta as propriedades físicas e químicas dos ácidos húmicos e fúlvicos.

TABELA 3.1 - Propriedades físicas e químicas dos ácidos húmicos e fúlvicos.

Fonte: SNOEYINK (1980)

PROPRIEDADE	ÁCIDOS HÚMICOS	ÁCIDOS FÚLVICOS
<b>Composição dos Elementos (% em peso)</b>		
C	50-60	40-50
H	4-6	4-6
O	30-35	44-50
N	2-4	<1-3
S	1-2	0-2
Solubilidade em ácido forte (pH 1)	não solúvel	solúvel
Faixa de peso molecular	< 100 - alguns milhões	180 - 10.000
<b>Distribuição dos Grupos Funcionais</b>	<b>Porcentagem de Oxigênio no Grupo Funcional Indicado</b>	
Carboxil	14-45	58-65
Fenol	10-38	9-19
Álcool	13-15	11-16
Carbonil	4-23	4-11
Metoxil	1-5	1-2

Segundo THURMAN (1985)<sup>5</sup>, citado por BECKETT (1990), os níveis da matéria orgânica dissolvida expressa em MOD, variam enormemente de acordo com a fonte de água, localidade geográfica e época do ano. Os rios e lagos podem conter de 1 a 60 mg/L de MOD, sendo mais típicos valores entre 2 e 10 mg/L. A combinação entre produção de plantas primárias e decomposição, usualmente é o fator determinante nos níveis de MOD em águas naturais. Em águas do mar e de chuva os níveis de MOD são menores que 1 mg/L. Usualmente 40-90% do total de MOD presentes em águas naturais pode ser removido e isolado por adsorção em resinas.

Citado pelo mesmo autor, MALCOLM (1985)<sup>6</sup> comenta que as substâncias húmicas podem ser subdivididas em duas frações: ácidos húmicos, com precipitação em valores de pH menores que 2 e ácidos fúlvicos, solúveis em pH baixo. Na maioria das águas não coloridas, os ácidos húmicos são a maior fração presente (45% do MOD presente). Em águas altamente coloridas a fração do ácido húmico pode representar grande proporção do MOD presente.

<sup>5</sup> THURMAN E. M. (1985). Organic Geochemistry of Natural Waters. Nijhoff/Junk, Dordrecht, Netherlands.

### 3.1.4. Características e Propriedades Gerais das Substâncias Húmicas

Segundo SANTAELLA (1993), as substâncias húmicas não possuem as propriedades e características normalmente associadas aos compostos orgânicos bem definidos, por não ser possível extraí-las de uma fonte convenientemente reproduzível e determinar suas propriedades por métodos químicos.

As substâncias húmicas são macromoléculas hidrofílicas e polieletrólitos carregados negativamente, cujas massas moleculares relativas variam de  $3,32 \times 10^{-19}$  a  $8,30 \times 10^{-16}$  mg. Formam um sistema coloidal de natureza predominantemente aromática com caráter fenólico, pertencente ao grupo dos heteropolicondensados de alta resistência ao ataque microbiológico (PAULI, 1966<sup>7</sup> citado por SANTAELLA, 1993).

O número de grupos carboxílicos e fenólicos e a presença ou não de outros grupos funcionais, em quantidades variáveis, afeta a estabilidade das substâncias húmicas na água.

Quanto maior o pH do meio, maior a estabilidade das partículas coloidais por haver aumento na densidade de cargas dos grupos funcionais ionizados e, portanto, ser mais difícil sua coagulação e precipitação (EDZWALD, HALF E BOAK, 1977).

As substâncias húmicas complexam-se muito facilmente com metais e óxidos e interagem com argilo-minerais, ácidos graxos e praguicidas, promovendo sua solubilização. Por estarem envolvidas com o metabolismo e respiração celular, alteram significativamente o ambiente. São substâncias sólidas com coloração que varia do amarelo ao marrom escuro ou preto, dependendo de seu grau de polimerização. Do ponto de vista tecnológico, águas ricas em substâncias húmicas trazem problemas para estações de tratamento pois, ao serem tratadas com cloro, produzem diversas substâncias, algumas das quais tóxicas, de gosto e odor desagradáveis, provenientes de reações com estruturas aromáticas (PLECHANOV, 1983<sup>8</sup> citado em SANTAELLA, 1987), além das substâncias húmicas provocarem corrosão e crescimento microbiológico nos condutos de água (TOLEDO, 1973).

MALCOLM (1985), citado por BECKETT (1990), comenta que existem várias suposições sobre a exata estrutura molecular das substâncias húmicas. Uma delas é que as substâncias húmicas consistem de mistura complexa que contém número elevado de diferentes estruturas eventuais, sugerindo ser tarefa inútil tentar elucidar tais estruturas. Propriedades como solubilidade, acidez, capacidade de complexação com metais e atividade superficial são determinadas pelo oxigênio retido nos grupos funcionais. Os principais grupos funcionais são: carboxílico, fenólico, hidroxílico, carbonil, éter e éster. O peso molecular das substâncias húmicas tem sido assunto muito controvertido, com valores que variam de 500 a 200.000. O exato processo que envolve a formação das substâncias húmicas não é conhecido e, certamente, envolvem mecanismos de degradação biológica da matéria orgânica (lignina,

6 MALCOLM, R. L. (1985). Humic substances in river and streams. IN: "Humic Substances in Soil, Sediment and Water". G. R. Aiken; D. M. McKnight; R. L. Wershaw and P. McCarthy, eds., Wiley-Interscience, New York, p.181-210.

7 PAULI, F. (1966). Physico-chemical methods in modern humus research. *Jena Review*. v.11, n.1, p.3-6.

8 PLECHANOV, N. (1983). Studies of molecular weight distributions of fulvic and humic acids by gel permeation chromatography. Examination of the solute molecular composition using IR, UV, fluorescence and weight measurement as detection techniques. *Organics Geochemistry*. v.5, n.3, p.143-149.

celulose e polipeptídios). Em adição a este fato podem ocorrer polimerização (reação com UV, por exemplo), condensação e reações de oxidação, modificando esses produtos da degradação. As substâncias húmicas aquáticas podem ser derivadas tanto do lixiviamento de sedimentos terrestres e da matéria orgânica do solo como da ação de bactérias no fitoplâncton.

MYNENI, BROWN, MARTINEZ & MEYER-ILSE (1999) realizaram estudo em estruturas de substâncias húmicas extraídas da água do rio Suwannee, na Geórgia e em amostras de solo de Mollic Epipedon, Illinois. Através de fotografias tiradas por espectromicroscopia de raio-x, os autores verificaram grandes alterações no tamanho e geometria da estrutura das moléculas de substâncias húmica extraídas de solos e rios, quando variavam os valores de pH, as concentrações de carbono e de cátions complexantes. A estrutura variava desde formas planas dispersas até agregados globulares compactos. Os tamanhos médios das estruturas variaram de menores que 0,1  $\mu\text{m}$  a 8  $\mu\text{m}$ , em diferentes condições de pH e concentrações.

De acordo com os mesmos autores, mudanças na estrutura macromolecular das substâncias húmicas podem modificar a área superficial e alterar o grupo químico funcional com protonação e complexação de cátions. Assim podem alterar a intensidade de adsorção e a biotransformação de contaminantes como praguicidas e solventes, além de afetar os processos bioquímicos.

## **3.2. FERRO E MANGANÊS EM ÁGUAS DE ABASTECIMENTO**

### **3.2.1. Ocorrência e Formas Predominantes em Água**

Segundo FILHO (1964), de modo geral, o ferro é encontrado em concentrações mais elevadas que o manganês, embora freqüentemente encontrados em conjunto. Esses metais são associados ao xisto, arenito e com depósitos aluviais em áreas pantanosas. Poços perfurados em xisto ou arenito ou poços rasos em material aluvional tendem, conseqüentemente, a produzir água contendo ferro e manganês.

Segundo O'CONNOR (1971), a presença de ferro e de manganês em águas subterrâneas geralmente é atribuída à dissolução de rochas e minerais, principalmente óxidos, sulfetos, carbonatos e silicatos que contêm esses metais. O ferro ocorre em silicatos de rochas ígneas. Ele aparece na forma de vários óxidos, como magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e limonita ( $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ). Sulfeto e minerais de carbonato são fontes importantes de ferro. Entre eles, incluem-se pirita ( $\text{FeS}_2$ ) e siderita ( $\text{FeCO}_3$ ).

O manganês encontra-se em abundância em rochas metamórficas e sedimentares e em pequenas parcelas em rochas ígneas. Óxidos mangânicos como manganita ( $\text{MnOOH}$ ), pirolusita ( $\text{MnO}_2$ ) e hausmamita ( $\text{Mn}_3\text{O}_4$ ) podem se acumular no solo, como o fazem a maioria dos constituintes dissolvidos das rochas. A rodocrosita ( $\text{MnCO}_3$ ) é particularmente importante no equilíbrio do manganês de águas naturais.



Segundo o mesmo autor, o ferro e o manganês podem ser precipitados, como carbonatos, em águas que contêm alcalinidade, pela adição de cal  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$  ou soda cáustica  $(\text{NaOH})$ . Espera-se que  $\text{Fe}^{+2}$  e  $\text{Mn}^{+2}$  precipitem quase totalmente como carbonato em valores de pH acima de 8,5. A precipitação do  $\text{Fe}^{+2}$  e  $\text{Mn}^{+2}$  como hidróxidos requer incremento do pH para valores acima de 11. As formas de hidróxido férrico e dióxido mangânico são muito menos dissolvidos que hidróxidos e carbonatos de  $\text{Fe}^{+2}$  e  $\text{Mn}^{+2}$ .

O fato de o manganês ser menos abundante que o ferro como mineral, explica porque o ferro é mais freqüente que manganês em águas subterrâneas. Por outro lado, os hidróxidos e carbonatos de  $\text{Mn}^{+2}$  são mais dissolvidos que os de  $\text{Fe}^{+2}$ .

A dissolução dos minerais de ferro e manganês é, na sua maior parte, atribuída à ação do dióxido de carbono em águas subterrâneas. A maior parte do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) é gerada por decomposição bacteriana da matéria orgânica lixiviada no solo. A dissolução desses minerais acontece em condições anaeróbias e em presença de agentes redutores (substâncias orgânicas e sulfito de hidrogênio) capazes de reduzir os óxidos de ferro e manganês para o estado ferroso  $\text{Fe}^{+2}$  e manganoso  $\text{Mn}^{+2}$ .

As concentrações de ferro e manganês em águas naturais são limitadas pela solubilidade dos seus carbonatos: siderita e rodocrosita. Águas com altos valores de alcalinidade contêm menores concentrações de ferro e manganês em solução que águas com baixa alcalinidade.

Segundo WHITE (1972), o ferro e manganês são relativamente abundantes na crosta terrestre. A litosfera contém, aproximadamente, 5% de ferro e 0,1 % de manganês. O ferro está presente no solo e em minerais, principalmente como óxido férrico insolúvel e o manganês, como dióxido mangânico. Ferro e manganês ocorrem, também, na forma de precipitados como carbonatos: siderita ( $\text{FeCO}_3$ ) e rodocrosita ( $\text{MnCO}_3$ ). Desde que as águas subterrâneas contenham apreciáveis quantidades de dióxido de carbono dissolvido (30-50 mg/L), os carbonatos podem ser levados a formas dissolvidas, como bicarbonato ferroso ou manganoso ou, ainda, na forma de sulfato.

Segundo STUMM & MORGAN (1981), as águas naturais adquirem suas características químicas por dissolução e por reações químicas com sólidos, líquidos e gases que entram em contato com a água nas diversas fases do ciclo hidrológico. Toda a matéria da superfície terrestre e das mais profundas camadas da litosfera participa de uma lenta e complicada migração. Processos de desgaste, transporte e deposição são agentes dessa migração e proporcionam tanto a dissolução de minerais na água quanto a formação de solos e rochas.

Os minerais contidos nas rochas responsáveis pela dissolução do ferro na água são, principalmente, óxidos de ferro (hematita) e carbonatos (siderita); porém outros minerais como a faiolita ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ), pirita ( $\text{FeS}_2$ ), pirotita ( $\text{FeS}$ ), geotita ( $\alpha\text{-FeOOH}$ ), lepidocrosita ( $\gamma\text{-FeOOH}$ ), limonita ( $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) e magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) podem estar presentes. Já no caso do manganês, minerais como rodocrosita ( $\text{MnCO}_3$ ) e sulfito mangânico ( $\text{MnS}$ ), após dissolvidos, são responsáveis pela contaminação da água com manganês.

De acordo com CLEASBY (1983), ferro e manganês apresentam-se dissolvidos sob diferentes formas e dependem basicamente do pH. Alguns hidróxidos complexos de  $\text{Fe}^{+2}$  podem estar presentes na forma de  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{FeOH}^+$ ,  $\text{FeOH}_3^-$ . O manganês pode apresentar-se como  $\text{Mn}^{+2}$ ,  $\text{MnOH}^+$ ,  $\text{Mn(OH)}_3^-$ , assim como o  $\text{Fe}^{+3}$  que pode estar presente na forma solúvel como  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{FeOH}^{+2}$ ,  $\text{Fe(OH)}_2^+$ ,  $\text{Fe(OH)}_4^-$ . Segundo o mesmo autor, são possíveis outros complexos tais como: complexos inorgânicos com bicarbonato, sulfato ou fosfato; complexos orgânicos de  $\text{Fe}^{+2}$ , associados a ácidos húmicos e fúlvicos ou de  $\text{Fe}^{+3}$  formando complexos estáveis como os quelatos, freqüentemente coloridos. Além disso, compostos orgânicos podem reduzir  $\text{Fe}^{+3}$  para  $\text{Fe}^{+2}$ , resultando em retardamento da oxidação ou formação de complexos orgânicos de  $\text{Fe}^{+2}$ .

Quanto aos precipitados, ainda segundo CLEASBY (1983), é possível mais de uma forma:  $\text{Fe}^{+2}$  pode formar  $\text{Fe(OH)}_2$  ou  $\text{FeCO}_3$  (depende da alcalinidade de carbonato presente);  $\text{Mn}^{+2}$  pode formar  $\text{Mn(OH)}_2$  ou  $\text{MnCO}_3$ ;  $\text{Fe}^{+3}$  pode formar  $\text{Fe(OH)}_3$ ;  $\text{Mn}^{+4}$  pode formar  $\text{MnO}_2$ .

Sobre a presença de ferro, RICHTER & AZEVEDO NETTO (1991) afirmam que o caminho percorrido pelas águas na natureza condiciona as impurezas por ela adquiridas. Elevados teores de ferro são encontrados, com maior freqüência, nos seguintes casos: águas superficiais com matéria orgânica, nas quais o ferro se apresenta combinado com a matéria orgânica e, freqüentemente, em estado coloidal; águas subterrâneas (poços, fontes e galerias de infiltração) agressivas, ou seja, baixo pH, ricas em gás carbônico e sem oxigênio dissolvido; sob a forma de bicarbonato ferroso dissolvido e águas poluídas por certos resíduos industriais ou certas atividades de mineração.

Quando encontrados em águas naturais de baixo pH e na ausência de oxigênio, o ferro e o manganês estão sob formas quimicamente reduzidas, dissolvidas. Quando o material é oxidado por aeração ou por aplicação de cloro, os minerais são precipitados; o ferro confere à água aparência de vermelho a preto e o manganês de púrpura a preto.

Segundo AZIZ & SMITH (1992), o manganês pode estar presente na água em concentrações de até 10 mg/L. No entanto, são raros os casos em que essas concentrações excedem 1 mg/L. O manganês é dissolvido de rochas e redepositado como óxido, hidróxido ou carbonato. De acordo com esses autores, 40% da água de abastecimento dos EUA apresentam concentrações maiores que as recomendadas de ferro e/ou manganês. Devido ao grande número de valências existentes (1 a 7), a química de oxidação do manganês é mais complexa que a do ferro. A aeração para remoção de manganês é um processo ineficiente e lento com valores de pH em torno do neutro. Comumente, são requeridos oxidantes fortes como permanganato de potássio ( $\text{KMnO}_4$ ) em valores de pH maiores que 7,5, cloro ( $\text{Cl}_2$ ) em valores de pH maiores que 8,5 - 9,0 e dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) em valores de pH maiores que 7,0.

Segundo GALVIN (1996), citando WHO (1993)<sup>9</sup>, o ferro na água é originado da dissolução de rochas e minerais, da produção de aço e de outras atividades industriais. O ferro na superfície encontra-se normalmente como ferro trivalente variando entre 0,1 até 0,3 mg/L e

<sup>9</sup> WHO (World Health Organization), (1993). Guidelines for Drinking Water Quality (2nd edn.), Vol.1, Geneva (Switzerland).

espera-se que essa forma precipite como  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  em pH em torno de 7,5. Os sais de ferro divalente são mais solúveis. Em águas superficiais ricas em  $\text{CO}_2$  e pobremente oxigenada são freqüentes altas concentrações de ferro total. Em água de lago, rica em matéria orgânica, o ferro geralmente forma complexos muito estáveis causando sérios problemas ao tratamento dessas águas. O ferro é encontrado em águas naturais em concentrações que variam de 0,5 a 50 mg/L. Em lagos e reservatórios, a dinâmica do ferro envolve desde pequenas concentrações de ferro total na superfície da coluna d'água, durante o período de mistura termal (águas bem oxigenadas), até altas concentrações de ferro (especialmente ferro divalente) em águas profundas, pobremente oxigenadas (período de estratificação termal), produzidas através da redução biológica ou eletroquímica do  $\text{Fe}^{+3}$  precipitado presente em sedimentos de lagos.

De acordo com GALVIN (1996), que cita POURBAIX (1966)<sup>10</sup>, as formas divalentes de ferro apresentam-se complexadas com amina, compostos de hidroxilas orgânicas, hipofosfatos, etc. Algumas formas de ferro divalente são pouco dissolvidos, como carbonatos, fosfatos e sulfitos.

Segundo MICHALAKOS, NIEVA, VAYENAS E LIBERATOS (1997), em águas superficiais, o ferro geralmente está presente na forma  $\text{Fe}^{+3}$ . Em camadas profundas de alguns reservatórios com pouco oxigênio dissolvido ou em águas subterrâneas, ele está presente em estado dissolvido na forma de  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{FeOH}^+$  ou na forma de quelatos. As formas dissolvidas do ferro podem ser precipitadas por incremento do potencial de oxidação, do pH ou de ambos.

Segundo GALVIN (1996), que cita DEGRÉMONT (1979), WETZEL (1981), GALVIN (1995)<sup>11</sup> a presença do metal em águas de abastecimento pode resultar do uso de coagulantes de ferro, corrosão do sistema e conseqüente aparecimento de cor, turbidez, gosto e odor. Nesses últimos, certamente está envolvida a bactéria ferruginosa.

Segundo GALVIN (1996), o manganês é altamente difundido na natureza. Pirolusita (dióxido de manganês) e sulfeto são minerais amplamente encontrados. Eles podem ser facilmente dissolvidos por soluções oxidantes neutras ou ácidas, acarretando formação do íon manganoso. Um oxidante leve pode oxidar a solução manganosa até a formação de óxidos sólidos. Já um oxidante enérgico pode oxidar essas soluções até o estado hexavalente ou heptavalente. O manganês encontra-se na água na forma dissolvida, coloidal e nas formas complexadas em que é conhecida a rápida formação do complexo matéria orgânica com Mn, que são muito estáveis e causam grandes problemas nos processos de produção de água potável.

Geralmente, a concentração de manganês em águas naturais varia desde concentrações muito baixas da ordem de  $\mu\text{g/L}$  até 0,5 mg/L (em alguns casos maior que 1 mg/L).

10 POURBAIX, M. (1966). Atlas of Electrochemical Equilibria. Pergamon Press Ed. Oxford (England).

11 DEGRÉMONT. (1979). Manual técnico del Agua. Bilbao (Spain). WETZEL, R. G (1981). Limnología (Spain edn.) Omega S. A., Ed. Barcelona (Spain). MARÍN GALVIN, R (1995). Análisis de Águas y Ensayos de Tratamiento: Principios y Aplicaciones. GPE, AS Ed. Barcelona (Spain).

### 3.2.2. Problemática da Presença de Concentrações de Ferro e Manganês

A presença de ferro e manganês em água de abastecimento pode acarretar diversos problemas.

FILHO (1964) discute o problema de poluição nas canalizações de distribuição de água potável decorrente do crescimento de bactérias ferruginosas (*Crenothrix*). Segundo o autor, a poluição das canalizações que conduzem águas portadoras de ferro e manganês é resultado de uma série de reações bioquímicas, que podem ser vistas como contrapartida dos processos geológicos naturais, que resultam na formação de grandes depósitos de ferro e manganês. Para se tentar explicar os fenômenos observados, tal como ocorrem nas canalizações de água, alguns fatores devem ser considerados: bactérias ferruginosas e organismos colaboradores florescem em águas que possuem traços de ferro ou manganês ou de ambos; desenvolvem-se como massa uniforme ou como lodo aderido à parede do tubo ou de outras superfícies submersas. Ao se desenvolverem, as bactérias produzem condições alcalinas favoráveis à precipitação local ou intracelular dos íons metálicos. É discutível se essas bactérias dependem da oxidação dos metais como condição para sua subsistência.

Presumivelmente, os metais atuam como simples fatores de desenvolvimento, durante o processo de decadência orgânica; as reações químicas são reversíveis. A produção local de ácido e o reduzido potencial de oxidação provocam dissolução dos metais. O processo de decomposição é acompanhado por produção de gosto e odor. As variações locais no pH e no potencial de oxidação, produzidas pela resistência à difusão causada pelas paredes das células e outros obstáculos, causam circuitos de erosão, cujos subprodutos fornecem material nutriente adicional e aumentam a taxa de deposição.

O resultado final desses complexos processos é o acúmulo de ferro e manganês nos sistemas de distribuição. A ausência de oxigênio, principalmente nas pontas das redes, favorecerá a redução dos sulfatos em sulfetos, os quais se combinam com o ferro e formam compostos odoríferos. A matéria orgânica sob a forma de tanino combinar-se-á com o ferro para formar um depósito negro. Assim, a solução é remover ferro e manganês antes de sua entrada nos sistemas de distribuição, e privar esses organismos do alimento que lhes é necessário.

Segundo CLEASBY (1975), existem algumas regiões nos EUA onde o conteúdo de ferro e manganês em águas de abastecimento é extremamente alto. O autor discute as dificuldades na filtração que, muitas vezes, são enfrentadas de acordo com o precipitado formado (carbonato ou hidróxido), quando são utilizados oxidantes químicos.

De acordo com WONG (1984), além dos problemas já citados referentes à presença de ferro e manganês, esses também acarretam problemas em unidades de abrandamento por se depositarem nas colunas trocadoras.

O relatório do Comitê *Research Needs for the Treatment of Iron and Manganese* (1987) reportou que problemas de ferro e manganês afetam sistemas de água muito mais que

qualquer outra questão relacionada à qualidade da água. O comitê incentivou o desenvolvimento de pesquisas sobre a química, tratamento e controle de ferro e manganês e entendeu haver espaço considerável para incremento da eficiência do tratamento associado à redução de custos. Foram referidas as seguintes necessidades de pesquisa para tratamento de ferro e manganês: trabalhos quantitativos em cinética de oxidação de ferro e manganês e mecanismos, incluindo retenção/oxidação em filtros, oxidação por meio de oxidantes fortes e efeitos catalíticos e retardantes de sólidos inorgânicos e formas orgânicas dissolvidas; determinação de fatores que influenciam a redução de ferro e hidróxidos de manganês na ausência de oxidantes fortes e na presença de orgânicos; caracterização de ferro e manganês precipitado, incluindo propriedades como: identidade mineral, tamanho e área de superfície das partículas, carga da superfície e controle das propriedades de precipitação para obtenção de remoção ótima; determinação, caracterização e controle da capacidade de adsorção de vários precipitados de ferro e manganês para outros contaminantes presentes na água, facilitando, assim, a remoção de ferro e manganês nas estações; avaliação do papel de materiais orgânicos naturais, sua influência na complexação e redução/oxidação química de ferro e manganês e seu papel na estabilização do crescimento das partículas nos precipitados de ferro e manganês; determinação do papel dos microrganismos nas transformações de ferro e manganês; desenvolvimento de métodos para controle do crescimento de microrganismos e avaliação da aplicabilidade de vários métodos de controle de fontes para manutenção de baixas concentrações de ferro e manganês em águas subterrâneas e águas superficiais com posterior entendimento dos parâmetros que governam a entrada e as alterações na concentração de ferro e manganês nas fontes de água.

Segundo RICHTER & AZEVEDO NETTO (1991), teores excessivos de ferro nas águas apresentam vários inconvenientes: mancham tecidos, roupas, utensílios sanitários; causam sabor desagradável "metálico"; prejudicam o preparo de café e chá; interferem em processos industriais (fabricação de papel, tecidos, tinturarias e cervejarias); podem causar depósitos e incrustações e possibilitar o aparecimento de bactérias ferruginosas.

Segundo CARLSON et al (1997), em sistemas de abastecimento de água, uma variedade de efeitos negativos, incluindo coloração, sabor e problemas em canalizações, podem ser atribuídos à presença de ferro e manganês. A presença de ferro e manganês apesar de, aparentemente, não causar inconvenientes relacionados à saúde nas concentrações habitualmente encontradas, pode comprometer a confiabilidade do público.

### **3.2.3. Toxicidade**

De acordo com CULP (1974), na água, comumente, o ferro não tem caráter tóxico, porém concentrações acima de 0,3 mg/l são sujeitas a objeções. Segundo o autor, têm sido reportados problemas neurológicos relacionados à inalação da poeira de manganês, embora nada tenha sido reportado em relação à sua ingestão.

GALVIN (1996) comenta que a presença de metais em águas naturais pode acarretar dois tipos de circunstâncias: efeitos positivos - quando o metal presente é essencial à saúde humana (Mo, Zn) e efeitos negativos - quando o metal é tóxico, com efeitos indesejáveis para o homem e para o meio ambiente.

A concentração dos metais é função particular do comportamento químico e eletroquímico. As concentrações de metais podem variar desde ng/L ( $10^{-9}$  g/L) ou  $\mu\text{g/L}$  ( $10^{-6}$  g/L) conhecidos como traço (berílio, cádmio, mercúrio) até mg/L ( $10^{-3}$  mg/L) ou em alguns casos g/L (Ca, Mg, Na). Os efeitos dos diferentes metais variam desde benéficos (Ca, Zn) até problemáticos ou toxicamente perigosos em certos casos. Alguns metais são essenciais, em mínima quantidade, enquanto outros podem causar efeitos adversos em consumidores, equipamentos e sistemas de água, dependendo de suas concentrações e comportamento fisiológico.

De acordo com o mesmo autor, do ponto de vista fisiológico, o ferro tem papel de muita projeção: ele está presente em proteínas (hemoglobina), citocromos e diversas enzimas redox. A ingestão de altas concentrações de ferro causa a ruptura de diversos tecidos humanos. Já o manganês é essencial como elemento-traço envolvendo a síntese de proteínas e produção de hemoglobina. O manganês é conhecido como catalisador enzimático. A deficiência de manganês no organismo está associada a moléstias cardíacas, anemias e a má formação de ossos em crianças. Por outro lado, a habitual ingestão de águas ricas em Mn (14mg/L) pode causar problemas cerebrais.

Segundo ROZEMA (1998), há metais essenciais que, em excesso, podem ser tóxicos: cobalto, cobre, ferro, manganês, molibdênio, selênio e zinco. Cada mineral essencial possui três níveis de atividade biológica: traço - exigido para bom crescimento e desenvolvimento; homeostático (nível de armazenagem) e nível tóxico.

Tais metais são normalmente acumulados em níveis tóxicos por meio de exposição ocupacional ou acidental, além dos acúmulos ambientais.

#### **3.2.4. Complexação do Ferro e Manganês com a Matéria Orgânica**

Segundo O'CONNOR (1971), a formação de complexos orgânicos e quelatos aumenta a solubilidade do ferro e manganês. Frequentemente, quando são encontradas dificuldades na oxidação, complexos orgânicos de ferro e manganês são citados. O ferro complexado com matéria orgânica na forma  $\text{Fe}^{+3}$  é mais estável que o íon ferroso  $\text{Fe}^{+2}$  (também complexado) que, por sua vez, tem estabilidade muito maior que o manganês  $\text{Mn}^{+2}$  complexado. Enquanto o  $\text{Fe}^{+2}$  pode formar complexos com álcoois, ésteres, dicetonas e aldeídos, o  $\text{Fe}^{+3}$  pode formar complexos (coloridos), tanto com esses como com éteres e fenóis. A cor encontrada em águas naturais, frequentemente pode ser causada por fortes dispersões coloidais de ferro. No caso do manganês, a ligação entre  $\text{Mn}^{+4}$  e  $(\text{OH})^-$  é mais forte que entre  $\text{Fe}^{+3}$  e  $(\text{OH})^-$ . Por isso, em águas naturais é rara a formação de complexos orgânicos ou inorgânicos com  $\text{Mn}^{+4}$ .

SNOEYINK & JENKINS (1980) afirmam que é importante a formação de complexos envolvendo ligantes orgânicos. Na análise dos vários constituintes da água, são usados compostos orgânicos como agentes complexantes; por exemplo, na determinação de dureza, como indicadores em testes de DQO ou na determinação do níquel por análise colorimétrica. Grande variedade de compostos orgânicos em águas naturais e residuárias pode agir como complexador de íons metálicos. A natureza e extensão dessa complexação de íons metálicos não é bem definida, provavelmente pelo pouco conhecimento da natureza desses compostos orgânicos.

Ainda, segundo os mesmos autores, as características das substâncias húmicas pertencem a um grupo extremamente complexo e diversificado de matérias orgânicas cuja estrutura não é bem definida. Quanto à interação entre substâncias húmicas e metal torna-se difícil definir a natureza dos produtos de uma reação química quando a natureza de um dos reagentes não é conhecida. Além disso, as substâncias húmicas apresentam variações de uma água para outra.

Segundo SNOEYINK & JENKINS (1980), compostos coordenados ou complexos consistem de um ou mais átomos centrais ou íons centrais, geralmente metais, com número de moléculas ou íons denominados ligantes rodeando-os e ligando-se a eles. Os complexos podem ser não-iônicos, catiônicos ou aniônicos, dependendo das cargas dos íons centrais e ligantes. Usualmente os íons centrais e ligantes podem estar presentes individualmente ou complexados.

De acordo com os mesmos autores, o número total possível de ligações ao átomo ou íon central é denominado número de coordenação. Os ligantes são atrelados aos íons centrais por ligações coordenadas covalentes não livres em que os elétrons participantes são derivados dos ligantes. Com isso, pode-se admitir que as formas centrais são como aceptores de elétrons e os ligantes como doadores de elétrons. Desde que os íons metálicos têm afinidade por estar recebendo elétrons, eles formarão compostos coordenados, com tendência maior quanto maior for a afinidade para receber elétrons. Os ligantes que "atacam" o íon central em somente um ponto são chamados ligantes monodentatos. Já os ligantes que "atacam" em mais pontos são chamados multidentatos ou agentes quelatos. Complexos contendo um íon central são chamados de mononucleares e os que possuem mais de um íon central são chamados polinucleares. O tamanho dos complexos formados varia consideravelmente, dependendo do número de pontos de ligação e do número de íons centrais.

A estabilidade de um complexo não depende de sua constante de reação, mas da constante de estabilidade. A estabilidade do complexo é proporcional à carga do íon metálico. O fenômeno de incremento da estabilidade do complexo com aumento do número de ligações ao íon metálico central é denominado "efeito quelato".

De acordo com os mesmos autores, as substâncias húmicas têm, incontestavelmente, a habilidade de combinar consideráveis quantidades de íons metálicos. Em muitas águas naturais tem-se observado que o ferro trivalente é associado à cor causada por orgânicos.

SCHNITZER (1971)<sup>12</sup>, citado por SNOEYINK (1980), estima que uma solução contendo 10 mg/L de ácido fúlvico pode manter em solução 8,4 mg Fe<sup>+3</sup>/L e 4,0 mg Al<sup>+3</sup>/L. A concentração de Fe<sup>+3</sup> é maior que 2 vezes a concentração esperada em solução na água pura. Por esse motivo, a questão a ser discutida não é a incontestável habilidade das substâncias húmicas de combinar-se com metais e, sim, a natureza dessa associação. Quanto a essa questão, dois modelos são considerados: formação de complexos ou quelatos entre grupos funcionais das substâncias húmicas e o metal; associação entre substâncias húmicas e a partícula coloidal do hidróxido metálico (possivelmente através da adsorção da superfície da partícula), onde as partículas coloidais são peptizadas ou estabilizadas em suspensão, prevenindo sua coagulação ou sedimentação.

A formação de uma dessas associações entre substância húmica e metal pode depender do estado inicial da matéria húmica e metal, das solubilidades e das concentrações relativas. Altas concentrações de metais (excedendo os limites de solubilidade dos hidróxidos metálicos) podem favorecer peptização das partículas sobre complexos dissolvidos.

Através do "bloqueio" de vários grupos funcionais das substâncias húmicas e da exposição de metais em solução é possível ter-se idéia de qual grupo funcional é mais importante na complexação do metal. SCHNITZER & KHAN (1972)<sup>13</sup> reportam que em valores de pH de 3,5, tem-se 75% do Fe<sup>+3</sup> presente, 66% do Al<sup>+3</sup> e 50% do Cu<sup>+2</sup> reagindo fortemente com grupos carboxílicos e grupos fenólicos. Desses, 8% do Fe<sup>+3</sup>, 20% do Al<sup>+3</sup> e 32% Cu<sup>+2</sup> reagem mais fracamente com o grupo carboxílico, isoladamente. Experimentos indicam que grupos de álcoois não formam complexos com metais.

GHOSH & SCHNITZER (1980)<sup>14</sup>, citados por BECKETT (1990), realizaram estudo sobre a atividade superficial das substâncias húmicas utilizando método viscosimétrico. Os autores observaram que nas condições presentes na água e solo, as substâncias húmicas apresentam-se como colóides lineares. No entanto, elas podem apresentar-se como esfero-colóides rígidos em altas concentrações de solução ou em valores baixos de pH.

Segundo BECKETT (1990), o primeiro resultado significativo dos experimentos de mobilidade das partículas mostrou que, a não ser em isoladas exceções, as cargas das substâncias húmicas são sempre negativas.

TIPPING (1981)<sup>15</sup>, citado por BECKETT (1990), comenta que no caso de cargas positivas de Al e Fe (óxidos), a atração não envolve a adsorção das moléculas carregadas negativamente, através de simples mecanismos de atração eletrostática, mas sim pela formação de ligações covalentes entre superfícies dos grupos OH e grupos funcionais carboxílicos. Segundo o mesmo autor, a presença de cátions divalentes de Ca<sup>+2</sup> e Mg<sup>+2</sup> incrementam a adsorção com óxidos de ferro.

12 SCHNITZER, M. (1971). Metal-Organic Matter Interactions in Soils and Waters. IN "Organic Compounds in Aquatic Environments", S. D. Faust and J. V. Hunter, eds. Dekker, New York, p.297.

13 SCHNITZER, M.; KHAN, S. U. (1972). Humic Substances in Environment. Dekker, New York.

14 GHOSH, K.; SCHNITZER, M. (1980). Macromolecular structures of humic substances. *Soil Science*. 129: 226-276.

15 TIPPING, E. (1981). Adsorption by goethite ( $\alpha$ -FeOOH) of humic substances from tree different lakes. *Chem. Geol.* Vol.33, p. 81-89.



Uma interessante descoberta feita por SHOLKOVITZ et al (1978)<sup>16</sup>, citado por BECKETT (1990), mostrou que dos cátions divalentes predominantes na água do mar, o  $\text{Ca}^{+2}$  produz grande parte da coagulação em relação ao Mg. Isso demonstra que, além dos efeitos eletrostáticos, também as interações químicas específicas entre o metal e a superfície do colóide estão envolvidas nos mecanismos de coagulação. Além disso, BOYLE et al (1977) notaram que a eficiência da coagulação dos íons metais divalentes é da mesma ordem de habilidade para formar complexos coordenados. Possivelmente isso se deve aos mecanismos de coagulação envolverem a formação de metais complexados com os grupos funcionais contidos nas moléculas orgânicas adsorvidas nas superfícies das partículas.

NICHOLSON (1987)<sup>17</sup>, citado BECKETT (1990), realizou trabalhos que indicam que ferro coloidal em água altamente colorida com  $25 \pm 5$  mg/L de Matéria Orgânica Dissolvida (MOD) tem maior resistência à coagulação por sais que ferro coloidal em águas contendo  $8 \pm 5$  mg/L de MOD.

### 3.2.5. Oxidação e Remoção

WONG (1984) realizou estudo, em escala piloto, de filtração para remoção de ferro e manganês de águas de abastecimento. Dois tipos de filtros foram utilizados: leito constituído somente de antracito e leito constituído de antracito e areia. Foram realizadas comparações entre uso de soda cáustica (NaOH) e hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), para ajustar valores de pH antes da cloração. As concentrações de ferro e manganês variaram de 1 a 5 mg/L, os valores de pH foram ajustados para valores acima de 8,5 e as dosagens de cloro foram equivalentes a 2,5 vezes a estequiometria em tempos de reação de 20 minutos.

A eficiência dos filtros constituídos de duplo leito filtrante para a remoção de ferro foi excelente. Atingiu 90% de remoção na maioria das vezes e resultou ferro em concentrações inferiores ao limite recomendado (0,3 mg/L). O filtro constituído somente de antracito não apresentou bons resultados para as primeiras horas de filtração.

Para remoção de manganês, WONG (1984) utilizou o filtro de duplo leito filtrante e variou NaOH ou  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  para ajustar os valores de pH. Observou também que o manganês não é removido adequadamente quando NaOH é utilizado para corrigir valores de pH, mas utilizando  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  os resultados foram excelentes.

De acordo com o mesmo autor, para remover formas dissolvidas de ferro e manganês é necessário um processo que envolva oxidação das formas dissolvidas para ser efetiva a remoção das formas suspensas. Além disso, devido à sua lenta oxidação, a remoção do manganês é mais problemática que a do ferro.

Muitos são os métodos para remover ferro e manganês. Os processos mais utilizados em tratamento de águas de abastecimento em escala industrial são: aeração-filtração, cloração-filtração e oxidação com permanganato de potássio seguida de filtração em rocha calcárea.

16 SHOLKOVITZ, E. R. (1978). The flocculation of dissolved Fe, Mn, Al, Cu, Ni, Co and Cd during estuarine mixing. Earth Planet. Sci. Lett. Vol. 41, p. 77-86.

Devido ao alto custo e problemas operacionais de outros processos como troca iônica, oxidação com dióxido de cloro seguida de filtração, ajuste do pH e uso de membranas de filtração, eles têm sido aplicados, com menor frequência.

O processo de aeração-filtração geralmente é recomendado para águas com altas concentrações de ferro (maior que 5mg/L), para amenizar custos com produtos químicos. O processo de cloração-filtração é recomendado para remoção de pequenas concentrações de ferro (menores que 2mg/L). A oxidação com permanganato de potássio, seguida de filtração em leito de pedra calcária, é recomendada para remoção de pequenas a moderadas concentrações de ferro e manganês.

As operações de aeração-filtração incluem equipamento de aeração, tanque de retenção e filtros. O oxigênio da atmosfera reage com ferro e manganês contidos na água para produzir precipitados como sais de óxidos de ferro (fêrricos) e manganês (mangânicos). A velocidade de reação dependente do valor do pH é maior em valores elevados de pH. Dependendo das características da água, após a aeração, pode ser necessário um tempo de detenção de diversas horas. Quando os metais estão presentes em altas concentrações, algumas vezes, são necessários tanques de sedimentação para retenção dos precipitados de ferro e manganês. Filtros de pressão com meio preferencialmente constituído de antracito e areia são utilizados para remoção de ferro e manganês. A maior desvantagem do processo de aeração-filtração é o alto custo inicial e, se a concentração de manganês exceder 1 mg/L, deverão ser considerados tempos adicionais de retenção podendo ser requerido tratamento complementar com oxidantes químicos para diminuir, para níveis desejados, a concentração de manganês. O processo de cloração-filtração é simples e, normalmente, requer pequenas unidades de cloração e filtração. Algumas vezes são necessários um pequeno tanque de retenção e um sistema para ajuste do pH com soda cáustica (NaOH) ou hidróxido de cálcio [Ca(OH)<sub>2</sub>]. Tanto o cloro gasoso como o hipoclorito de sódio podem ser usados como agentes oxidantes. A quantidade teórica de cloro requerida para oxidar água contendo concentrações de ferro dissolvido de 1,0 mg/L e de manganês de 1,0 mg/L é de, respectivamente, 0,62 mg/L e 1,30 mg/L. Os filtros utilizados nesse processo são similares aos utilizados no processo de aeração-filtração.

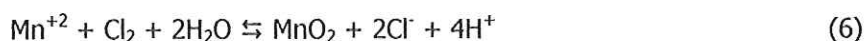
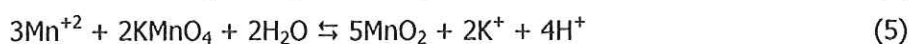
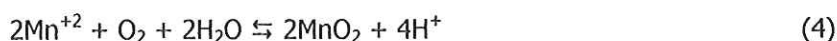
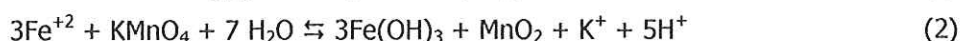
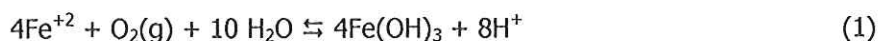
A oxidação com permanganato de potássio seguido da filtração em rocha calcária é similar ao processo de cloração-filtração, diferenciando-se no oxidante utilizado e no leito filtrante. Para reduzir a quantidade de ferro e manganês dissolvidos no interior do meio filtrante, é necessária solução de 1 a 4% de permanganato de potássio antecedendo o filtro. A rocha calcária é um mineral capaz de trocar elétrons com metais dissolvidos alterando-os para o estado precipitado e, portanto, têm a habilidade de oxidar e filtrar. No entanto, como sua capacidade de oxidação é limitada, eventualmente, após sua lavagem é necessário regenerar o leito com permanganato de potássio. A maioria dos filtros é equipada para lavagem com ar e água.

Se o ferro e o manganês dissolvidos não forem totalmente oxidados pelo permanganato de potássio, o leito oxida e filtra esses metais. Se for adicionado permanganato de potássio em excesso, ele age como regenerador do leito.

As maiores desvantagens desse processo são o alto custo operacional associado aos produtos químicos requeridos e à deterioração do leito filtrante, quando o valor de pH está em torno de 7,0. Em alguns casos, cloro é utilizado em associação com permanganato de potássio para reduzir custos com produtos químicos.

ZIRSCHKY & CARLSON (1984) realizaram estudo de remoção de ferro de águas de abastecimento utilizando método de infiltração no solo, justificando como principais vantagens: baixos custos de energia, facilidade de operação e baixa produção de lodo. Os autores comentam que os principais objetivos da infiltração são a aeração seguida da oxidação do ferro divalente para o estado trivalente com conseqüente sedimentação-filtração do precipitado. Em sistemas mecânicos, a aeração é promovida por meio de aeradores; e na infiltração, a incorporação de oxigênio dissolvido é realizada por processos naturais de transferências de gases. Isso é possível devido ao efeito do aumento da área superficial de contato para que a transferência de gases seja realizada. Os autores discutem que a oxidação do ferro depende da concentração inicial do ferro dissolvido, da concentração de oxigênio dissolvido e da concentração de íons hidroxila (OH)<sup>-</sup>. Além disso, a retenção do precipitado ocorre em camada de 30 a 40 cm da superfície, em um ano de operação. Os maiores problemas desse sistema são ressuspensão do ferro precipitado devido à passagem de animais e formação de trihalometanos (THM) durante a cloração, devido à incorporação de matéria orgânica dissolvida.

Segundo BENEFIELD & MORGAN (1990), ferro e manganês podem ser removidos da água de diferentes maneiras. São raros os casos em que a remoção de ferro e manganês é realizada no tratamento de ciclo completo (coagulação-floculação-sedimentação-filtração). A maneira mais utilizada envolve oxidação das formas mais dissolvidas de Fe<sup>+2</sup> e Mn<sup>+2</sup> e subsequente remoção, por filtração, dos precipitados formados. Oxigênio molecular, cloro e permanganato de potássio, com sucesso, são usados como agentes oxidantes. As reações que governam o processo são apresentadas a seguir:

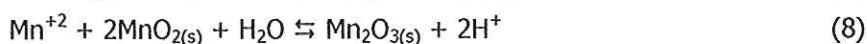
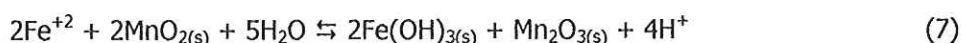


Estequiometricamente, 0,92 mg/L de KMnO<sub>4</sub> é requerido para oxidar 1 mg/L de ferro e 1,92 mg/L de KMnO<sub>4</sub> é requerido para oxidar 1 mg/L de manganês. Na prática, no entanto, são

requeridas dosagens menores que as teóricas. Em valores de pH entre 7,5 e 9,0 as reações são rápidas e completas.

Ainda segundo os mesmos autores, íons de ferro e manganês são efetivamente removidos via precipitação, com o aumento do pH, mas esse processo geralmente é caro se aplicado isoladamente. A forma mais apropriada para a aplicação do oxidante é antes da adição de qualquer produto químico (a menos que seja requerido o controle de pH). As doses requeridas para oxidação com cloro, permanganato de potássio e oxigênio podem ser obtidas estequiometricamente.

Além disso, na prática, a quantidade de permanganato requerido pode ser menor que a obtida estequiometricamente. Isso pode ser resultado da influência catalítica do dióxido mangânico na oxidação dos íons  $\text{Fe}^{+2}$  e  $\text{Mn}^{+2}$ . Esse mecanismo pode ser representado pelas reações:



As equações (1), (2) e (3) indicam que, normalmente, a remoção do  $\text{Fe}^{+2}$  depende da precipitação do  $\text{Fe}^{+3}$  como hidróxido  $[\text{Fe}(\text{OH})_{3(s)}]$ :



Analisando-se a equação (9), isoladamente, percebe-se que a solubilidade do hidróxido férrico decresce com o aumento do pH. Normalmente a solubilidade do hidróxido férrico decresce com o aumento do pH apenas para valores maiores que 10. Para valores menores, o hidróxido começa a se dissociar na forma do ânion solúvel  $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ . Todavia, na faixa usual de pH para tratamento de água para abastecimento, é relativamente baixa a solubilidade do hidróxido de  $\text{Fe}^{+3}$ .

No caso do manganês, a remoção do  $\text{Mn}^{+2}$  depende da precipitação do  $\text{Mn}^{+4}$  na forma de dióxido mangânico, como apresentado nas equações (4), (5) e (6). O dióxido mangânico apresenta-se insolúvel na faixa de pH utilizado para tratamento de águas de abastecimento.

A oxidação de manganês ( $\text{Mn}^{+2}$  para  $\text{Mn}^{+4}$ ) pelo oxigênio dissolvido é mais lenta que a oxidação do  $\text{Fe}^{+2}$  a  $\text{Fe}^{+3}$ ; é extremamente lenta para valores de pH menores que 9,5. Portanto, não se pode depender da simples aeração e detenção para precipitação e remoção de  $\text{MnO}_2$ .

A oxidação química de  $\text{Mn}^{+2}$  geralmente é requerida para obter-se precipitação de  $\text{MnO}_2$  em períodos de tempo razoáveis, com valores de pH utilizados em águas de abastecimento. O'CONNOR (1971) relata que permanganato de potássio provoca rápida oxidação de  $\text{Mn}^{+2}$  para  $\text{MnO}_2$  (aproximadamente em 5 minutos) dentro de ampla variação de pH; valores de pH ligeiramente alcalinos (de 7,5 a 8,0) são recomendáveis para evitar a formação  $\text{MnO}_2$  coloidal.

KNOCHE, BENSCHOTEN, KEARNEY, SOBORSKI & RECKHOW (1991) comentam que até 1975, para promover a oxidação dos íons metálicos o controle do ferro e manganês envolvia a aplicação do cloro isolado ou combinado com permanganato de potássio em valores de pH alcalinos. Foram reportadas dosagens de cloro livre de 5 mg/L. Na última década, muitas dessas práticas têm sido reestruturadas em virtude da ênfase na remoção de orgânicos e de controle dos subprodutos da cloração. Mais recentemente, a aplicação de oxidantes alternativos de altos custos em relação ao cloro, tem forçado muitos projetistas a reduzir a dosagem dos oxidantes. Em água contendo matéria orgânica, a competição entre ela e as formas reduzidas dos metais, tem resultado em ineficientes oxidações do ferro  $\text{Fe}^{+2}$  e manganês  $\text{Mn}^{+2}$ . Em virtude disso, durante o tratamento os valores de pH utilizados têm sido reduzidos para a faixa de 5,5 a 6,5 com o objetivo de maximizar a remoção dos compostos orgânicos. Com isso, a aplicação dos oxidantes é realizada para valores de pH abaixo dos recomendados.

KNOCHE et al (1991) realizaram um trabalho de investigação da cinética da oxidação do  $\text{Mn}^{+2}$  e  $\text{Fe}^{+2}$  por permanganato de potássio ( $\text{KMnO}_4$ ) e dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ). Foram analisados parâmetros como temperatura, concentração inicial do metal, pH e concentração de substâncias húmicas. Segundo eles, é muito rápida a oxidação, tanto do  $\text{Fe}^{+2}$  quanto do  $\text{Mn}^{+2}$ , quando esses não se encontram complexados com matéria orgânica dissolvida. No caso do ferro, a oxidação com dióxido de cloro ocorre em cerca de 5 segundos (para remoção > 90%) mesmo com pH em torno de 5,5. Na oxidação com permanganato de potássio, esse tempo foi inferior a 1 segundo. No entanto, quando o  $\text{Fe}^{+2}$  encontrava-se complexado com matéria orgânica dissolvida, a redução da concentração não alcançava 10%, mesmo com tempo de reação superior a 1 hora e com dosagens de oxidante dez vezes maiores que a estequiometria. Os estudos mostraram que  $\text{Mn}^{+2}$  realmente não é complexado com ácido húmico, a não ser em presença de grande quantidade de matéria orgânica dissolvida. Mesmo assim, remoção considerável somente era alcançada com tempos em torno de 20 segundos.

O  $\text{Fe}^{+2}$  promove eficiente complexação com matéria orgânica dissolvida. Por isso é muito difícil remover complexos orgânicos de  $\text{Fe}^{+2}$  por oxidação e subsequente precipitação do  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . Uma eficiente remoção desses complexos orgânicos de  $\text{Fe}^{+2}$  deve envolver processos que removam matéria orgânica, como coagulação ou adsorção em carvão ativado.

Muitos são os processos de remoção de ferro e manganês, embora a oxidação em pH apropriado com aeração ou uso de oxidantes químicos, sejam os mais utilizados em Saneamento Ambiental. Os métodos usualmente empregados para controle ou remoção de ferro e manganês em água de abastecimento são: formação de precipitado e filtração envolvendo aeração e sedimentação (com ou sem adição de cloro e alcalinizante para ajuste de pH), oxidação com permanganato de potássio, cloro, dióxido de cloro ou ozônio, seguida da filtração (com ou sem adição de alcalinizante), troca iônica e estabilização com polifosfatos.

A troca iônica é recomendável somente quando a concentração de ferro e manganês for baixa (geralmente menor que 0,5 mg/L). O uso de oxidantes causa a formação do precipitado de ferro para valores de pH maiores que 6,5 mas, no caso do manganês,

geralmente é necessário um valor de pH maior que 8,0 para que haja formação do precipitado de manganês.

A aeração da água que contém ferro ou manganês traz muitos benefícios pois, além da oxidação desses metais, a aeração auxilia a remoção de substâncias voláteis presentes na água.

A oxidação do ferro pode ser representada como reação de primeira ordem em relação ao ferro e oxigênio e de segunda ordem com relação ao íon hidroxila. Do ponto de vista prático, a oxidação do ferro pode ser considerada como pseudo-reação de primeira ordem. Mantendo-se constante outros fatores, a taxa de oxidação de ferro solúvel com uso de oxigênio molecular aumenta com o aumento do pH. A presença de matéria orgânica diminui a taxa de oxidação devido, provavelmente, à formação de vários complexos de ferro solúvel. A conversão de ferro e manganês solúvel nos precipitados é diretamente influenciada pelo pH. No caso de ferro, resultados satisfatórios geralmente são obtidos para valores de pH próximos a 7,0. Para manganês, o pH recomendado deve ser maior ou igual a 9,0. Quando a concentração de ferro for superior a 10 mg/L, pode ser benéfica a sedimentação após a oxidação. Porém, a eficiência de remoção não é satisfatória, devido à baixa velocidade atribuída aos flocos, havendo necessidade de filtração.

Com relação à aplicabilidade do processo de flotação por ar dissolvido na remoção de ferro e manganês, FERGUSON, LOGSDON E CURLEY (1995) realizaram estudo de caso de água de dois reservatórios comparando o processo de FAD seguida de filtração descendente com a filtração direta descendente. Entre outros, foram analisados vários parâmetros: remoção de turbidez, desinfecção, algas, ferro, manganês. Quanto a ferro e manganês concluiu-se que o processo de FAD apresentou remoção similar à filtração direta descendente, porém a flotação por ar dissolvido antecedendo a unidade de filtração acarretou substancial aumento da carreira de filtração dos filtros.

AZIZ & SMITH (1996)<sup>18</sup> citados por LYBERATOS et al (1998), sobre ensaios de filtração para remoção de manganês, afirmaram haver incremento considerável na remoção de manganês quando era aumentada a profundidade do leito de filtração. Por outro lado, quando o tamanho médio das partículas do leito filtrante era reduzido, a porcentagem de remoção de manganês aumentou de maneira insignificante.

Segundo CARLSON et al (1997), as formas dissolvidas de ferro e manganês requerem adição de um oxidante químico a fim de promover a conversão para precipitados. No entanto, formas coloidais de ferro e manganês não são efetivamente tratadas com adição de um oxidante químico. Sendo assim, para promover a remoção das formas coloidais, deve-se otimizar os processos de separação sólido-líquido. A determinação do ponto em que ocorre a oxidação e redução das formas dissolvidas do ferro ou manganês é apresentada como o fator crítico para a otimização da remoção.

Os autores realizaram um trabalho de fracionamento de ferro e manganês através de uma série de filtrações. O Fe e Mn apresentaram-se em três predominantes formas físico-

<sup>18</sup> AZIZ, H.; SMITH, P. (1996). Removal of manganese from water using crushed dolomite filtration technique. *Wat. Res.* 30, p.489-492.

químicas, isso são, frações: particulada (grande sólido oxidado), coloidal (pequeno sólido oxidado) e dissolvido (reduzido, insolúvel).

Óxidos de metal particulado podem ser facilmente removidos por coagulação, sedimentação e filtração. Já os coloidais passam mais comumente pelos filtros. Estratégias para remover Fe e Mn dissolvidos envolvem, tipicamente, dois passos. O primeiro é oxidação das formas dissolvidas para um estado de oxidação insolúvel usando um oxidante como permanganato de potássio, ozônio, dióxido de cloro, cloro ou oxigênio. No segundo passo, os precipitados (óxidos de metais), então, removidos utilizando-se técnicas de separação sólido-líquido.

Os processos de remoção de ferro e manganês comumente utilizados, baseiam-se na concentração total dos metais sem considerar as formas (frações) presentes. Estudos indicam que o fracionamento pode ajudar na compreensão das origens e remoção de ferro e manganês.

GOUZINIS et al (1998) estudaram a remoção de ferro, manganês e amônia presentes, simultaneamente, em um filtro biológico e influências de suas presenças na eficiência dos filtros. Os autores concluíram que a oxidação química, durante a operação do filtro pode não ser adequada e que elevados valores de eficiência de remoção de manganês somente foram alcançados com elevados tempos de retenção. Para baixas concentrações de amônia (< 2mg/L) não ocorreram interações entre amônia e manganês. Porém, altas concentrações de amônia interferiram substancialmente na eficiência de remoção de manganês. Verificaram, também, que o ferro afeta negativamente a remoção de amônia enquanto a amônia não altera a eficiência de remoção do ferro. Além disso, observaram que o ferro afeta a remoção do manganês.

MORUZZI (2000), em escala de laboratório, realizou estudo de aplicação de flotação por ar dissolvido conjugada à oxidação química, na remoção de ferro e manganês complexados em ácido húmico. Foram efetuados ensaios variando as dosagens de coagulante, pH de coagulação e dosagem de oxidante (pré-oxidação, oxidação conjunta com processo de coagulação e aplicação do oxidante após pré-clarificação por flotação). Os resultados mostraram que flotação por ar dissolvido sem oxidação química com o cloro apresentou bons resultados de remoção de ferro (na faixa de 88% de eficiência). Porém a associação da FAD com oxidação química (utilizando hipoclorito de sódio), nas melhores condições aplicadas e após filtração, apresentou excelentes resultados tanto na remoção do ferro complexado quanto na remoção do precipitado de manganês (eficiência de remoção maior que 98% para o ferro e na faixa de 80% para o manganês). Foi recomendada a utilização conjugada dos dois processos.

A aplicação de oxidante, juntamente com coagulante no momento da mistura rápida, apresentou melhores resultados de remoção de cor aparente (eficiência > 90%), turbidez (eficiência > 90%), concentrações de ferro (eficiência > 90%) e manganês (eficiência > 64%) após a FAD. Portanto, considerando-se a eficiência global do sistema - ou seja, remoção de cor aparente, turbidez, ferro e manganês - a aplicação conjunta de oxidante e coagulante no momento da mistura rápida constituiu a melhor alternativa de tratamento.

Houve formação de trihalometanos (THM), porém em baixas concentrações (menor que 36 µg/L), mesmo em tempos de contato de 25 minutos e em presença de quantidades de ácido húmico de 5 mg/L.

### 3.2.6. Formação de Trihalometanos

Apesar dos aspectos positivos de uso do cloro como oxidante, baixo custo e facilidade de aplicação (não é produzido *in- loco*), a aplicação do cloro em águas contendo substâncias húmicas leva à formação de compostos organoclorados prejudiciais à saúde humana, destacando-se os trihalometanos.

JOHNSON & JENSEN (1986) afirmam que na água o cloro pode existir em diversas formas. Nos processos de tratamento de água, geralmente adiciona-se cloro gasoso. O cloro molecular é rápida e completamente convertido em ácido hipocloroso (HOCl). Essas formas estão em equilíbrio com o íon hipocloroso (OCl<sup>-</sup>). As equações 10 e 11 apresentam o equilíbrio que governa o processo de formação do ácido hipocloroso e do íon hipoclorito.



Segundo os mesmos autores, são precursores da formação de trihalometanos (THM) e de outros compostos organoclorados não voláteis (NPTOX): produtos da decomposição de plantas (ácidos húmicos e fúlvicos), pigmentos (clorofila), biomassa de algas, aminoácidos, proteínas e efluentes industriais (fenóis).

O nível máximo de trihalometanos (THM) recomendado pela USEPA (US Environmental Protection Agency dos Estados Unidos da América) é de 0,1 mg/L. Os trihalometanos incluem compostos de clorofórmio (CHCl<sub>3</sub>), bromofórmio (CHBr<sub>3</sub>), bromodiclorometano (CHBrCl<sub>2</sub>), dibromoclorometano (CHBr<sub>2</sub>Cl) e dicloriodometano (CHCl<sub>2</sub>).

As reações de oxidação e substituição são importantes mecanismos de interação entre desinfectantes e matéria orgânica natural. Os processos de oxidação são responsáveis pela remoção de compostos orgânicos, precursores de THM e compostos halogenados totais (TOX). Mas as reações de substituição são fontes importantes de incorporação de cloro com a matéria orgânica. Os trihalometanos facilmente são quantificados por procedimentos de cromatografia de gás; no entanto, não são simples os métodos de quantificação das formas de organoclorados não voláteis (NPTOX) formadas pela cloração. Segundo os autores, a relação NPTOX/THM pode chegar a 11,2 vezes, dependendo da concentração e características dos precursores, do valor do pH, da dosagem aplicada de cloro, da temperatura e do tempo de exposição. Eles afirmam, ainda, que a maioria dos compostos orgânicos mutagênicos presentes podem ser não voláteis (NPTOX) e relativamente estáveis.



Segundo GLAZE (1987), a química do cloro em soluções aquosas inclui a formação das formas do ácido hipocloroso (HOCl) e do íon hipoclorito (OCl<sup>-</sup>), sendo que as formas predominantes variam com o valor do pH. Quando o cloro é aplicado na água como desinfetante, age como agente oxidante da matéria orgânica.

A possibilidade de formação de trihalometanos (THM), compostos organoclorados, pode causar riscos à saúde pública, verificada quando o cloro livre está presente e a água contém os chamados precursores, normalmente as substâncias húmicas. Além de THM podem ser formados outros subprodutos como consequência da cloração, tais como haloacetoneitrilas, halocetonas, haloácidos, aldeídos de baixa massa molecular e outros.

### **3.3. EVOLUÇÃO DA TECNOLOGIA DE FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO (FAD)**

#### **3.3.1. Unidades Denominadas de Primeira Geração**

SCHOFIELD (2001) relata que a primeira aplicação de uma unidade de FAD no tratamento de água contendo algas foi em Windhoek - Namíbia, 1965.

Segundo KIURU (2000), a FAD foi inicialmente utilizada na exploração de matérias primas minerais originadas de suspensão aquosa utilizando processos industriais no final do século XIX. A eficiência da FAD nesta aplicação é expressa como a taxa de recuperação de partículas da água (g/L).

A FAD foi introduzida como alternativa para o tratamento de água na década de 20. Desde então, é utilizada para clarificação da água através da remoção de partículas.

Dentre os primeiros sistemas utilizados de FAD, encontram-se os denominados ADKA e os Sveen-Pedersen. A principal característica destes sistemas são as dimensões dos tanques de flotação que são longos, estreitos, rasos e contêm uma região denominada zona de reação onde a água floculada e a água saturada entram pela parte inferior do tanque com escoamento vertical. Nesta região o escoamento é turbulento e o fluxo é ascendente para a superfície do tanque. Desta forma, as microbolhas misturam-se aos os flocos presentes na água a ser flotada.

Após a zona de reação, localiza-se o espaço propriamente reservado para a flotação denominado zona de clarificação por flotação onde a direção do fluxo declina ligeiramente em relação à horizontal.

As taxas de aplicação superficial (TAS) aplicadas são normalmente da ordem de 2 a 3 m/h. Em consequência do emprego destas pequenas taxas, forma-se fina camada de microbolhas, denominada manta branca de microbolhas, abaixo da superfície da água no espaço de flotação. Esta manta branca não desempenha papel de filtração nesse tipo de sistema de FAD, denominado de primeira geração. Esse tipo de sistema, atualmente pode ser encontrado em uso em indústrias de papel e celulose.

A Figura 3.3 apresenta esquema desse tipo de tanque.

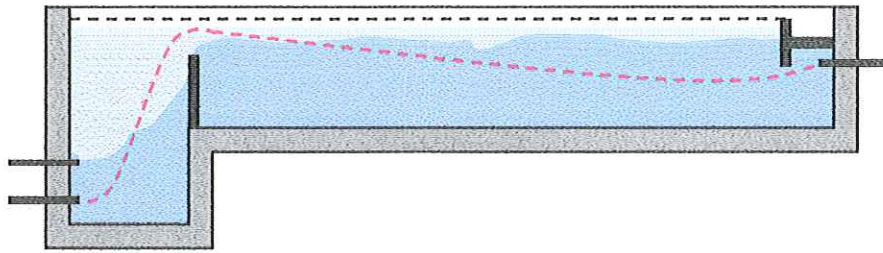


FIGURA 3.3 – Esquema do tanque denominado de primeira geração

### 3.3.2. Unidades Denominadas de Segunda Geração

A FAD foi amplamente empregada no tratamento de água e esgoto durante as décadas de 60 e 70 nos países escandinavos, devido ao fato de FAD ser bastante eficiente para remoção de sólidos suspensos formados pela coagulação/floculação de substâncias húmicas de água com metais trivalentes, quando comparada especialmente com a sedimentação no tratamento de água a baixas temperaturas.

Desde o início da década de 70, a FAD substituiu quase que totalmente a sedimentação na Finlândia, país que obteve extraordinário desenvolvimento nesta tecnologia. Os princípios fundamentais da FAD, a princípio, não foram modificados mas, verificou-se que, para aplicação de TAS maiores que 5 m/h a geometria dos tanques de flotação deveria sofrer grandes modificações. Os tanques de flotação tornaram-se mais largos, mais profundos e com menor comprimento.

Os tanques continuaram semelhantes aos da primeira geração com zona de reação e zona de clarificação por flotação, porém, como a geometria mudou e a profundidade do tanque tornou-se maior, a direção do fluxo apresenta maior declínio em relação a horizontal, com ângulos da ordem de 30 a 45°. Com isso, as TAS puderam facilmente ser incrementadas para 5 a 7 m/h podendo chegar a 10 m/h. Esta aplicação resultou no aparecimento da manta branca de microbolhas de ar com espessura de 30 a 50 cm no início do tanque que declina linearmente para valores de 10 a 20 cm no final do tanque. Esta manta branca tem, agora, ligeira função de filtro e esse tipo de sistema é denominado de segunda geração ou convencional.

A Figura 3.4 apresenta esquema desse tipo de tanque.

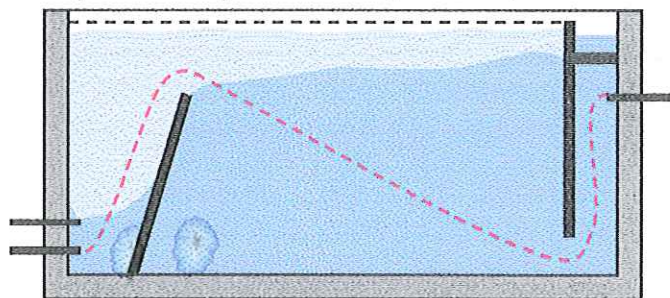


FIGURA 3.4 – Esquema do tanque denominado de segunda geração

### 3.3.3. Aplicação da FAD de Segunda Geração no Tratamento de Água

REES et al (1979) desenvolveram estudos em cinco estações piloto com vazão de 95 m<sup>3</sup>/h, para avaliar a eficiência da FAD no tratamento de cinco tipos de águas: água de rio com problemas de algas (acumulada durante três dias), água de rio com alta turbidez, água altamente colorida e com baixa turbidez, água rica em nutrientes com problemas de algas (acumulada por longo prazo) e água de um riacho com dureza relativamente alta.

As estações foram operadas durante dois anos, com o objetivo de verificar os efeitos das mudanças sazonais na qualidade da água no desempenho das estações. Os autores concluíram, entre outras coisas, que a flotação foi particularmente efetiva para o tratamento de águas com alto teor de algas, águas altamente coloridas e com baixa turbidez. O tratamento por flotação da água de rio com alta turbidez produziu qualidade da água ligeiramente pior que a produzida por sedimentação; entretanto, após filtração a qualidade da água foi semelhante.

Após testes realizados em escala de laboratório, escala piloto, análise dos resultados e viabilidade econômica, o sistema constituído por FAD e filtração para clarificação foi proposto por KROFTA & WANG (1982) como forma de tratamento de águas de abastecimento.

No Brasil, REALI (1984) realizou a primeira aplicação da FAD como etapa no tratamento de águas de abastecimento, através de pesquisa desenvolvida em escala piloto. A instalação com escoamento contínuo foi construída na estação de tratamento de água de São de Carlos, SP (ETA São Carlos), e foi usada água bruta afluyente. O autor concluiu que, para determinados casos, a FAD pode se constituir em alternativa à sedimentação.

SCHNEIDER et al (1991) pesquisaram instalação piloto de filtração direta e outra de FAD, utilizando água do sistema de Croton na cidade de New York, EUA. A água bruta do sistema de Croton apresentava qualidade com as seguintes características: baixa turbidez (entre 0,8 e 1,4 uT), baixa quantidade de algas, exceto nos períodos de *blooms* (excessiva proliferação de algas devido à disponibilidade de nutrientes e demais condições para a fotossíntese que levam ao processo de eutrofização), alcalinidade 45 mg CaCO<sub>3</sub>/L, COT na faixa de 3 a 6 mg/L, cor verdadeira de 20 uC, com picos de 40 uC e pH entre 6,5 e 7,5. Os autores verificaram haver vantagens no uso de FAD: carreiras de filtração maiores e uso de menor quantidade de água para lavagem de filtros, portanto, a recirculação de água é menor que de uma estação de filtração direta.

- Na filtração direta, os filtros são o único meio de remoção de sólidos e, na FAD, a remoção não é feita apenas nos filtros, porque o processo de flotação, que antecede a filtração, já remove de 75 a 95% das partículas existentes na água bruta. Dessa forma, como é menor a incidência de sólidos nos filtros, aumentam as carreiras de filtração e os filtros tornam-se menos susceptíveis a cargas inesperadas devidas à variação da qualidade de água bruta. Em vários testes realizados em escala piloto de filtração direta e de flotação, ocorreram picos de turbidez na água bruta mas, após os filtros, nenhuma degradação foi encontrada nos efluentes da FAD.

Os autores SCHNEIDER et al (1991) recomendam a utilização da FAD em conjunto com a filtração direta. Quando a água tem boa qualidade, a unidade de flotação pode ser desligada e a estação ser operada tal como instalação de filtração direta. Com isso, é possível a otimização, pois os custos da estação podem ser menores. Entretanto, a FAD tem maior custo que a filtração direta devido, principalmente, à necessidade de bombas para recircular parcela do efluente e de compressores para saturar a água com ar. Mesmo assim, as vantagens de baixos custos na disposição de sólidos e longas carreiras de filtração tornam o processo mais atrativo.

Na Universidade de Massachusetts, desde 1984, EDZWALD (1992) tem realizado pesquisas sobre aplicação da FAD no tratamento de águas de abastecimento, com as seguintes vantagens: baixo custo pelo fato de unidades de FAD ocuparem menores áreas que a sedimentação, menores quantidades de coagulantes que as necessárias para sedimentação, melhor eficiência na remoção de partículas em águas que contêm alta concentração de algas, com aumento das carreiras de filtração, tanto na filtração direta como na convencional além de projeto de FAD, integrado ao projeto de filtros permitir elevadas taxas de aplicação superficial ou longas carreiras de filtração, se comparadas àqueles obtidas após a clarificação por sedimentação.

Como desvantagem, o autor cita custos mais altos com energia elétrica para recalque de água de recirculação. Contudo, esses custos podem ser compensados com gastos menores de produtos químicos, no tratamento e na disposição de lodo.

EDZWALD (1995), em sistema de tratamento de água de abastecimento, recomenda o uso de flotação por ar dissolvido como etapa para clarificação precedendo o processo de filtração, especialmente para águas com alto teor de algas ou alta cor e baixa turbidez. O autor também informa que a aplicação da FAD não se limita, apenas, ao tratamento de águas que contenham cor natural ou algas. A FAD tem amplas aplicações no tratamento de águas superficiais para abastecimento.

Em muitos países, a FAD tem sido utilizada como parte do processo de tratamento de águas de abastecimento. Há mais de 20 anos, a Holanda utiliza FAD no tratamento de água com turbidez relativamente baixa e alto teor de algas e, segundo VAN PUFFELEN et al (1995), a FAD demonstrou-se eficaz em combinação com filtração rápida em areia.

Segundo OFFRINGA (1995), a flotação por ar dissolvido começou a ser utilizada na África do Sul, no final da década de 70, no tratamento de águas eutrofizadas. Devido a sérios problemas observados em estações convencionais, a eutrofização de águas superficiais tem despertado preocupação crescente, levando a modificações de diversas estações existentes e construções de novas estações utilizando a FAD.

A Finlândia utiliza a FAD, como processo de clarificação desde 1965. Segundo HEINANEN (1995), as águas brutas da Finlândia, na maioria dos casos, apresentam alta cor e o desempenho das estações de tratamento com FAD tem mostrado eficiência do método no tratamento desse tipo de água.

DOMBROSKI (1996) cita como vantagens da FAD: operação com altas taxas de aplicação superficial, unidades relativamente pequenas e com baixa profundidade; menores quantidades de coagulante e auxiliar de floculação; partida rápida podendo alcançar qualidade constante da água em 45 minutos; concentração relativamente alta de sólidos no lodo produzido com possibilidade de ser apropriado para desidratação sem espessamento intermediário; remoção de matéria orgânica volátil, sabor e odor por "stripping" durante a flotação; melhor remoção de partículas de baixa densidade e com algas, o que pode aumentar as carreiras de filtração em estações convencionais ou de filtração direta e menor gasto de água para lavagem dos filtros, devido ao aumento das carreiras de filtração, comparada à filtração direta.

NICKOLS et al (2000) investigaram a eficiência da integração de uma unidade piloto de flotação por ar dissolvido como parte de um programa de avaliação de opções de tratamento para água de Croton na cidade de New York. Essa piloto foi operada de 1996 a 1999 com o objetivo de confirmar possíveis alternativas de tratamento e otimizar os parâmetros de projeto.

O tratamento consistia de sistemas de desinfecção com cloro e controle de corrosão com ortofosfatos e soda cáustica, sem filtração, pois a água bruta de Croton apresentava boa qualidade. Entretanto, para antecipar o atendimento de futuras regulamentações de qualidade estabelecidas por Legislações Estaduais e Federais, o tratamento selecionado consistiu em: coagulação (dosagem de sulfato de alumínio na faixa de 9 a 30 mg/L, dosagem de polímero catiônico na faixa de 0,5 a 1,5 mg/L e pH entre 6,3 e 7,1); floculação (2 tanques de floculação com tempo de detenção de 4,8 a 8 minutos); flotação por ar dissolvido (taxa de aplicação superficial de 15 a 25 m/h e 11 g de ar/m<sup>3</sup>); ozonização e filtração.

Características da água bruta de Croton: temperatura: 2 a 30 °C, turbidez: 0,6 a 3,6 uT, cor: 14 a 48 uC, COT: 2,2 a 4,3 mg/L, pH: 6,2 a 9,2, alcalinidade: 42 a 70 mg/L CaCO<sub>3</sub>, THM: 74 a 86 µg/L, Ferro: 0,01 a 0,17 mg/L e Manganês: 0,01 a 0,33 mg/L.

O tratamento foi otimizado e resultou em altas taxas de produção de água com excepcional qualidade (turbidez menor que 0,5 uT).

Segundo RICHTER (2000), a primeira unidade de FAD, utilizada no tratamento de água, na América Latina foi constituída na cidade de Joinville – SC, Brasil, e a operação foi iniciada em Setembro de 1992. Desde então, existem em operação, em torno de 20 unidades FAD, listadas na Tabela 3.2, a seguir:

TABELA 3.2 – Lista das unidades de FAD utilizadas no tratamento de água na América Latina

<b>Estação de Tratamento</b>	<b>Capacidade (L/s)</b>	<b>Localização (cidade, estado)</b>	<b>Data do Início da Operação</b>	<b>Comentários</b>
Dohler	70	Joinville (SC) Brasil	Setembro/92	Nova Coag/Flot/Filt
José Ignácio	14	José Ignácio Uruguai	Janeiro/94	Nova Flot/Filt
Meaípe*	40	Guarapari (ES) Brasil	Fevereiro/94	Existente Adaptada p/FAD Flot/Filt

La Barra	140	Barra de Maldonado Uruguai	Fevereiro/94	Nova Flot/Filt
Mantenópolis	30	Mantenópolis (ES) Brasil	Agosto/94	Existente Adaptada p/FAD
ETA III	125	Jaraguá do Sul (SC) Brasil	Novembro/94	Nova Flot/Filt
Itu	20	Itu (SP) Brasil	Junho/94	Nova Flot/Filt
ETA I	125	Jaraguá do Sul (SC) Brasil	Setembro /96	Existente Adaptada p/FAD
Vila C	450	Foz do Iguaçu (PR) Brasil	Janeiro/97	Existente Adaptada p/FAD
Ibatiba	23	Ibatiba (ES) Brasil	Junho/97	Existente Adaptada p/FAD
Cupsa	14	Minas Uruguai	Julho/97	Nova Flot/Filt
Braço do Rio	30	Conceição da Barra (ES) Brasil	Julho/97	Existente Adaptada p/FAD
Mairiporã	28	Mairiporã (SP) Brasil	Julho/97	Nova Flot/Filt
Iúna	42	Iúna (ES) Brasil	Agosto/97	Existente Adaptada p/FAD
Cajamar	99	Cajamar (SP) Brasil	Agosto/97	Nova Flot/Filt
São José dos Pinhais	200	S. J. dos Pinhais (PR) Brasil	Julho/98	Nova Flot/Filt
Caraguatatuba	600	Caraguatatuba (SP) Brasil	Julho/98	Nova Flot/Filt
Itapeva/Itaoca	75	Itapemerim (ES) Brasil	Novembro/98	Existente Adaptada p/FAD
Mandaguahy	180	Jaú (SP) Brasil	Novembro/99	Nova Flot/Filt
Laguna Del Sauce	2000	Maldonado Uruguai	Abril/2000	Existente Adaptada p/FAD

\*A Estação de Meaípe foi construída em 1988 e colocada em teste até 1994 quando foi oficialmente inaugurada em Março de 1994.

### 3.3.4. Unidades Denominadas Flotofiltro

Segundo KIURU (2000), provavelmente, do ponto de vista hidráulico, o mais importante passo dado no desenvolvimento da tecnologia de FAD, foi a invenção do Flotofiltro que ocorreu no final da década de 60, na Suécia. Esta idéia combina, em um só tanque, a flotação por ar dissolvido e a filtração direta.

Hidraulicamente esta combinação é ideal, pois resulta em fluxo vertical de água da superfície do tanque para baixo cobrindo a totalidade do fundo do espaço de flotação. Este fluxo de água vertical é igualmente distribuído ao longo da superfície horizontal do tanque.

Se a altura do espaço de flotação for suficientemente grande, podem ser empregadas TAS de 10 a 15 m/h e, portanto, ocorre expansão da manta branca de microbolhas formando um leito filtrante.

240 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.h  
320 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.h

O leito filtrante, constituído de microbolhas de ar, possui camada espessa de 80 a 120 cm na parte superior da zona de clarificação e o fluxo vertical de água é forçado a passar através desse leito filtrante.

As TAS, hidraulicamente, podem atingir 20 a 25 m/h mas, na prática, para não comprometer a eficiência do sistema, não são utilizadas taxas maiores que 15 m/h. A FAD ocorre em condições de escoamento laminar.

A Figura 3.5 apresenta esquema desse tipo de tanque.

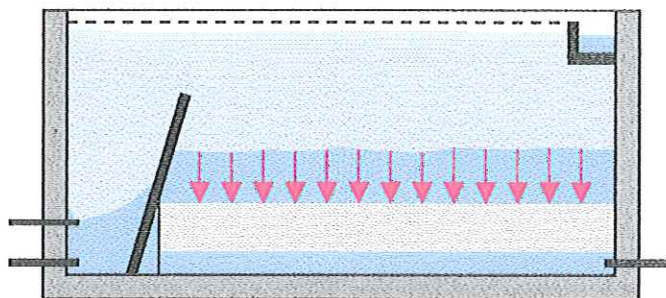


FIGURA 3.5 – Esquema do tanque denominado de Flotofiltro

### 3.3.5. Aplicação do Flotofiltro

REALI (1991), a partir de estudos intensivos realizados com instalação compacta para tratamento de água que, em uma só unidade conjugava processos de coagulação/floculação/flotação/filtração, concebeu uma unidade original de flotação com escoamento horizontal entre placas paralelas e inclinadas com baixo número de Reynolds (FADEHBR). Tal unidade piloto foi construída no Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC/USP, com o propósito de caracterizar os principais parâmetros de projeto desse tipo de reator, assim como avaliar seu desempenho na clarificação de vários tipos de água bruta. Nesse trabalho foram apresentados os resultados referentes à influência da velocidade entre placas e de quantidade de ar fornecida na eficiência de FADEHBR. Para atingir o objetivo principal o autor desenvolveu os seguintes passos: a) avaliação da eficiência de uma câmara de saturação com "recheio" composto de anéis de PVC, com adequada metodologia, b) utilizando água bruta com cor moderadamente elevada (100 uC), baixa turbidez (6 uT) e água do rio Ribeirão do Feijão em São Carlos, SP, comparação das condições ótimas de coagulação obtidas através de ensaios convencionais de sedimentação (*Jar-Test*); com as condições de coagulação obtidas em ensaios realizados com unidade de flotação por ar dissolvido (Flotatest), c) proposição de equacionamento matemático com o objetivo de estabelecer bases teóricas para análise qualitativa dos principais parâmetros envolvidos no processo de flotação por ar dissolvido com recirculação pressurizada.

REALI verificou que os resultados obtidos nos ensaios efetuados na instalação piloto comprovaram que o sistema proposto constitui alternativa tecnicamente viável para a clarificação do rio Ribeirão do Feijão em São Carlos – SP. A idéia de conjugar em uma só

estrutura as unidades de floculação, flotação por ar dissolvido e filtração com taxa declinante resultou em sistema original de clarificação, bastante compacto que requer pouco tempo, cerca de uma hora, para entrar em equilíbrio. Ele constatou que, quer para água com cor moderadamente elevada quer para água do rio Ribeirão do Feijão com alta coloração, as condições de coagulação foram diferentes tanto para a flotação quanto para a sedimentação.

KROFTA & GUSS (1993) apresentaram um sistema de flotação e filtração em uma única unidade que pode ser aplicado em tratamento convencional de água, tratamento terciário de águas residuárias e sistemas de reciclagem de água. De acordo esses autores, esse sistema apresentou elevada eficiência além de implicar em unidades menores e custos mais baixos.

### **3.3.6. Unidades Denominadas de Terceira Geração**

A partir do aparecimento do Flotofiltro, aconteceu a evolução das unidades para as denominadas de terceira geração. Esta geração iniciou seu desenvolvimento na década de 90, com o objetivo de incrementar TAS nas unidades.

Até então, como se acreditava que a FAD poderia ser operada somente em condições de escoamento laminar, a máxima taxa aplicada era de 25 m/h. Quando a taxa superava esse valor, as condições de escoamento passavam de laminar para turbulento. O problema a ser solucionado era como controlar o fluxo de água nas condições turbulentas para que a FAD ocorresse de forma apropriada.

Para a utilização de TAS de 25 a 40 m/h ou maiores, a geometria dos tanques de flotação deveria ser convenientemente modificada. A direção do fluxo de água continuaria vertical e descendente da superfície da água diretamente para o fundo do tanque. Levando-se em conta essas altas taxas, os tanques deveriam ser mais profundos e as microbolhas menores. Neste caso, o diâmetro médio das microbolhas deveria ser de 40 a 70  $\mu\text{m}$  e a profundidade do espaço de flotação da ordem de 2,5 a 3,5 m. Conseqüentemente, a profundidade do tanque de flotação deveria ser da ordem de 3,0 a 4,0 m.

Neste caso, há a presença de fina placa horizontal – com orifícios redondos de diferentes tamanhos, distribuídos ao longo da seção horizontal – localizada na zona de clarificação por flotação aproximadamente 0,5 m acima do fundo do tanque. O projeto destas placas é protegido por patentes.

O papel desta placa é controlar o fluxo de água no espaço de flotação e distribuí-lo, de maneira uniforme, ao longo de toda a seção – apesar das condições de escoamento turbulento.

A espessura do leito filtrante formado de microbolhas, tem a função de filtro e, dependendo do fluxo de água, é da ordem de 1,5 a 2,5 m.

As unidades de terceira geração podem ser divididas em: com placas e sem placas e as unidades sem placas podem ser subdivididas em: sem colméias e com colméias. Estas últimas consistem na adequada aplicação de dispositivo tipo colméias, no interior da zona de clarificação por flotação, para remoção de microbolhas residuais do efluente.



As unidades com placas consistem na aplicação, no interior da zona de clarificação por flotação, de placas planas paralelas inclinadas, adequadamente espaçadas – assim asseguram escoamento com menor número de Reynolds, escoamento laminar, o que possibilita a aplicação de maiores taxas da ordem de 40 m/h e até maiores. Estas unidades podem trabalhar com escoamento horizontal ou vertical.

A Figura 3.6 apresenta esquema desse tipo de tanque.

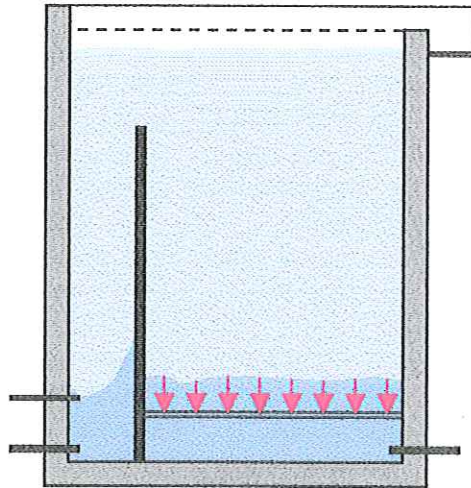


FIGURA 3.6 – Esquema do tanque denominado de terceira geração

### 3.3.7. Aplicação de Unidades de Terceira Geração com Escoamento Turbulento

HEDBERG et al (1998) pesquisaram a utilização de dispositivo no interior de uma unidade de FAD, como sistema de remoção de ar. O estudo foi realizado em uma FAD em escala piloto composta por duas unidades de mistura rápida, três tanques de floculação dispostos em série, a unidade de FAD propriamente dita e, em alguns dos experimentos, dois filtros descendentes em paralelo. Os autores verificaram que as bolhas de ar dispersas no efluente prejudicavam o desempenho dos filtros subsequentes ao reator de flotação, diminuindo as carreiras de filtração e prejudicando a qualidade do efluente. Para remoção do ar disperso, os autores utilizaram lamelas (placas planas) variando o comprimento das placas, o ângulo de inclinação e a distância entre as placas paralelas. As placas foram dispostas no interior da zona de clarificação por FAD, após a zona de contato, com a intenção de promover a remoção das bolhas de ar dispersas no efluente concernente ao processo. Os autores verificaram, também, que ângulos de inclinação das placas da ordem de  $40^\circ$ , que possibilitavam maior área de projeção das placas, resultaram a obtenção dos melhores valores de remoção de turbidez. Com essa disposição das placas, a vazão de entrada do reator pode ser incrementada, sem prejuízo da qualidade do efluente.

EDZWALD et al (1999) no projeto de estações de tratamento de água, estudaram a integração da tecnologia da FAD de alta taxa, com unidades contendo dispositivo tipo colméia

para remoção de microbolhas residuais do efluente instalado no interior da zona de clarificação por flotação e investigaram a eficiência da FAD de alta taxa antecedendo a filtração.

As unidades de FAD foram instaladas em duas ETAs. A primeira, em Newport News, EUA, operada de fevereiro a junho de 1997, utilizou somente sulfato de alumínio com dosagem entre 45 a 50 mg/l e pH entre 6,4 a 6,7. Essa ETA foi operada a uma vazão de 22,7 m<sup>3</sup>/h, com tempo total de floculação de 6 minutos e a água bruta com as seguintes características: temperatura: 7 a 22 °C, turbidez: 1,3 a 3,7 uT, cor: 20 a 50 uC, COT: 20 a 50 e pH: 7,1 a 7,9.

A segunda ETA, em Fairfield, EUA, operada de julho a março de 1998, utilizou sulfato de alumínio com dosagens de 10 a 17 mg/L e 1 mg/L de polímero catiônico. Foi utilizada vazão de 20 a 21 m<sup>3</sup>/h com tempo total de floculação de 7 minutos. Características da água bruta: temperatura: 12 a 17 °C, turbidez: 0,61 a 1,25 uT, cor: 20 a 25 uC, COT: 2,9 a 3,2 e pH: 7,0 a 7,3.

O objetivo dessa pesquisa - através de dois métodos de remoção de bolhas, um interno e outro externo - foi testar o uso de baixos tempos de floculação (6 a 7 minutos), avaliar os efeitos de altas taxas na FAD (17 a 44 m/h), investigar a eficiência da filtração, além de estudar a possibilidade das bolhas de ar não carrearem para os filtros.

Os autores observaram que, nos dois casos, quando empregadas TAS de até 30 m/h, os resultados foram excelentes com valores de turbidez menores que 1,0 uT mas, quando utilizaram TAS de 44 m/h, a eficiência não foi tão boa. Os resultados mostraram também ser viável a integração da FAD de alta taxa, por possibilitar diminuição dos tempos de floculação (5 minutos) em relação aos tempos adotados em unidades convencionais (20 a 25 minutos) e por ser possível aumentar a taxa de aplicação superficial para 30 a 40 m/h, sem causar prejuízo à qualidade do efluente. Além disso, foi eficiente a introdução, no interior da zona de flotação, de dispositivo para retirada das microbolhas de ar, promover melhores condições para operação dos filtros.

AMATO et al (2000) estudaram a integração de unidades de FAD denominadas DAFRápide® no tratamento de 5 diferentes tipos de águas, com o objetivo de avaliação da eficiência dessas unidades no tratamento de água. Foram utilizados, em todos os casos, tempo de floculação de 5 a 10 minutos, gradiente médio de velocidade na floculação de 20 a 50 s<sup>-1</sup> e taxas de aplicação superficial da ordem de 20 a 40 m/h.

As unidades foram localizadas nos seguintes lugares e, na época, a água bruta apresentava as seguintes características:

i) Newport News (Virginia, EUA) – fevereiro a junho de 1997 – Características da água bruta: temperatura: 7 a 22 °C, turbidez: 1,3 a 3,7 uT, cor: 20 a 50 uC, COT: 20 a 50 e pH: 7,1 a 7,9;

ii) Fairfield (Connecticut, EUA) – julho de 1997 a março de 1998 – Características da água bruta: temperatura: 12 a 17 °C, turbidez: 0,61 a 1,25 uT, cor: 20 a 25 uC, COT: 2,9 a 3,2 e pH: 7,0 a 7,3;

iii) Alton WTW (Suffolk, Inglaterra) – abril a julho de 1999 – Características da água bruta: turbidez entre 1 e 10 uT, cor entre 10 e 35 uC e COT entre 4,6 e 5,4 mg/L;

iv) Fonte n. 1 – novembro de 1999 a março de 2000 – Características da água bruta: turbidez entre 0,3 e 1,4 uT, cor entre 3 – 8 uC, COT entre 1,4 e 2,4 mg/L;

v) Fonte n. 2 – novembro de 1999 a março de 2000 – Características da água bruta: turbidez entre 0,5 e 2,9 uT, cor entre 8 e 18 uC, COT entre 2,1 e 3,4 mg/L.

A Tabela 3.3, a seguir, apresenta um resumo das dosagens de produtos químicos aplicados em cada lugar.

TABELA 3.3 – Resumo das dosagens dos produtos químicos aplicados nas respectivas localizações

Localização	Sulfato de Alumínio (mg/L)	Cloreto Férrico (mg/L)	Polímero (mg/L)	Produto Químico p/ Controle do pH	pH de Coagulação
i) Newport News	45 a 50	Não foi aplicado	Não foi aplicado	Não foi aplicado	6,4 a 6,7
ii) Fairfield	10 a 17	Não foi aplicado	1,0 catiônico	Não foi aplicado	6,3 a 7,0
iii) Alton	Não foi aplicado	4,4 a 7,0	Não foi aplicado	Lima	7,7 a 8,1
iv) Fonte n. 1	27 a 37	4,2 a 4,5	0,05 cat 0,02 ani	Soda cáustica	5,7 a 6,7
v) Fonte n. 2	35 a 41	6,3 a 7,7	0,02 a 0,05 catiônico	Soda cáustica	5,6 a 6,9

Os autores concluíram que, no tratamento dessas águas, a integração da FAD foi eficiente, mesmo quando empregados tempos de floculação da ordem de 5 a 10 minutos e taxas de aplicação superficial de 20 a 40 m/h - pois forneceram turbidez com valores inferiores a 1,0 uT, além de fornecerem economia.

### 3.3.8. Aplicação de Unidades de Terceira Geração com Escoamento Associado a Baixos Números de Reynolds

O primeiro relato desse tipo de unidade é encontrado em LUNDGREEN (1970) e comenta que o uso de placas paralelas, adequadamente espaçadas, asseguram escoamento com menor número de Reynolds, que possibilita maiores taxas de aplicação superficial (TAS) e aumento da eficiência do processo devido ao seguinte efeito: eliminação da turbulência proporcionando zona de relativo repouso próximo às placas (causado por forças de atrito entre

as placas e o líquido), na qual as partículas (flocos) podem subir à superfície, sem sofrer interferência do escoamento. O autor concluiu que a unidade de FAD por ele concebida, com introdução de placas, ofereceu muitas vantagens no tratamento de águas residuárias de indústrias de papel, por operar em altas taxas e permitir redução de tamanho da unidade de flotação. Comparada ao projeto convencional de flotação, a área requerida foi reduzida em 40 a 50%, com diminuição de custos na montagem da estação. Embora tenha relatado as vantagens inerentes ao emprego da unidade de FAD contendo placas em seu interior, ele não forneceu informações a respeito das características construtivas e dos parâmetros de projeto da referida unidade.

São recentes em todo o mundo os estudos realizados com esse tipo de reator, aplicados tanto no tratamento de águas residuárias quanto no tratamento de águas destinadas ao abastecimento.

No Brasil, em 1993, foi REALI quem iniciou linha de pesquisa no Departamento do SHS-EESC/USP. Nesta linha, foram desenvolvidos diversos trabalhos, podendo-se citar as seguintes dissertações de mestrado:

i) DOMBROSKI (1996), estudando a influência das condições de floculação na eficiência da flotação por ar dissolvido de alta taxa, com placas, aplicada ao tratamento de água de abastecimento, concluiu que: em ensaios realizados na instalação com escoamento contínuo de coagulação-floculação-flotação por ar dissolvido de alta taxa e água Tipo I, contendo 4 mg/L de ácido húmico e aproximadamente 2,2 mL/L de suspensão mãe de caulinita, preparada segundo metodologia proposta por CAMPOS, 1980, em condições de coagulação e de floculação adequadamente otimizadas - o desempenho da flotação foi relativamente equivalente, tanto para TAS de 15 m/h quanto para 30 m/h - em um determinado tempo de detenção na zona de contato. Concluiu também: que dentre os diversos valores estudados de gradiente de velocidade médio de floculação, foram as combinações com valores entre 40 e 120  $s^{-1}$  que proporcionaram melhores resultados; que o escalonamento do gradiente de velocidade médio de floculação teve pouca influência sobre o desempenho da flotação para o tempo de floculação de 24 minutos, enquanto que, para 12 minutos de floculação, tal parâmetro apresentou influência mais significativa. Para a água Tipo II, contendo 16 mg/L de ácido húmico, combinações do gradiente médio de floculação entre 30 e 80  $s^{-1}$  mostraram-se adequadas para a clarificação por flotação da água em estudo, preferencialmente com o valor mais baixo na última câmara de floculação (30  $s^{-1}$ ), para tempo de floculação de 24 minutos e três câmaras de floculação em série.

ii) MARCHETTO (1996) que estudou água Tipo I com cor moderadamente elevada (100 uC), baixa turbidez (7 uT) e água Tipo II com cor elevada 260 uT e turbidez de 7 uT, com variação do ângulo (60° e 70°) entre placas presentes no interior da unidade piloto tipo FADEHBR, concluiu que, para a água Tipo I, ambos os ângulos entre placas apresentaram alta eficiência na remoção de cor de 89 a 94%, turbidez de 84 a 93% e Sólidos Suspensos Totais (SST) de 86 a 95%, para valores de taxa de aplicação superficial (TAS) entre 10 e 19 m/h

(número de Reynolds entre 241 e 480). Para a água Tipo II, apesar da impossibilidade de serem efetuados maior número de ensaios, foi possível MARCHETTO verificar bom desempenho da flotação. Comparando-se os resultados obtidos com DSA de 30 mg/l e de 50 mg/l de coagulante, trabalhando com os mesmos parâmetros (vazão, gradiente de floculação, quantidade de ar fornecida e praticamente a mesma TAS, o autor verificou que para a menor dosagem de coagulante estudada (30mg/l) pode ser possível chegar a resultados bastante semelhantes àqueles obtidos com a dosagem de 50mg/L.

iii) SANTOS (1997), estudando unidade de flotação por ar dissolvido de alta taxa, com placas planas paralelas e escoamento vertical (em processo de patente por REALI), aplicada à clarificação de água de abastecimento com elevada concentração de algas, mostrou que a instalação do módulo contendo placas planas paralelas (50° com a horizontal) no interior da unidade de flotação, não acarretou acúmulo nocivo de flocos flotados nos espaços entre as placas, e ocorreu mecanismo de autolimpeza. Além disso, ela observou que, de maneira geral, a unidade de flotação de alta taxa apresentou elevada eficiência na remoção de algas, sempre acima de 94%, com TASap de 9; 15 e 43 m/h e fornecimento de ar na faixa de 2,7 a 4,7 g de ar/m<sup>3</sup>.

iv) SARTORI (1998), utilizando água contendo cor de 100 uC, turbidez de 6 uT e a unidade piloto de alta taxa, com placas, FADEHBR, investigou a aplicação de polímeros sintéticos como auxiliares de floculação aplicados no tratamento de águas de abastecimento. Concluiu que, nos ensaios realizados com dosagem de 40 mg/L de sulfato de alumínio (sem aplicação de polímero), a unidade de flotação de alta taxa apresentou eficiência de 87% na remoção de cor aparente e turbidez e 82% de eficiência na remoção de SST para TAS de 11 m/h e quantidade de ar fornecida de 4,88 g de ar/m<sup>3</sup> de água. Em relação aos ensaios realizados com FADEHBR utilizando DSA de 20 mg/L e 0,25 mg/L de polímero não iônico, verificou eficiência na remoção de cor aparente entre 76 a 82%, turbidez de 73 a 80% e SST entre 79 a 84%, para valores de TAS de 11 e 22 m/h. A eficiência de remoção de SST foi de 76% (residual de 3,0 mg/L), e a quantidade de ar requerida para a flotação situou-se em torno de 3,20 g de ar/ m<sup>3</sup> de água bruta.

Com bases nos resultados dessas dissertações foram publicados os seguintes artigos: REALI & CAMPOS (1993), LOBATO & REALI (1995), REALI & MARCHETTO (1996), DOMBROSKI, REALI & MARCHETTO (1996), REALI & DOMBROSKI (1996), REALI & SANTOS (1996), MARCHETTO & REALI (1997), MARCHETTO & REALI (1997), REALI & SARTORI (1998), SARTORI & REALI (1999), REALI & SARTORI (2000), REALI & MARCHETTO (2000).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. DESCRIÇÃO GERAL DAS ETAPAS DO TRABALHO

O presente trabalho foi dividido em duas grandes etapas:

ETAPA I - envolveu a análise comparativa do desempenho da clarificação de água para abastecimento contendo ferro e manganês. Esta investigação foi realizada em duas fases: uma com uso de unidades de flotação por ar dissolvido (Fase 1) e outra com uso de sedimentação (Fase 2). Ambos os tratamentos foram associados à oxidação química com hipoclorito de sódio, em escala de laboratório.

Para a realização destas análises foram feitos ensaios preliminares à oxidação/coagulação/flotação, executados em conjunto com o então mestrando Rodrigo Braga Moruzzi, com vistas à investigação da formação de complexos entre a matéria orgânica e os metais presentes, e ao estudo da eficiência da oxidação sem a FAD, variando-se o pH, dosagem de oxidante e tempo de oxidação. Os resultados desta etapa de estudo fazem parte de dissertação de mestrado MORUZZI (2000).

Nessa etapa foram estudadas as variáveis julgadas mais importantes para a água e o tipo de tratamento em questão: dosagem de coagulante (cloreto férrico), pH de coagulação, dosagem de oxidante (hipoclorito de sódio), gradiente médio de velocidade de floculação e tempo de floculação.

Todos os ensaios, em escala de laboratório, foram efetuados empregando-se equipamentos com alimentação por batelada, denominado Flotateste para o caso da flotação e Colunas de Sedimentação para análise do desempenho da sedimentação.

Tanto o processo da FAD quanto a operação de sedimentação (Fases 1 e 2) foram investigados associados à oxidação química e os ensaios foram classificados em três tipos: Tipo 1 (estudo da aplicação do oxidante no momento da mistura rápida), Tipo 2 (aplicação do oxidante antecedendo o processo de coagulação-floculação-flotação durante 5 minutos) e Tipo 3 (aplicação do oxidante após a pré-clarificação por FAD, anteriormente à realização da filtração em papel de filtro Whatman 40).

Na Fase 1, após a finalização destes ensaios teve início a avaliação da influência da dosagem de oxidante na oxidação química associada à FAD. Para tanto, foram fixados os parâmetros que apresentaram os melhores resultados nos ensaios anteriores e variada a

dosagem de oxidante. Nestes ensaios todas as amostras foram submetidas à filtração em papel de filtro Whatman 40.

Na seqüência, realizou-se também estudo da influência das variáveis: gradiente médio de velocidade de floculação ( $G_F$ ) e tempo médio de floculação ( $T_F$ ), na eficiência da flotação e da sedimentação, ambas associadas à oxidação química.

A Figura 4.1 apresenta esquema ilustrativo das fases do estudo realizado em escala de laboratório (ETAPA I) utilizando equipamento de sedimentação e de flotação em colunas.

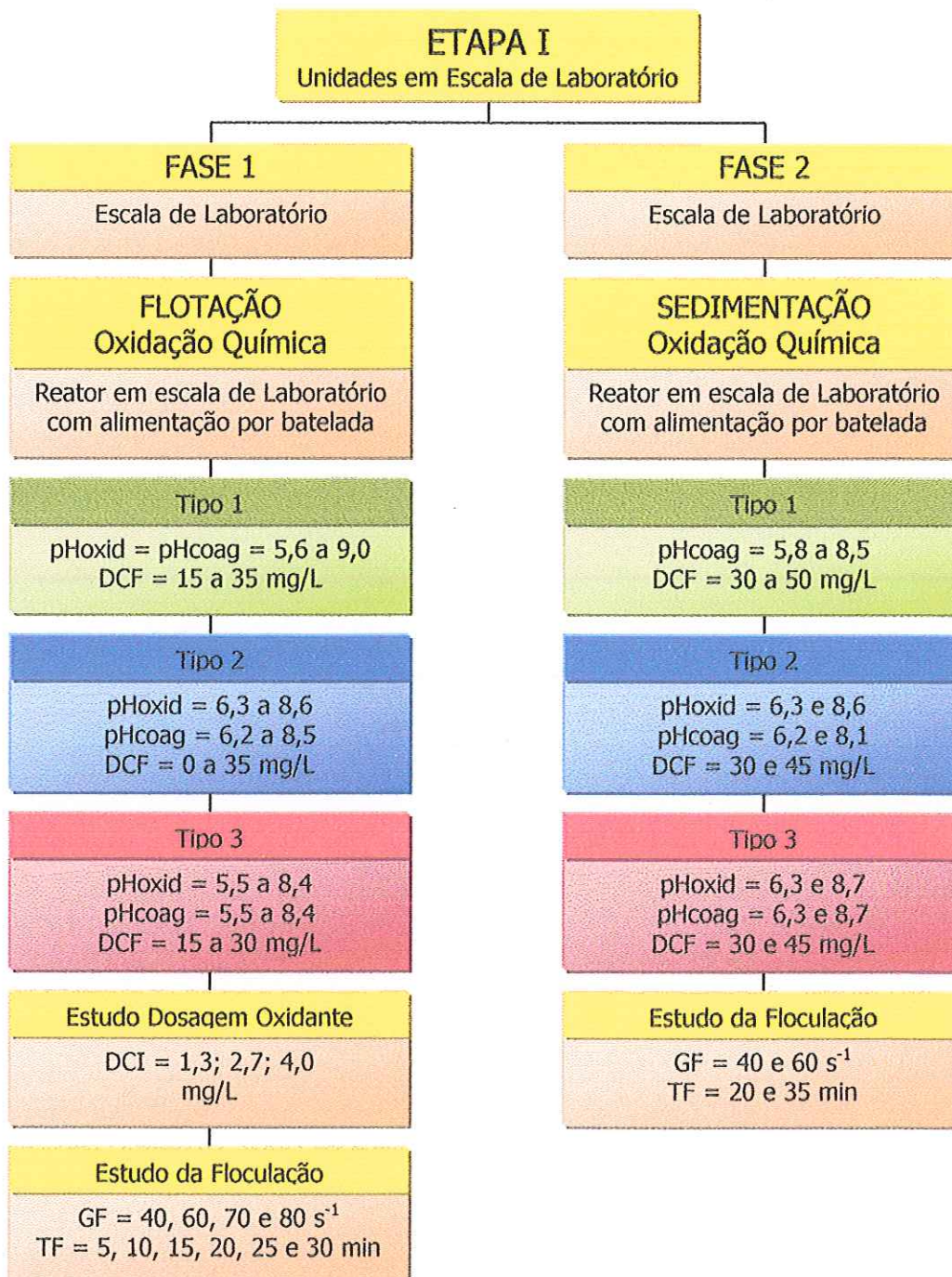


FIGURA 4.1 – Esquema ilustrativo das fases do estudo realizado em escala de laboratório (ETAPA I) utilizando equipamento de flotação e de sedimentação em colunas.

ETAPA II - dividida em 6 fases - compreendeu os ensaios realizados em unidade piloto de FAD de alta taxa. Para a realização dessa etapa de estudo foram necessários: projeto de reforma e aperfeiçoamento da instalação piloto de FAD de alta taxa, em acrílico, já existente na área de instalações de pesquisa de grande porte do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC – USP, com vazão máxima de  $0,8 \text{ m}^3/\text{h}$ , compra de materiais e acompanhamento das instalações elétricas e hidráulicas.

Foram projetados e construídos: sistema apropriado de agitação para dois reservatórios ( $15 \text{ m}^3$  cada) para preparo e armazenamento de água do estudo para ensaios na instalação piloto de FAD de alta taxa, módulo especial de alta taxa cuja concepção e geometria interna permite a obtenção de escoamento horizontal com baixo número de Reynolds.

Nessa etapa foram também instalados bombas, compressores, medidores de vazão, registros, aquecedores para controle da temperatura e outros.

A Fase 1 consistiu no estudo da eficiência da câmara de saturação.

Na Fase 2 estudou-se a influência do gradiente médio de velocidade na floculação ( $G_F$ ) no desempenho da unidade FAD de alta taxa. Para tanto, fixaram-se: aplicação do oxidante no momento da mistura rápida (procedimento Tipo 1 adotado nos ensaios da ETAPA I, com o Flotatest), dosagem de oxidante, dosagem de coagulante, pH de coagulação, taxa de aplicação superficial, tempo de floculação, razão de recirculação (ou seja, a quantidade de ar fornecida para a flotação e variou-se três vezes o valor do  $G_F$  (30/30/25; 60/60/60 e 80/80/80).

Para realização dos ensaios da Fase 3, fixou-se a aplicação do oxidante no momento da mistura rápida (procedimento Tipo 1 adotado nos ensaios das Fases 1 e 2, com o Flotatest), dosagem de oxidante, dosagem de coagulante e pH de coagulação. Variaram-se taxa de aplicação superficial, tempo de floculação e a razão de recirculação (ou seja, a quantidade de ar fornecida para a flotação). Nesta fase, foram estudados três valores de tempo de floculação (10, 15 e 20 minutos) e, para cada um deles, variaram-se taxa de aplicação superficial na unidade FAD de alta taxa (13 m/h – Fase 3a, 26 m/h – Fase 3b, 39 m/h – Fase 3c e 51 m/h – Fase 3d) e a quantidade de ar fornecida (5,7, 4,3 e 2,9 g de ar/ $\text{m}^3$  de água).

A Fase 4 consistiu na verificação da eficiência da FAD sem oxidação química (sem uso do hipoclorito de sódio) e na análise da eficiência da FAD com redução da dosagem de coagulante (25 e 20 mg/L).

A Fase 5 envolveu apenas alguns ensaios com unidade de filtração em areia no tratamento do efluente da FAD.

Na Fase 6 foi estimado o grau de supersaturação de ar presente na água em vários pontos da unidade piloto de FAD de alta taxa.

A Figura 4.2 ilustra as fases do estudo realizado em escala piloto (da ETAPA II) utilizando a unidade piloto de flotação por ar dissolvido de alta taxa.



---

A Fase 1 da ETAPA I forneceu alguns parâmetros que produziram os melhores resultados, como ensaios Tipo 1, dosagem de cloreto férrico (30 mg/L), dosagem de hipoclorito de sódio (2,7 mg/L) e faixa de gradiente médio de velocidade na floculação ( $G$  entre 60 e 80  $s^{-1}$ ). Tais parâmetros serviram como base para a execução da Fase 2 da ETAPA I e também para a ETAPA II.

Em todas as etapas do estudo foi utilizada água bruta proveniente do poço que abastece a EESC-USP acrescida de produtos químicos de modo a apresentar cor aparente em torno de 150 uC, turbidez em torno de 15 uT associada à concentrações de ferro em torno de 3,5 mg/L e de manganês em torno de 0,2 mg/L. Estes metais presentes na água de estudo tinham parte de suas concentrações complexadas com a matéria orgânica presente.

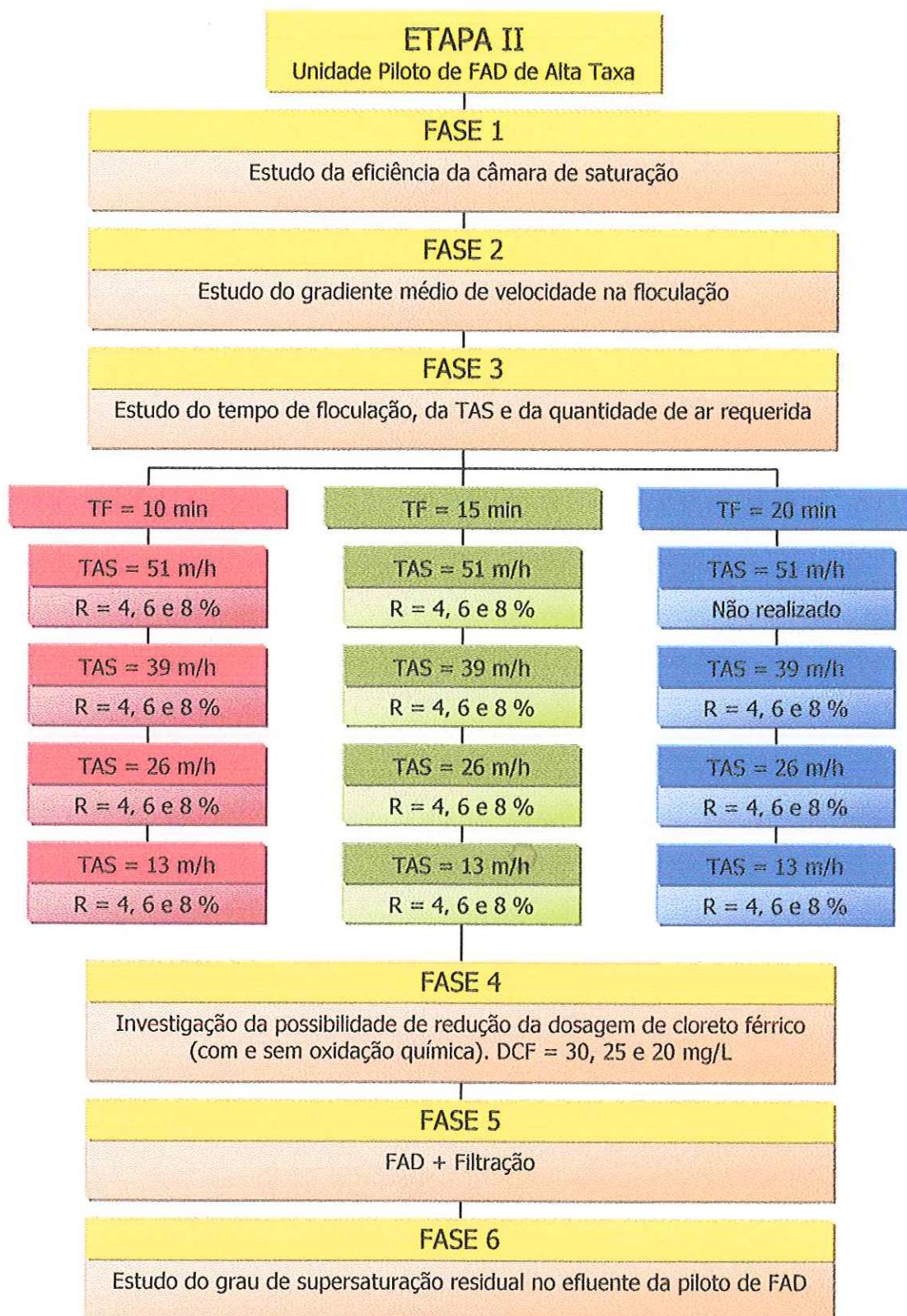


FIGURA 4.2 – Esquema ilustrativo das fases do estudo em escala piloto (ETAPA II).

## 4.2. CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA DE ESTUDO

A Tabela 4.1 apresenta as características da água de estudo, preparada a partir de água proveniente do poço profundo que abastece o campus da EESC - USP.

TABELA 4.1 – Características básicas da água do poço da EESC - USP

pH	Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)	T (°C)	Ferro (mg/L) D/ND	Manganês (mg/L) D/ND
6,8	0,3	> 2	24,5	0,48/nd	nd/nd

D: após digestão química, ND: sem digestão química, nd: não detectado.

Essa água foi alterada de modo a apresentar cor aparente em torno de 120 uC, turbidez em torno de 15 uT e concentrações de ferro em torno de 3,5 mg/L e manganês em torno de 0,2 mg/L. Estes metais presentes na água de estudo apresentaram-se com parte de suas concentrações complexadas com a matéria orgânica adicionada à água na forma de ácido húmico. Também foi adicionada caulinita à água do poço para se obter turbidez na água do estudo em torno de 15 uT. Foram utilizados: ácido húmico produzido pela Aldrich, caulinita produzida pela Fluka 60609, cloreto férrico P. A. da Synth para inserir  $Fe^{+3}$  à água, solução padrão de manganês da Hexis para inserir  $Mn^{+2}$  à água e carbonato de sódio anidro produzido pela Synth para controle do pH.

Para acrescentar turbidez à água foi utilizada metodologia anteriormente proposta (CAMPOS, 1980). A Tabela 4.2 apresenta as características da água do estudo.

TABELA 4.2 – Características básicas da água do estudo.

Ácido Húmico (mg/L)	Fe total (D) (mg/L)	Fe total (ND) (mg/L)	Mn total (D) (mg/L)	Mn total (ND) (mg/L)	Cor (uC)	Turbidez (uT)	Alcalinidade (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	T (°C)
5,0±0,2	3,40±0,30	1,60±0,30	0,25±0,10	0,20±0,10	120±40	15,1±5,0	20,0±3,0	25±1

D: após digestão química, ND: sem digestão química.

## 4.3. DESCRIÇÃO DAS INSTALAÇÕES UTILIZADAS NA PESQUISA

Para a execução da pesquisa foi utilizada instalação de flotação por ar dissolvido, Flotateste, em escala de laboratório, unidade piloto de FAD de alta taxa e unidade de filtração em areia.

O Flotateste e a unidade de filtração estão instalados no Laboratório Avançado de Tratamento de Águas Residuárias (LATAR) e unidade piloto nas dependências do laboratório de

Instalações Hidráulicas - Sanitárias, ambos pertencentes ao Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC - USP.

#### **4.3.1. Colunas de Flotação em Escala de Laboratório – Flotateste**

O Flotateste, equipamento utilizado para ensaios de flotação, em escala de laboratório e com alimentação por batelada, possui quatro colunas de flotação construídas em acrílico, independentes, cada qual com agitador removível com ajuste de rotação capaz de imprimir gradientes de velocidade em ampla escala de valores, dispõe também de pontos para tomada de amostras ao longo da altura das quatro colunas em acrílico. Estas colunas funcionam tanto como unidades de floculação como de flotação desde que, após a etapa de floculação, seja retirado do interior da coluna o agitador removível. Interligada às quatro colunas de flotação existe uma câmara de saturação pressurizada. Nesta unidade, é borbulhado ar comprimido à alta pressão, até que a mesma atinja o ponto de saturação para dadas temperatura e pressão de trabalho.

Estas colunas também podem ser utilizadas para realização de ensaios estáticos de coagulação/sedimentação desde que através de registros seja desativado o sistema de saturação pressurizado. Nesta investigação, o equipamento de Flotateste foi empregado para os ensaios de flotação e de sedimentação (colunas de flotação do sistema foram utilizadas também como colunas de sedimentação).

Antes da flotação propriamente dita, era realizado o processo de coagulação/floculação. A coagulação era executada no equipamento denominado "Jar-Test", com utilização do cloreto férrico, onde ocorria a mistura rápida.

Imediatamente após completada a mistura rápida, as amostras eram transportadas para as colunas do Flotateste, para floculação. Após o tempo requerido para este processo, as paletas promotoras da floculação eram retiradas das câmaras e a água, saturada com ar à pressão de  $450 \pm 10$  kPa e temperatura em torno de  $25^{\circ}\text{C}$ , era injetada na parte inferior da câmara. Esta água saturada de ar promovia a flotação dos flocos durante o tempo compatível com as velocidades de flotação estudadas. No tempo correspondente a estas velocidades, amostras eram retiradas.

No caso da sedimentação, a mistura rápida também ocorria no "Jar-Test" e, imediatamente após, as amostras eram transportadas para o Flotateste onde ocorria a floculação. Após o tempo de floculação requerido, as paletas eram retiradas e as colunas de flotação utilizadas como colunas de sedimentação. As amostras eram retiradas em diferentes tempos de sedimentação correspondentes às velocidades de sedimentação estudadas.

A Figura 4.3 apresenta uma vista geral do equipamento denominado Flotateste, em escala de laboratório.

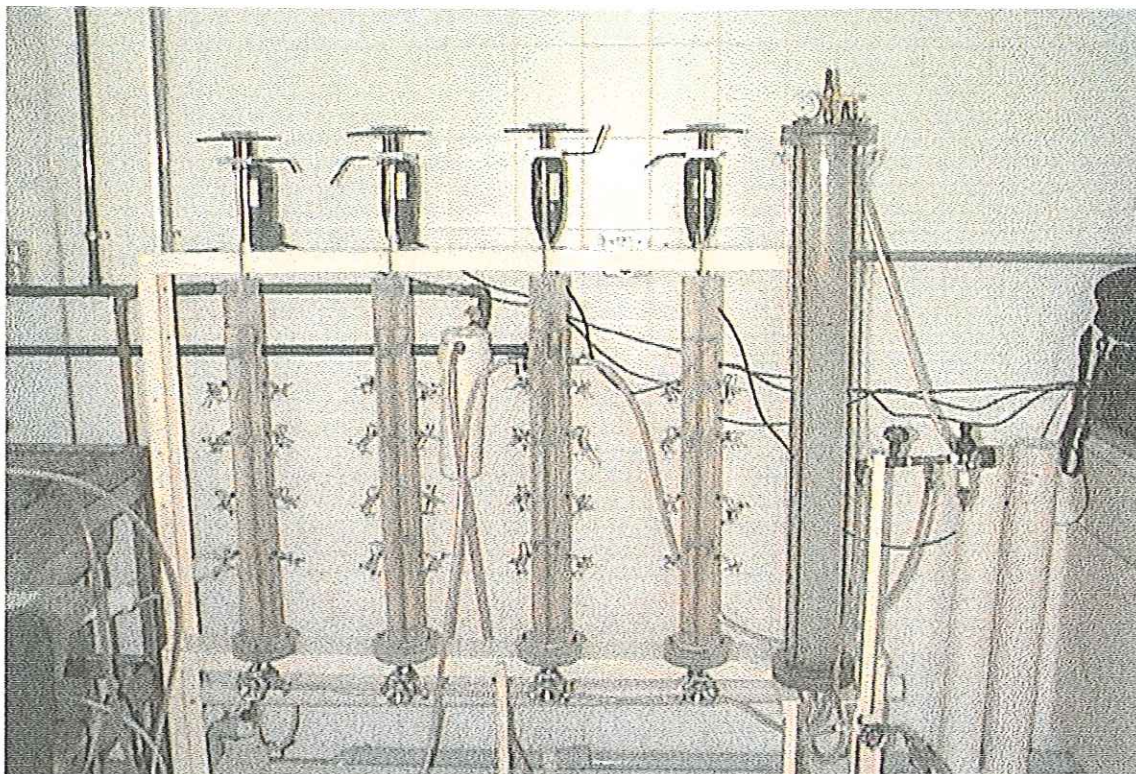


FIGURA 4.3 – Flotateste utilizado para os ensaios em escala de laboratório.  
Fonte: REALI (1991).

#### 4.3.2. Descrição da Instalação Piloto de FAD de Alta Taxa e Equipamentos Acessórios Utilizados

Para funcionamento eficiente da unidade piloto de FAD de alta taxa, foram necessários vários equipamentos acessórios.

##### 4.3.2.1. Descrição dos Principais Equipamentos Acessórios

A instalação piloto de flotação por ar dissolvido conta com os seguintes equipamentos acessórios principais:

- Dois reservatórios da Comazza de 15 m<sup>3</sup> cada;
- Duas bombas centrífugas Jacuzzi, Modelo 5DR75 – M, Potência ½ CV;
- Aquecedor Cumulus S. A., Modelo 8 litros GLP/Gás Liquefeito de Petróleo, Potência nominal KW(Kcal/min): 12,78(183,2);
- Duas Bombas dosadoras Wallace & Tierman (V<sub>máx</sub> = 34 L/h), Modelo G 20 50 MD, com motores da WEG Motores Ltda;
- Bomba dosadora eletromagnética de diafragma, LMI Milton Roy, Modelo P-163-361TI, Vazão máxima = 7,6 L/h, pressão máxima = 3,5 bar;
- Três agitadores com moto redutores ZM Macopema Indústria e Comércio Ltda, tipo MR-0, Cv a 1750 rpm = 0,25, Redução:15;
- Três galões com medidor volumétrico;

- Medidor de vazão Conaut (Krohne);
- Dois medidores de vazão Enginstrel/Engematic;
- Bomba Mark, Modelo XDI, motor indução monofásico 3520 rpm, CV=1/3;
- Bomba Jacuzzi 60 HZ, motor indução monofásico, Cv=1/2, 3490 rpm;
- Câmara de saturação;
- Compressor Schulz 10 pés<sup>3</sup>/min, 200 L, MSV 10 VL/200 profissional;
- Dois agitadores com motores de redução, ZM Macopema Indústria e Comércio Ltda, tipo MR-2, Cv a 1750 rpm = 0,26.

As Figuras 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9 apresentam fotografias de alguns destes equipamentos.



FIGURA 4.4 – Fotografia dos reservatórios (15 m<sup>3</sup> cada)

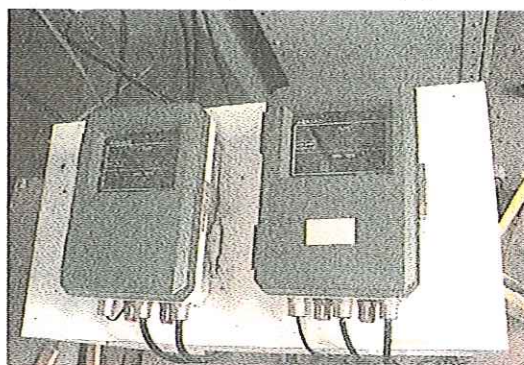


FIGURA 4.5 – Fotografia dos medidores de vazão



FIGURA 4.6 – Fotografia do aquecedor da CUMULUS



FIGURA 4.7 – Fotografia das bombas dosadoras e galões de produtos químicos com medidor volumétrico



FIGURA 4.8 – Fotografia da instalação da bomba de recalque e da câmara de saturação



FIGURA 4.9 – Fotografia com vista geral da instalação piloto, com ênfase na unidade de flotação de alta taxa e da câmara de saturação (à direita).

#### 4.3.2.2. Descrição Geral da Instalação e dos Principais Equipamentos Acessórios

A Figura 4.10 apresenta um fluxograma ilustrativo dos componentes da instalação piloto. Este fluxograma mostra que a água bruta de estudo era bombeada do poço do Campus da USP até dois reservatórios de 15 m<sup>3</sup> cada, instalados ao lado do Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas do SHS/EESC/USP. Nestes reservatórios, contendo agitadores em seu interior, eram inseridos os produtos químicos necessários para fornecer à água as características requeridas.

Para esta investigação, a água do estudo era transportada, por gravidade, até um reservatório de nível constante e com capacidade para 200 L (controlado por válvula de bóia) e bombeada (bomba centrífuga *Jacuzzi*, modelo 5DR75 - M) até a unidade piloto de FAD. A mistura rápida era realizada através de injetor acoplado à montante de um reator tubular construído de acordo com recomendações de HESPANHOL<sup>19</sup>, 1977, citado por DOMBROSKI, 1996.

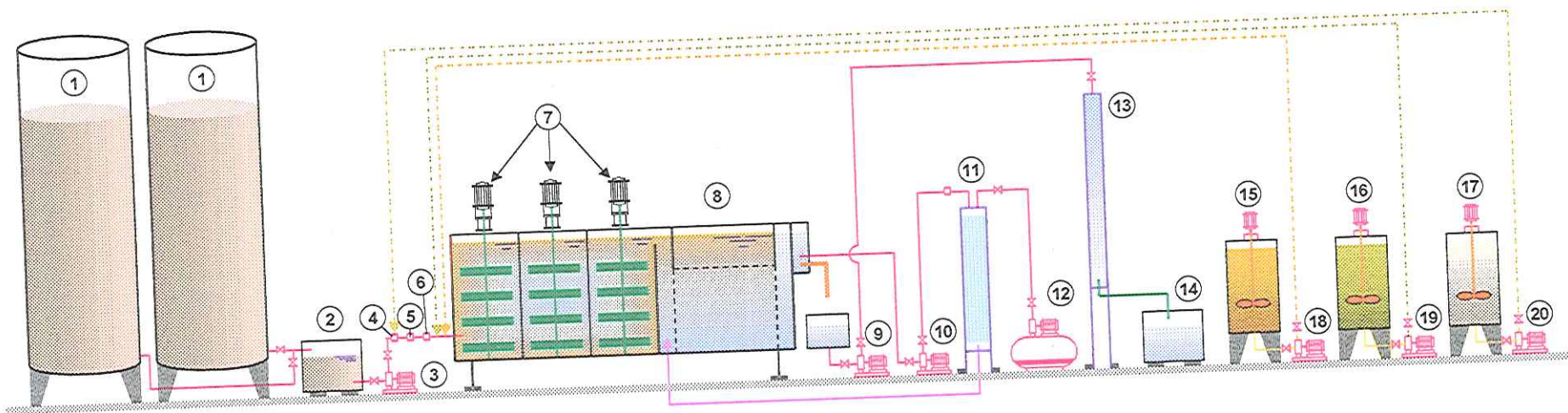
No ponto onde ocorria a mistura rápida, através de bomba dosadora (bomba dosadora *Wallace & Tierman*, modelo G 20 50 MD), era adicionado carbonato de sódio na dosagem requerida. Após o ponto de mistura rápida havia um aquecedor a gás de passagem direta (marca *CUMULUS*, modelo 8 litros GLP/Gás Liquefeito de Petróleo) para manter a temperatura da água na faixa de 25 °C. À jusante do aquecedor, foi instalado um medidor de vazão para controle da vazão de entrada. Após o medidor de vazão, havia na rede, mais dois pontos de aplicação de produtos químicos: o primeiro para aplicação de solução de cloreto férrico (0,22 kg de FeCl<sub>3</sub> em 400 mL da solução comercial diluído em 100 L) através de bomba dosadora (bomba dosadora *Wallace & Tierman*, modelo G 20 50 MD) e o segundo para aplicação de solução de hipoclorito de sódio (0,19 Kg de Cl<sub>2</sub> em 1,75 L diluído em 200 L) através de bomba dosadora (marca LMI *Milton Roy*, modelo P-163-361 TI).

Todos os produtos químicos eram dissolvidos em água do poço, em reservatórios com medidor volumétrico e continuamente agitados por agitadores de eixo vertical com paletas de aço inox impulsionados por moto-redutores (marca ZM *Macopema*).

Dos reservatórios, a água era encaminhada à unidade piloto de FAD, passando inicialmente pela unidade de mistura rápida, em seguida pelas unidades de floculação e, finalmente, pela unidade de flotação (FAD) de alta taxa. Na entrada da unidade de FAD, a água floculada era misturada à água da vazão de recirculação, sempre saturada à pressão de 450 ± 10 kPa e temperatura de 25 °C. A cada 15 minutos, após entrar em equilíbrio, eram coletadas amostras clarificadas por flotação.

<sup>19</sup> HESPANHOL, I. (1977). Mistura - grades e reatores tubulares; floculação - o uso de polieletrólitos. Revista DAE, n.112, p. 83 - 92

FIGURA 4.10 – Esquema ilustrativo das instalações utilizadas na pesquisa.



1- Reservatório <i>Comazza</i> com capacidade de 15 m <sup>3</sup>	11- Câmara de saturação
2- Reservatório de nível constante de 200 L	12- Compressor de ar <i>Schulz</i> modelo MSV 10 VL/200
3- Bomba centrífuga <i>Jacuzzi</i> modelo 5DR75-M	13- Filtro em areia
4- Unidade de mistura rápida – carbonato de sódio	14- Reservatório com água clarificada – Flotação + Filtração
5- Aquecedor a gás <i>Cumulus</i> modelo 8 L GLP	15- Tanque com solução de hipoclorito de sódio
6- Medidor de vazão <i>Enginstrel/Engematic</i>	16- Tanque com solução de cloreto férrico
7- Unidades de floculação	17- Tanque com solução de carbonato de sódio
8- Unidade de flotação de alta taxa	18- Bomba dosadora <i>LMI Milton Roy</i> modelo P 163 361 TI
9- Bomba dosadora <i>Master Flex</i> modelo 7520-35	19- Bomba dosadora <i>Wallace &amp; Tierman</i> modelo G 2050 MD
10- Bomba <i>Jacuzzi</i> modelo 60 Hz	20- Bomba dosadora <i>Wallace &amp; Tierman</i> modelo G 2050 MD



#### 4.3.2.3. Descrição da Unidade Piloto de FAD de Alta Taxa

A instalação piloto de flotação de alta taxa com escoamento contínuo é constituída de uma unidade de mistura rápida tipo tubular, uma unidade de floculação mecanizada com três compartimentos em série, associada a uma unidade de flotação de alta taxa. Esta última unidade contém em seu interior módulo especial com características construtivas que conferem à água escoamento horizontal com baixos números de Reynolds, conforme Figuras 4.11 e 4.12.

A unidade de floculação pode ser usada com uma, duas ou três câmaras em série. Cada uma destas câmaras possui entrada independente de água coagulada controlada por registro de esfera. A passagem da água floculada de uma câmara para outra se dá através de uma abertura com dimensões de 5 cm por 5 cm.

Os agitadores do sistema de floculação possuem controles de rotação independentes e são do tipo de eixo vertical com paletas paralelas ao eixo. Cada agitador possui quatro braços e duas paletas por braço.

Esta unidade de flotação possui, instalado junto à sua entrada, um dispositivo de despressurização da vazão de recirculação proveniente da câmara de saturação. A região situada logo à jusante deste ponto é chamada zona de contato. Zona de contato é a região onde ocorre encontro entre os flocos e as microbolhas de ar geradas após a despressurização da vazão de recirculação. Na instalação em questão, o dispositivo de despressurização é constituído de registro de agulha ( $\varnothing 3/8''$ ). Após a zona de contato encontra-se a zona de separação, região onde ocorre a flotação propriamente dita. No interior da zona de clarificação por flotação foi instalado um módulo especial contendo placas planas paralelas inclinadas  $60^\circ$  com a horizontal, com as seguintes dimensões: largura total = 67,0 cm, altura total = 50,0 cm, comprimento total = 51,0 cm, espaçamento entre placas = 3,5 cm, número de lamelas = 1. A inserção de tal módulo na zona de clarificação permitiu a obtenção de escoamento horizontal associado a baixos números de Reynolds. Acima da zona de flotação, situa-se a zona de acumulação de lodo. Os flocos removidos permanecem na superfície da zona de acumulação formando uma camada de lodo. De tempos em tempos, esta camada de lodo deve ser removida e encaminhada para fora da unidade. No presente estudo, a camada de lodo permanecia até o final de cada ensaio, quando era promovida a limpeza do reator.

Parte da água clarificada na unidade de flotação era recalçada para a câmara de saturação por uma bomba centrífuga multi-estágio de alta pressão (Bomba *Jacuzzi* 60 Hz) e monitorada através de medidor de vazão (*Enginstrel/Engematic*). A câmara de saturação era do tipo com recheio, sendo este constituído de anéis de PVC com diâmetro de 30 mm e comprimento de 2 cm, conforme proposto por REALI & CAMPOS (1992). Na parte superior da câmara era injetado ar comprimido de tal maneira que o recheio ficasse envolto por ar. Assim, ao passar pelo recheio, a água submetida à alta pressão era saturada com ar (Figura 4.13).



FIGURA 4.11 – Fotografia das instalações da unidade piloto de FAD de alta taxa com módulo.

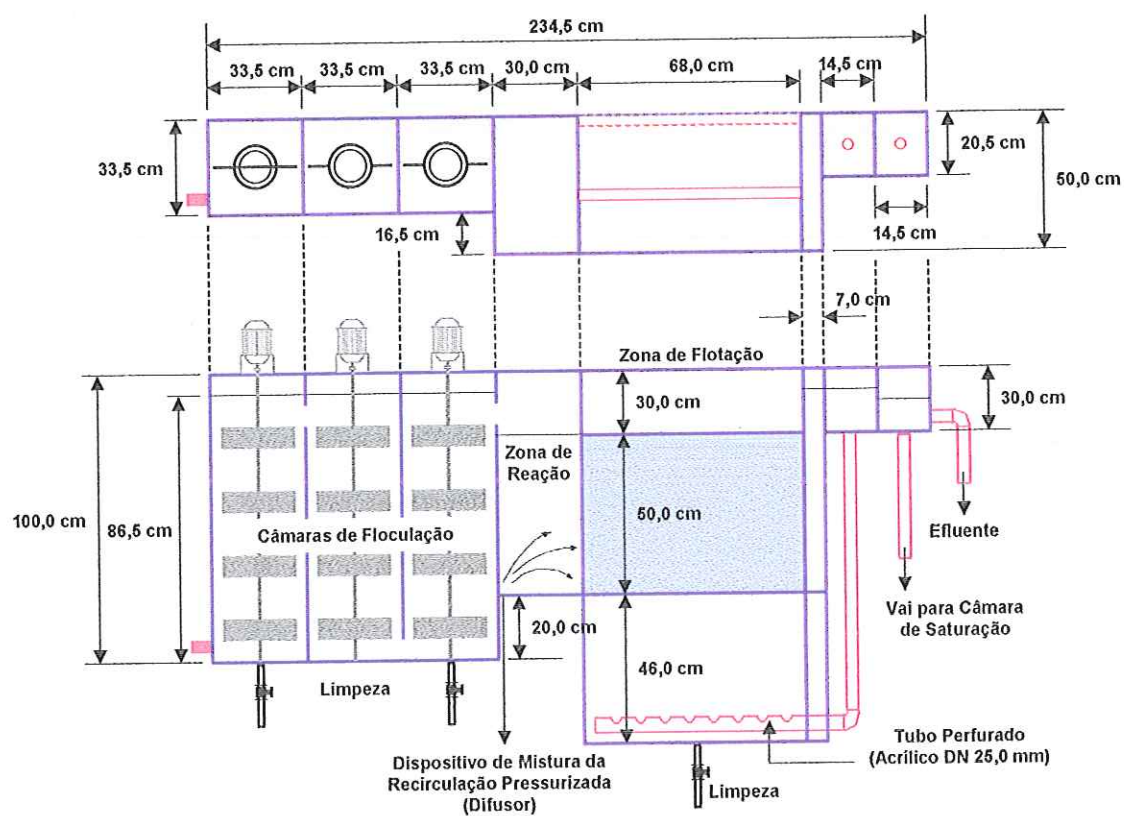


FIGURA 4.12 – Esquema da instalação piloto de flotação por ar dissolvido de alta taxa com módulo.

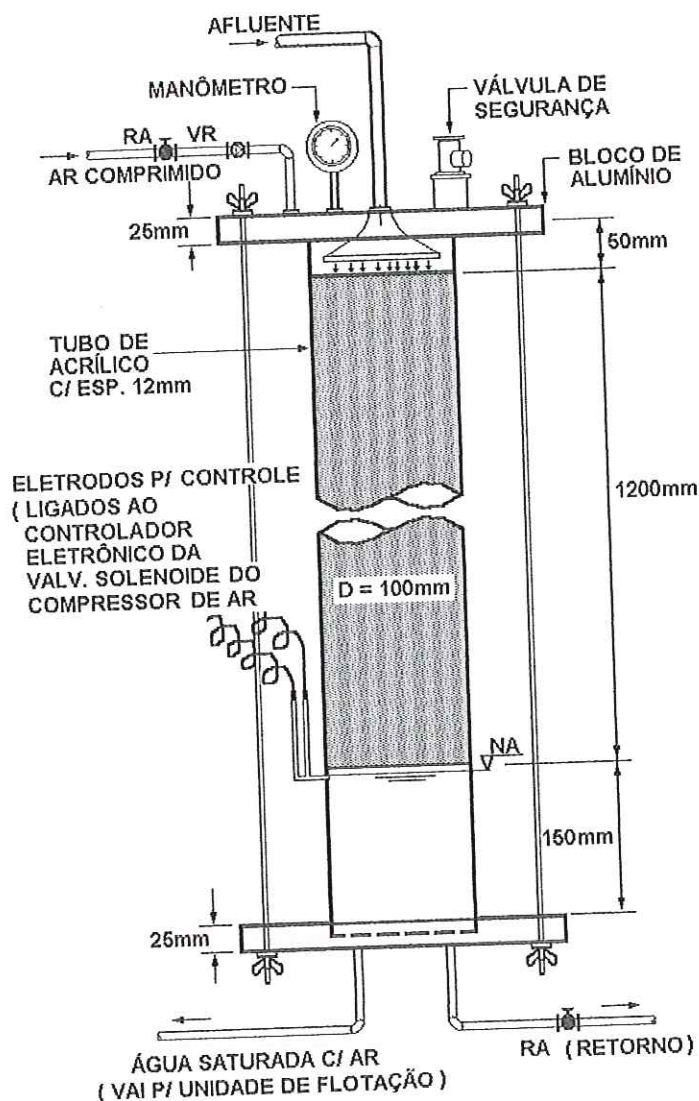


FIGURA 4.13 – Câmara de saturação do sistema de flotação.

Fonte: REALI (1991)

#### 4.3.3. Descrição da Unidade de Filtração Rápida Descendente com Leito de Areia

Características do filtro de areia utilizado, em escala de laboratório:

- Altura total da unidade: 2.770 mm;
- Altura do leito filtrante: 1.000 mm;
- Altura da camada suporte: 250 mm;
- Diâmetro da coluna de filtração: 19 mm;
- Leito filtrante: leito constituído de areia com coeficiente de uniformidade de 1,15 mm, tamanho efetivo ( $T_e$ ) igual a 0,87 mm;
- Taxa de filtração: entre  $200 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$  e  $250 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$

A distribuição granulométrica da areia utilizada no leito filtrante está apresentada na Figura 4.14.

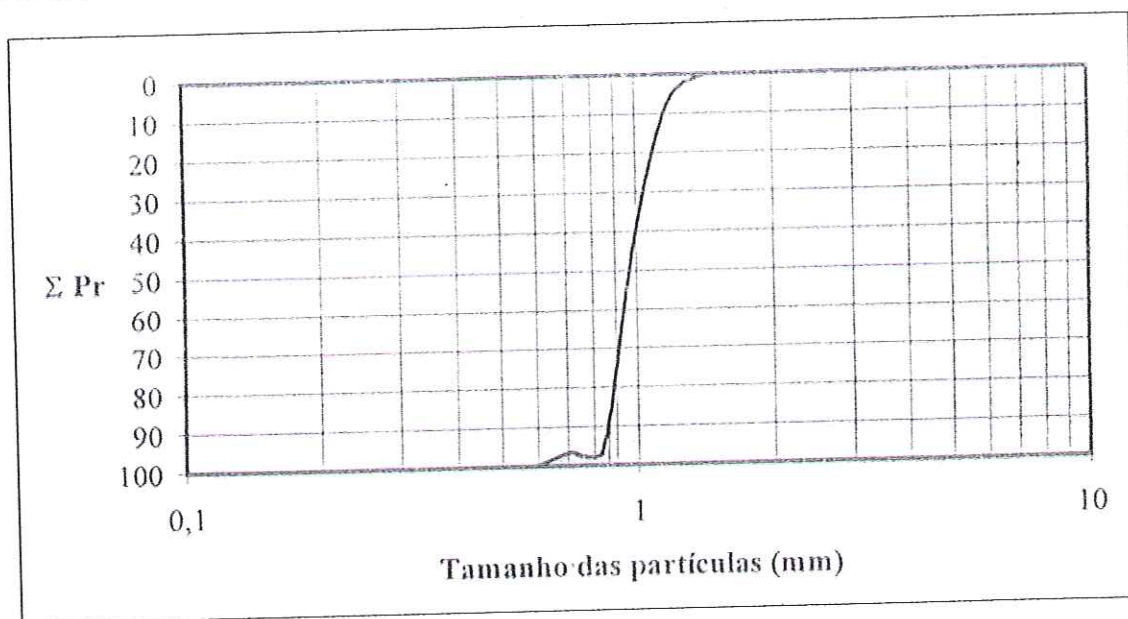


FIGURA 4.14 – Distribuição granulométrica da areia utilizada como meio filtrante.

Fonte: PORTO (2001)

A camada suporte da areia é formada por três faixas de tamanho de pedregulhos, assim dispostos: a camada com material mais fino ( $\varnothing$  2,4 a  $\varnothing$  1,4 mm) encontra-se em contato com a areia e possui altura de 90 mm; a camada com material médio ( $\varnothing$  4,8 a  $\varnothing$  2,4 mm) está logo abaixo do mais fino e possui altura de 80 mm e a camada com material mais grosso ( $\varnothing$  6,3 a  $\varnothing$  4,8 mm) encontra-se logo abaixo do médio e possui altura de 80 mm. A Figura 4.15 apresenta o esquema anteriormente descrito. As Figuras 4.16 e 4.17 apresentam, respectivamente, o esquema e a fotografia do filtro rápido descendente com leito de areia utilizado.

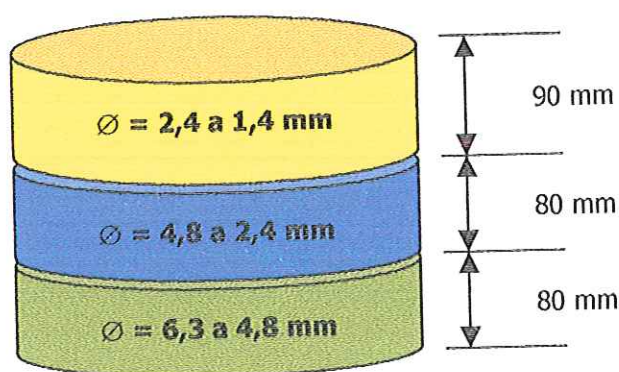


FIGURA 4.15 – Esquema ilustrativo da camada suporte do meio filtrante.

Fonte: PORTO (2001)

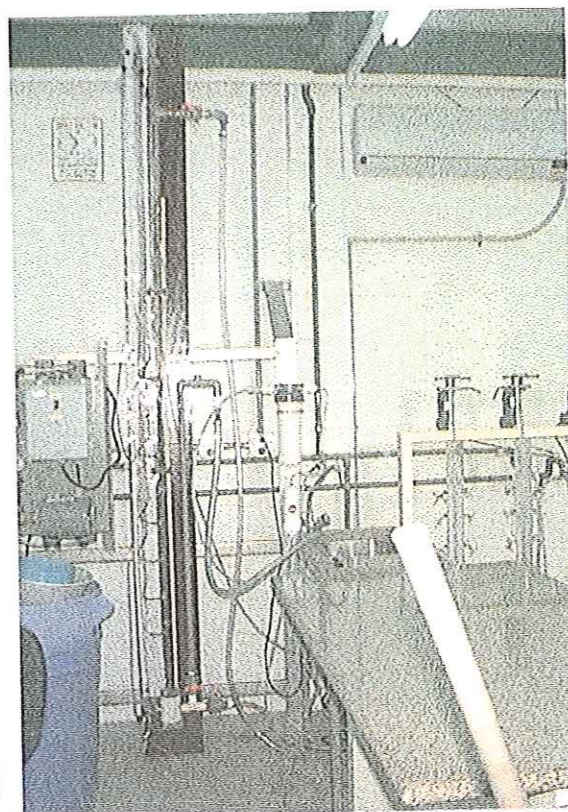
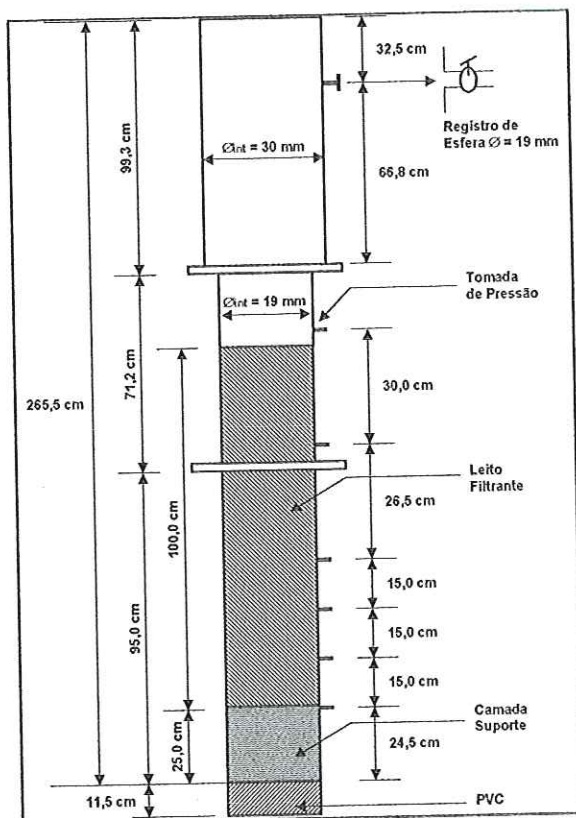


FIGURA 4.16 – Esquema ilustrativo do filtro de areia em escala de laboratório. FIGURA 4.17 – Fotografia do filtro de areia.

Fonte: PORTO (2001)

A unidade, em escala de laboratório, de filtração em areia foi utilizada para o tratamento do efluente da FAD. O efluente da FAD era bombeado para a parte superior do filtro por meio de bomba dosadora (marca *Máster Flex*, modelo n. 7520-35) com vazão entre 2,36 L/h e 2,95 L/h, vazão esta que garantia a permanência da taxa de aplicação de 10 m/h. Após percorrer todo o leito filtrante, o efluente filtrado era retirado pela parte inferior do filtro. Amostras coletadas a cada hora eram filtradas durante 7 horas.

Uma pequena quantidade da areia utilizada no leito filtrante foi colada na parede interna da coluna de filtração. Esta fina camada de areia fornece certa rugosidade à parede interna do filtro, minimizando o risco e aparecimento de caminhos preferenciais na parede do filtro.

A limpeza do filtro era efetuada antes do início de cada ensaio através da retrolavagem com água e ar. Primeiramente, era injetada água pela parte inferior do filtro, por baixo da camada suporte, em seguida, injetava-se ar. Esta vazão de água e ar era controlada para evitar perda de areia da camada filtrante e, ao mesmo tempo, produzir expansão do leito e eliminação de partículas que estivessem presas no leito filtrante. Após esta etapa de limpeza, que durava cerca de 10 minutos, o ar era desligado, mas a água permanecia por mais 10 minutos. O importante papel desta etapa é a eliminação do ar da camada filtrante.

#### 4.4. PROCEDIMENTOS ADOTADOS E PROGRAMAÇÃO DOS ENSAIOS

O trabalho foi dividido em duas etapas:

A ETAPA I compreendeu ensaios de flotação associada à oxidação química e de sedimentação associada à oxidação química. Estes ensaios foram realizados utilizando-se equipamento em escala de laboratório, Flotateste.

A ETAPA II envolveu a realização de ensaios utilizando-se a unidade piloto de flotação por ar dissolvido de alta taxa. Para tanto, foram necessários: projeto de reforma e aperfeiçoamento da instalação piloto de FAD de alta taxa existente, compra de materiais e acompanhamento das instalações elétricas e hidráulicas, calibração e teste de equipamentos de suporte da pesquisa (medidores de vazão, equipamentos de preparo e dosagem de produtos químicos, aquecedor, bombas dosadoras, bombas centrífugas).

A seguir, são descritos, de maneira detalhada, os procedimentos utilizados para a realização das duas etapas de estudo.

##### 4.4.1. Procedimentos Adotados para Ensaios de Flotação e Sedimentação em Escala de Laboratório (ETAPA I)

Na ETAPA I foi avaliada a eficiência de remoção de ferro e manganês em dois sistemas distintos, o primeiro associando FAD à oxidação química (Fase 1 de estudo) e o segundo associando sedimentação à oxidação química (Fase 2 de estudo). Nas duas fases de estudo utilizou-se cloreto férrico como coagulante, hipoclorito de sódio como oxidante, carbonato de sódio para controle do pH e o Flotateste.

Para as duas fases de estudo, os ensaios foram divididos em três tipos: Tipo 1, 2 e 3.

Na Fase 1 de estudo, os ensaios Tipo 1 consistiram na aplicação simultânea do oxidante com o coagulante, no momento da mistura rápida. Fixaram-se as seguintes variáveis: dosagem de oxidante (2,7 mg/L de cloro na forma de hipoclorito de sódio), gradiente médio de velocidade de mistura rápida/dispersão do oxidante ( $G_{MR}=800 \text{ s}^{-1}$ ), tempo de dispersão do oxidante (5 s), tempo de mistura rápida (20 s), gradiente médio de velocidade de floculação ( $G_F=60 \text{ s}^{-1}$ ), tempo médio de floculação (20 minutos), razão de recirculação (10% em volume), pressão de saturação (450 kPa) e temperatura (25 °C). Variaram-se a dosagem de cloreto férrico (DCF) e o pH de coagulação. A Figura 4.18 mostra um fluxograma ilustrativo do conjunto de ensaios Tipo 1.

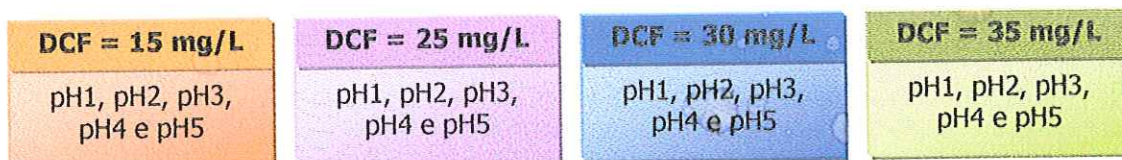


FIGURA 4.18 – Fluxograma ilustrativo dos ensaios Tipo 1 (aplicação do oxidante junto com o coagulante) efetuados durante a Fase 1 da ETAPA I.

Nesta mesma fase foram feitos os ensaios Tipo 2, nos quais o oxidante foi aplicado 5 minutos antes da aplicação do coagulante. Fixaram-se as seguintes variáveis: dosagem de oxidante (2,7 mg/L de cloro na forma de hipoclorito de sódio), gradiente médio de velocidade de dispersão do oxidante ( $G_{MR} = 150 \text{ s}^{-1}$ ), gradiente médio de mistura rápida ( $G_{MR} = 800 \text{ s}^{-1}$ ), tempo de dispersão do oxidante (5 min), tempo de mistura rápida (20 s), gradiente médio de velocidade de floculação ( $G_F = 60 \text{ s}^{-1}$ ), tempo médio de floculação (20 min), razão de recirculação (10% em volume), pressão de saturação (450 kPa) e temperatura (25 °C). Foram variados a dosagem de cloreto férrico (DCF) e o pH de coagulação. A Figura 4.19 mostra um fluxograma ilustrativo do conjunto de ensaios Tipo 2.

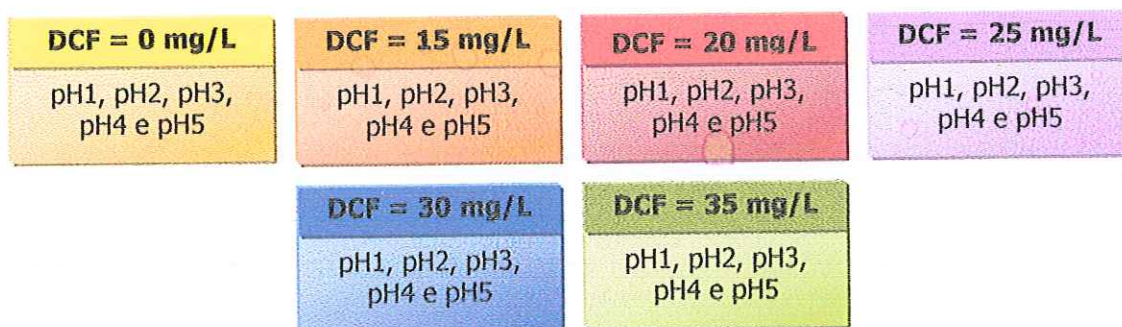


FIGURA 4.19 – Fluxograma ilustrativo dos ensaios Tipo 2 (aplicação do oxidante antes do coagulante) efetuados durante a Fase 1 da ETAPA I.

Os ensaios referentes ao Tipo 3 consistiram na aplicação do oxidante após pré-clarificação por flotação. Após serem coletadas amostras referentes à velocidade de 12 cm/min, elas foram submetidas à oxidação com hipoclorito de sódio e tempo de oxidação durante 10 minutos. As amostras foram filtradas com papel de filtro Whatman 40 e a seguir foram realizadas análises de cor, turbidez, concentrações de ferro e manganês. A Figura 4.20 apresenta um fluxograma ilustrativo do conjunto de ensaios Tipo 3.

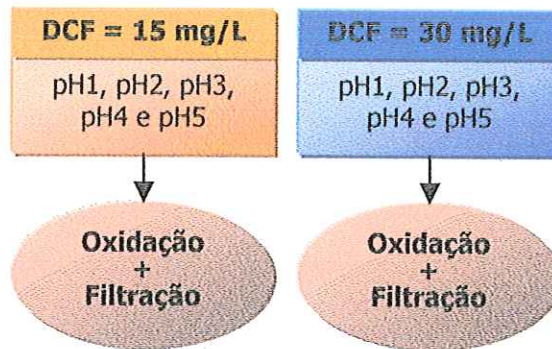


FIGURA 4.20 – Fluxograma ilustrativo dos ensaios Tipo 3 (aplicação do oxidante após pré-clarificação por FAD) efetuados durante a Fase 1 da ETAPA I.

Em seguida, analisou-se a eficiência do processo e, portanto, variou-se a dosagem de oxidante (hipoclorito de sódio) para os ensaios Tipo 1, 2 e 3. Para isto, fixou-se: dosagem de coagulante (30 mg/L), gradiente médio de velocidade de mistura rápida/dispersão do oxidante ( $G_{MR} = 800 \text{ s}^{-1}$ ), tempo de dispersão do oxidante (5 s), tempo de mistura rápida (20 s), gradiente médio de velocidade de floculação ( $G_F = 60 \text{ s}^{-1}$ ), tempo médio de floculação (20 min), razão de recirculação (10% em volume), pressão de saturação (450 kPa) e temperatura (25 °C), para ensaios Tipo 1. Para ensaios Tipo 2, gradiente médio de velocidade de dispersão do oxidante ( $G_{MR} = 150 \text{ s}^{-1}$ ) e tempo de dispersão do oxidante de 5 min. Variou-se a dosagem de oxidante em 1,3, 2,7 e 4,0 mg/L. A Figura 4.21 apresenta um fluxograma ilustrativo do conjunto de ensaios para investigação da dosagem de oxidante.

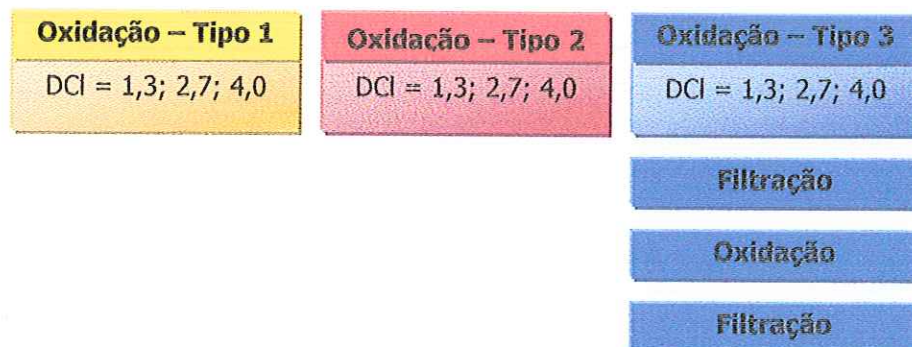


FIGURA 4.21 – Fluxograma ilustrativo dos ensaios para investigação da dosagem de oxidante efetuados durante a Fase 1 da ETAPA I.

Após estes ensaios, estudou-se a floculação visando a FAD. Foram estudados os parâmetros gradiente médio de velocidade na floculação ( $G_F$ ) e tempo médio de floculação ( $T_F$ ). Para tanto, fixaram-se os ensaios Tipo 1 (aplicação do oxidante no momento da mistura rápida), dosagem de oxidante (2,7 mg/L), dosagem de cloreto férrico (30 mg/L), pH de coagulação (pH = 6,2), gradiente médio de velocidade de mistura rápida/dispersão do oxidante ( $G_{MR} = 800 \text{ s}^{-1}$ ), tempo de dispersão do oxidante (5 s), tempo de mistura rápida (20 s), razão de recirculação (10% em volume), pressão de saturação (450 kPa) e temperatura (25 °C).



Variou-se o  $G_F$  (40, 60, 70 e  $80 \text{ s}^{-1}$ ) e também  $T_F$  (5, 10, 15, 20, 25 e 30 minutos). A Figura 4.22 a seguir apresenta um fluxograma ilustrativo do conjunto de ensaios para investigação da floculação.



FIGURA 4.22 – Fluxograma ilustrativo dos ensaios para investigação dos parâmetros tempo de floculação e gradiente médio de velocidade na floculação, efetuados na Fase 1 da ETAPA I.

Na Fase 2 da ETAPA I avaliou-se a eficiência da sedimentação associada à oxidação química. Foi utilizado o cloreto férrico como coagulante, hipoclorito de sódio como oxidante e carbonato de sódio para controle do pH. Os ensaios também foram divididos em três tipos. O Tipo 1 consistiu na aplicação do oxidante junto com o coagulante, no momento da mistura rápida. Fixaram-se: dosagem de oxidante (2,7 mg/L de cloro na forma de hipoclorito de sódio), dosagem de coagulante (30 mg/L), gradiente médio de velocidade de mistura rápida/dispersão do oxidante ( $G_{MR} = 800 \text{ s}^{-1}$ ), tempo de dispersão do oxidante (5 s), tempo de mistura rápida (20 s), gradiente médio de velocidade de floculação ( $G_F = 40/60 \text{ s}^{-1}$ ), tempo médio de floculação (20/35 min). Variou-se o pH de coagulação. Após esses ensaios, ainda utilizando os ensaios Tipo 1, selecionou-se o valor de pH de 6,2, o gradiente médio de floculação de  $40 \text{ s}^{-1}$  e o tempo médio de floculação de 35 minutos e variou-se a dosagem de cloreto férrico com filtração em papel de filtro Whatman 40, na seqüência. A Figura 4.23 a seguir apresenta um fluxograma ilustrativo do conjunto de ensaios Tipo 1.

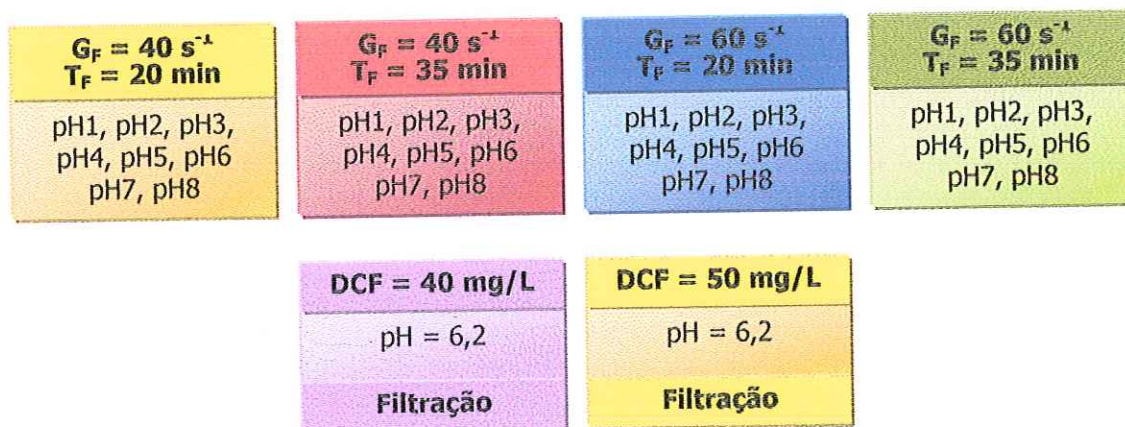


FIGURA 4.23 – Fluxograma ilustrativo do conjunto de ensaios Tipo 1, efetuados durante a Fase 2 da ETAPA I.

Nesta mesma fase foram feitos os ensaios Tipo 2, nos quais o oxidante foi aplicado 5 minutos antes da aplicação do coagulante. Fixaram-se as seguintes variáveis: dosagem de oxidante (2,7 mg/L de cloro na forma de hipoclorito de sódio), gradiente médio de velocidade

de dispersão do oxidante ( $G_{MR} = 150 \text{ s}^{-1}$ ), gradiente médio de mistura rápida ( $G_{MR} = 800 \text{ s}^{-1}$ ), tempo de dispersão do oxidante (5 min), tempo de mistura rápida (20 s), gradiente médio de velocidade de floculação ( $G_F = 40 \text{ s}^{-1}$ ), tempo médio de floculação (35 min) e temperatura (25 °C). Foram variados a dosagem de cloreto férrico (DCF) e o pH de coagulação que apresentaram os melhores resultados nos ensaios Tipo 1. Na Figura 4.24 é mostrado um fluxograma ilustrativo do conjunto de ensaios Tipo 2.

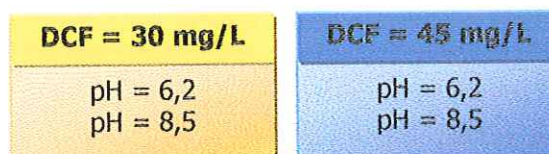


FIGURA 4.24 – Fluxograma ilustrativo do conjunto de ensaios Tipo 2, efetuados durante a Fase 2 da ETAPA I.

Os ensaios referentes ao Tipo 3 consistiram na aplicação do oxidante após pré-clarificação por flotação. Após serem coletadas amostras referentes à velocidade de 12 cm/min, elas foram submetidas à oxidação com hipoclorito de sódio e tempo de oxidação durante 10 minutos. As amostras foram filtradas com papel de filtro Whatman 40 e, a seguir foram realizadas análises de cor, turbidez, concentrações de ferro e manganês. A Figura 4.25 apresenta um fluxograma ilustrativo do conjunto de ensaios Tipo 3.

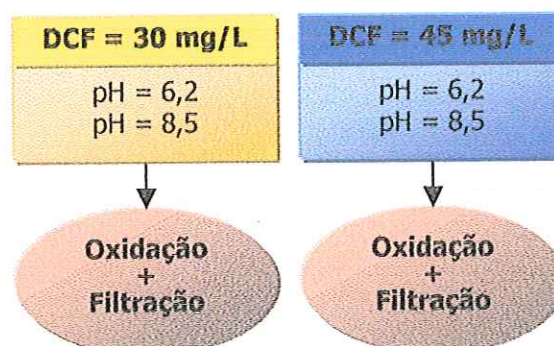


FIGURA 4.25 – Fluxograma ilustrativo do conjunto de ensaios Tipo 3, efetuados durante a Fase 2 da ETAPA I.

#### 4.4.2. Procedimentos Adotados e Programação de Ensaios Realizados com a Instalação Piloto de Flotação de Alta Taxa (ETAPA II)

A ETAPA II envolveu ensaios com a unidade piloto de FAD de alta taxa e foi dividida em 6 fases.

Para a realização desta etapa foi preciso, inicialmente, verificação detalhada do estado da unidade piloto de FAD, em acrílico, com vazão máxima de  $0,8 \text{ m}^3/\text{h}$  para, posteriormente, esquematizar todo o projeto de reforma. Também se fez necessário estudo detalhado das

poucas instalações hidráulicas existentes para posterior projeto e compra de material para as demais instalações hidráulicas e elétricas.

Foi projetado e construído sistema apropriado de agitação para os reservatórios de preparo e armazenamento de água de estudo para os ensaios com a instalação piloto de FAD de alta taxa. Também houve projeto e acompanhamento da instalação de novo módulo especial de alta taxa, cuja concepção e geometria interna permitem a obtenção de escoamento horizontal com baixo número de Reynolds, além da instalação de bombas, compressores, medidores de vazão, registros, aquecedores para controle de temperatura e outros.

#### 4.4.2.1. Procedimentos Adotados para Ensaio de Estudo da Eficiência da Câmara de Saturação (Fase 1 da ETAPA II)

Para determinação da capacidade de saturação ( $S_{CS}$ ) da câmara de saturação em estudo, utilizou-se a metodologia desenvolvida por REALI (1991). Tal metodologia preconiza a realização de ensaios específicos, com a câmara de saturação, para obtenção da capacidade de saturação em função da pressão na câmara e da temperatura da água. O procedimento detalhado encontra-se disponível na tese de doutorado de REALI (1991).

#### 4.4.2.2. Procedimentos Adotados para Ensaio da Fase 2 da ETAPA II

A Fase 2 consistiu no estudo do gradiente médio de floculação ( $G_F$ ) e, para tanto, fixaram-se: dosagem de oxidante (2,7 mg/L), dosagem de coagulante (30 mg/L), pH de coagulação (pH=6,2), tempo médio de floculação (20 minutos), taxa de aplicação superficial (13 m/h), pressão de saturação (450 kPa) e temperatura (25 °C). Variou-se o  $G_F$  e também a porcentagem de recirculação em relação à vazão afluyente (R). A Figura 4.26 mostra um fluxograma ilustrativo do conjunto de ensaios da Fase 2.

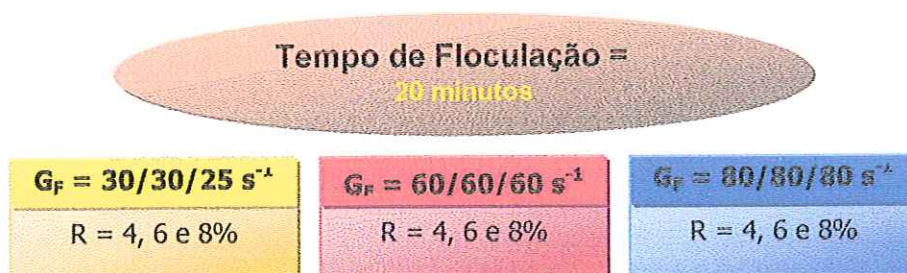


FIGURA 4.26 – Fluxograma ilustrativo do conjunto de ensaios efetuados durante a Fase 2 da ETAPA II.

#### 4.4.2.3. Procedimentos Adotados para Ensaio da Fase 3 da ETAPA II

A Fase 3 da ETAPA II foi dividida em quatro partes: Fase 3a, Fase 3b, Fase 3c e Fase 3d.

Para a realização da Fase 3 foram selecionados os ensaios Tipo 1 (aplicação do coagulante e do oxidante no momento da mistura rápida), fixadas: dosagem de oxidante (2,7 mg/L), dosagem de coagulante (30 mg/L), pH de coagulação (pH=6,2), gradiente médio de velocidade de floculação ( $G_f=60/60/60 \text{ s}^{-1}$ ), pressão de saturação (450 kPa) e temperatura (25 °C). Foram variados: tempo de floculação, taxa de aplicação superficial na unidade de FAD e a porcentagem de recirculação em relação à vazão afluyente (relacionada à quantidade de ar fornecida para a flotação). Na Figura 4.27 é mostrado um fluxograma ilustrativo do conjunto de ensaios da Fase 3.

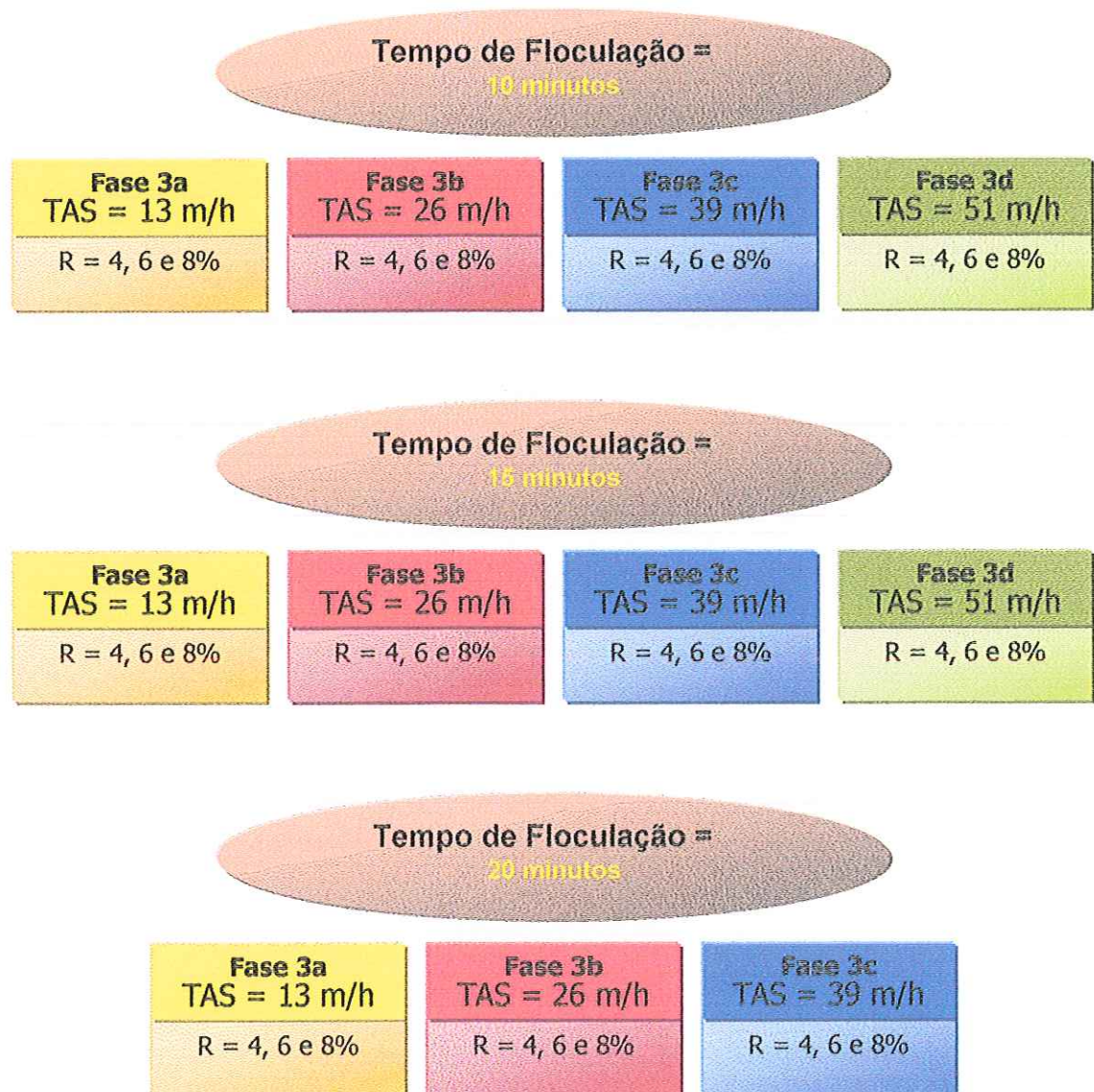


FIGURA 4.27 – Fluxograma ilustrativo do conjunto de ensaios efetuados durante a Fase 3 da ETAPA II.

Para a realização desses ensaios, fez-se necessário calcular alguns parâmetros como descritos a seguir.

O cálculo da vazão de entrada ( $Q_E$ ), nos floculadores, foi efetuado em função do tempo de floculação requerido. Como o volume era constante:

$$Q_E = V / T_F \quad (12)$$

Em que:

$V$  : volume dos floculadores

$T_F$  : tempo de floculação

Na entrada da unidade de FAD, a água floculada era misturada à água da vazão de recirculação ( $Q_R$ ). Portanto, a vazão de flotação ( $Q_F$ ) é dada por:

$$Q_F = Q_E + Q_R \quad (13)$$

A taxa de aplicação superficial aparente foi calculada em função da área entre placas do módulo instalado no flotador:

$$TAS_{ap} = (Q_E + Q_R) / A_{entre\ placas} \quad (14)$$

Para determinados valores de taxa de aplicação superficial, era necessário descartar uma parte da água floculada através de uma bomba *MARK* modelo XDI e medidor de vazão *CONAUT*, ambos instalados à saída do floculador.

O cálculo do número de Reynolds foi realizado da seguinte forma:

$$Rey = (4 \cdot Rh \cdot V) / \nu \quad (15)$$

em que:

$Rh$  : raio hidráulico:  $Rh = e/2$ ;

$e$  : espaçamento entre placas;

$V$  : velocidade entre placas:  $V = (Q_E + Q_R) / L \cdot e$ ;

$L$  : comprimento das placas;

$\nu$  :  $0,898 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  para  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

A tabela 4.3 mostra os parâmetros utilizados neste projeto de pesquisa.

TABELA 4.3 – Parâmetros utilizados na unidade piloto de FAD de alta taxa.

$Q_{entrada}$ (L/h)	TAS (m/h)	Rey	$V_e$ (cm/min)
1.165	51	748	64
882	39	566	49
582	26	374	32
282	13	181	16

#### 4.4.2.4. Procedimentos Adotados para Ensaio da Fase 4 da ETAPA II

A realização da Fase 4 consistiu no estudo da redução da dosagem de coagulante com e sem oxidante. Para tanto, foram fixadas: dosagem de oxidante (2,7 mg/L de cloro na forma de hipoclorito de sódio), pH de coagulação (pH = 6,2), gradiente médio de velocidade de floculação ( $G_F = 60/60/60 \text{ s}^{-1}$ ), tempo médio de floculação (20 minutos), taxa de aplicação superficial (13 m/h), 8% de recirculação, pressão de saturação (450 kPa) e temperatura (25 °C). Variou-se a dosagem de cloreto férrico (DCF). Na Figura 4.28 é mostrado um fluxograma ilustrativo do conjunto de ensaios da Fase 4.



FIGURA 4.28 – Fluxograma ilustrativo do conjunto de ensaios efetuados na Fase 4 da ETAPA II.

#### 4.4.2.5. Procedimentos Adotados para Ensaio de Filtração em Escala de Laboratório (Fase 5 da ETAPA II)

A realização da Fase 5 envolveu a aplicação de uma unidade de filtração em areia, em escala de laboratório.

Fixaram-se: dosagem de coagulante (30 mg/L de cloreto férrico), dosagem de oxidante (2,7 mg/L de cloro na forma de hipoclorito de sódio), pH de coagulação (pH = 6,2), gradiente médio de velocidade de floculação ( $G_F = 60/60/60 \text{ s}^{-1}$ ), tempo médio de floculação (20 minutos), taxa de aplicação superficial (13 e 39 m/h), 8% de recirculação, pressão de saturação (450 kPa) e temperatura (25 °C). A Figura 4.29 apresenta um esquema ilustrativo do conjunto de ensaios da Fase 5.

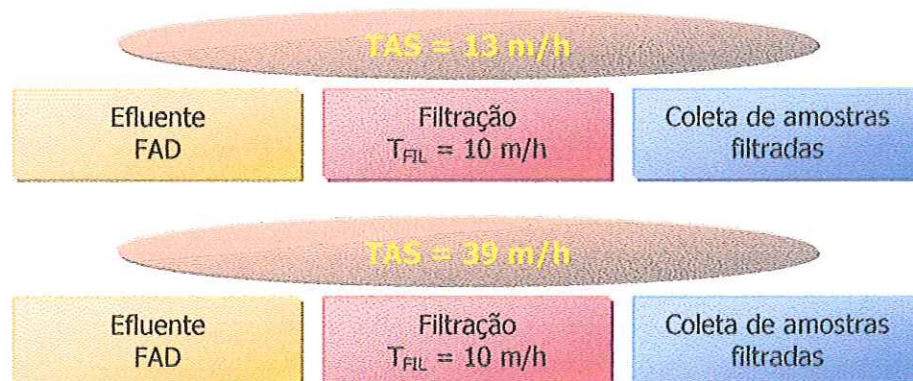


FIGURA 4.29 – Fluxograma ilustrativo do conjunto de ensaios da Fase 5 da ETAPA II.

#### 4.4.2.6. Procedimentos Adotados para Análise da Concentração Residual de Ar Presente no Efluente da Unidade de Flotação de Alta Taxa (Fase 6 da ETAPA II)

A supersaturação residual, presente em efluentes de unidades de FAD de alta taxa, é importante parâmetro, tendo em vista a possibilidade de precipitação e acúmulo nocivo de bolhas de ar no interior do leito filtrante de unidades de filtração existentes à jusante das unidades FAD, em sistemas de tratamento de água para abastecimento. Este risco depende de vários parâmetros: taxas, vazões de recirculação, pressão de saturação, entre outros.

No entanto, esta supersaturação pode ser devida não só ao ar efetivamente dissolvido na água, como também à presença de microscópicas bolhas de ar em suspensão na massa líquida. Tais microbolhas, eventualmente, podem ser "arrastadas" com o efluente destas unidades, devido às altas taxas nelas aplicadas (de 13 a 51 m/h, no caso deste estudo).

Uma maneira simples para determinação do grau de supersaturação residual seria medida indireta do teor de oxigênio dissolvido (OD) na água e posterior correlação com a concentração de ar dissolvido residual. Mas a presença eventual das microbolhas de ar inviabilizaria a medida de OD através de métodos convencionais (oxímetro ou método de Winckler com modo de coleta tradicional) tendo em vista que tais métodos não seriam capazes de detectar, com precisão, o oxigênio contido no interior das microbolhas de ar, mas somente o oxigênio efetivamente dissolvido na água, devido ao modo de coleta inadequada. Assim, foi necessário a idealização de modo de coleta capaz de garantir a detecção e quantificação do oxigênio contido nas microbolhas e também do oxigênio dissolvido na água.

Para estimativa do grau de supersaturação residual, o método denominado Método Winckler com modo de coleta apropriado para suspensões contendo bolhas de ar, consistiu no isolamento de amostra do efluente, coletado *in loco* com uso de seringa hipodérmica de 50 mL.

Antes da coleta da amostra de água supersaturada, no interior da seringa era colocado 0,3 mL de sulfato manganoso. Em seguida, removia-se todo o ar presente no interior da seringa. Para isso, a seringa era posicionada com a saída para cima para expulsar quantidade diminuta do reagente para garantir a completa ausência de ar na seringa antes da coleta da amostra. A seguir, procedia-se a coleta da amostra do efluente, colocando-se a seringa no interior do reator, no local onde se pretendia conhecer a concentração residual de oxigênio total.

Imediatamente após a coleta da amostra, inseria-se na seringa uma alíquota de 0,3 mL de solução alcalina (nitreto) e, na seqüência, 0,3 mL de ácido sulfúrico, então o oxigênio dissolvido era calculado em função do volume gasto na titulação com tiosulfato de sódio.

A confiabilidade e reprodutibilidade do Método de Winckler, com modo de coleta apropriado para suspensões contendo bolhas de ar, foram testadas através da comparação de determinações e concentrações de oxigênio dissolvido utilizando o Método Winckler com modo tradicional de coleta.

Foram retiradas amostras de diversos pontos ao longo do reator (sentido longitudinal e axial) e a Figura 4.30 apresenta esses pontos de coleta para análise do oxigênio dissolvido utilizando o Método de Winckler com modo de coleta apropriado para suspensões contendo bolhas de ar.

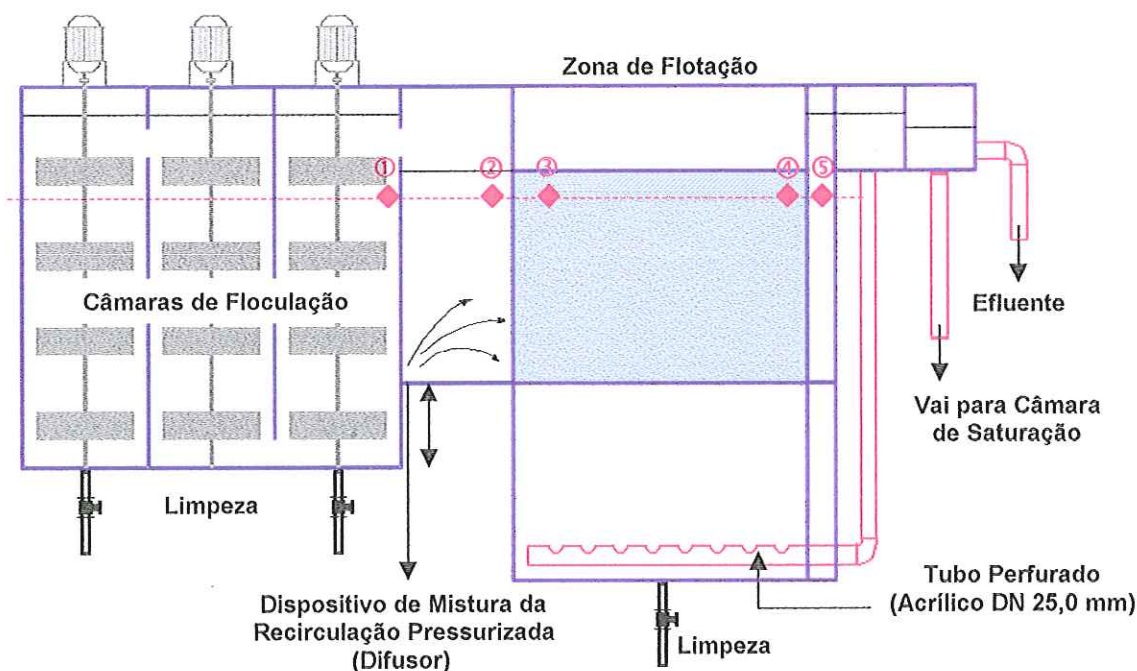


FIGURA 4.30 – Esquema ilustrativo dos pontos de coleta.

## 4.5. MONITORAMENTO DOS ENSAIOS

A seguir são descritos os procedimentos adotados para monitoramento dos ensaios.

### 4.5.1. Exames e Determinações Físico-Químicas

Para a caracterização da água bruta foram realizadas as seguintes determinações: pH, temperatura, turbidez, cor aparente, cor verdadeira, alcalinidade, condutividade, dureza, sólidos totais/fixos/voláteis, sólidos suspensos totais/fixos/voláteis, ferro, manganês (digerido e não digerido) e distribuição do tamanho das partículas, além do potencial zeta medido após coagulação.

Na ETAPA I foram avaliadas: eficiência da FAD associada à oxidação química e eficiência da sedimentação associada à oxidação química. Esta etapa envolveu os ensaios Tipo 1m 2 e 3 e as amostras foram coletadas em diferentes velocidades de flotação (5, 12, 18, 25 e 30 cm/min) e diferentes velocidades de sedimentação (0,5, 1,0, 2,5, 5,0 e 10,0 cm/min). Em todas estas amostras foram realizadas medidas de pH, temperatura, cor aparente e turbidez. Nas velocidades de 12 cm/min (flotação) e 2,5 cm/min (sedimentação) foram realizadas também medidas de ferro e manganês (digerido e não digerido).



#### 4.5.2. Monitoramento dos Parâmetros Operacionais Durante os Ensaios com as Instalações Piloto de FAD e Filtro em Areia

A ETAPA II envolveu ensaios com a unidade piloto de FAD e com o filtro em areia. Para o eficiente funcionamento dessas instalações, foi necessário controle dos seguintes itens:

- Temperatura: medições realizadas a cada 1 hora através de termômetro;
- Dosagem de cloreto férrico (mg/L): a cada 1 hora era verificada a bomba dosadora;
- Dosagem de carbonato de sódio (mg/L): a cada 1 hora era realizada a verificação da bomba dosadora;
- Dosagem de hipoclorito de sódio (mg/L); a cada ½ hora o pH era medido e, caso necessário, era realizado ajuste na bomba dosadora;
- Vazões de entrada (L/h), descarte do floculador (m<sup>3</sup>/h), entrada de recirculação (L/min): a cada ½ hora essas vazões eram verificadas através de medidores de vazão e, quando necessário, ajustadas através de registros;
- Pressão na câmara de saturação (KPA): a cada ½ hora era realizado controle de pressão na câmara de saturação e, sempre que preciso, tal pressão era ajustada através de acionamento de registros;
- Rotação dos agitadores para controle do gradiente médio de floculação (s<sup>-1</sup>): a cada 3 horas eram realizadas medidas para controle do gradiente médio de velocidade na floculação de maneira visual, cronometrada através das rotações por minuto;
- Coleta de amostras: nos ensaios utilizando filtro em areia, a cada hora eram coletadas amostras para medição de: pH, cor aparente, turbidez e distribuição de tamanho de partículas.

O monitoramento de coleta de amostras foi realizado da seguinte forma:

- Água bruta de estudo: pH, temperatura, turbidez, cor aparente, cor verdadeira, alcalinidade, condutividade, dureza, sólidos totais/fixos/voláteis, sólidos suspensos totais/fixos/voláteis, ferro, manganês (digerido e não digerido) e distribuição do tamanho de partículas;
- Amostras de água coagulada após mistura rápida no início das carreiras de operação: pH, temperatura, sólidos totais/fixos/voláteis, sólidos suspensos totais/fixos/voláteis e potencial zeta;
- Amostras proporcionais da água clarificada coletadas a cada 15 minutos durante todo o ensaio: pH, temperatura, cor e turbidez aparente;
- Amostras compostas de todas as amostras proporcionais clarificadas coletadas durante 1 hora de ensaio (a cada 15 minutos): pH, temperatura, cor aparente, turbidez, alcalinidade, dureza, condutividade, SST/SSF/SSV, Fe/Mn residual (digerido e não digerido) e distribuição de tamanho das partículas.

Nos ensaios que forneceram os melhores resultados, em escala piloto, procedeu-se a determinação de trihalometanos.

Para a realização dessas análises, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Medidor de pH da marca *Orion*, modelo 410A;
- Espectrofotômetro da marca *Hach*, modelo DR/4000;
- Turbidímetro da marca *Hach*, modelo 2100P;
- Condutivímetro da marca *Horiba* modelo DS-15;
- Medidor de potencial zeta da marca *Malvern* modelo zetamaster;
- Medidor de distribuição de tamanho de partículas da marca *Hiac/Royco*, modelo 3000A acoplado a "Liquid Syringe Sampler", da marca *Hiac/Royco*, modelo 8000A;
- Espectrofotômetro de absorção atômica da marca *Varian*, modelo AA-1274.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente estudo foi dividido em três etapas cada uma subdividida em fases. A ETAPA I constituiu-se de duas fases (Fase 1 e Fase 2). Na primeira, investigou-se o desempenho da flotação por ar dissolvido (FAD) conjugada à oxidação química, frente aos diversos valores de pH e respectivas dosagens de coagulante e oxidante, e na Fase 2, o desempenho da sedimentação conjugada à oxidação química.

Todos os ensaios da primeira etapa foram efetuados empregando-se equipamentos em escala de laboratório com alimentação por batelada.

Foram realizados ensaios preliminares à oxidação, os quais visaram investigar a formação de complexos entre a matéria orgânica e os metais presentes, além de estudar a eficiência da oxidação sem a FAD, variando-se pH, dosagem de oxidante e tempo de oxidação. Os resultados estão devidamente apresentados na dissertação de MORUZZI (2000).

Para avaliação do desempenho da oxidação química associada a FAD, realizaram-se ensaios que foram classificados de Tipo 1, Tipo 2 e Tipo 3, dependendo do ponto de aplicação do oxidante.

Os ensaios Tipo 1 consistiram no estudo da aplicação do oxidante no momento da mistura rápida e, para tanto, foram analisadas várias dosagens do coagulante cloreto férrico para diferentes valores de pH de coagulação antecedendo à floculação-flotação. Os resultados apresentam-se nas Tabelas 5.2, 5.3 e GRÁFICOS 5.1 a 5.4.

Os ensaios Tipo 2 consistiram na aplicação do oxidante antecedendo o processo de coagulação-floculação-flotação e, para tal, foram variados os valores de pH de oxidação, pH de coagulação e dosagens de coagulante. Os resultados obtidos nessa fase apresentam-se na Tabela 5.3 e Gráficos 5.5 a 5.10.

Os ensaios Tipo 3 envolveram a investigação da aplicação do oxidante após a pré-clarificação por FAD e, posteriormente, realizou-se filtração em papel de filtro 8  $\mu\text{m}$  (Whatman 40). Nesses ensaios foram adotados os valores de dosagens de coagulante que forneceram os melhores resultados nos ensaios anteriores (Tipo 1 e 2). Os resultados apresentam-se na Tabela 5.4 e Gráficos 5.11 a 5.14.

Finalizados esses ensaios, deu-se início à avaliação da influência da dosagem de oxidante no contexto da oxidação química associada a flotação. Para tanto foram fixados os parâmetros que apresentaram os melhores resultados para ensaios anteriores e variou-se a dosagem de oxidante. Esses resultados estão apresentados na Tabela 5.6.

Foram fixados todos os parâmetros que apresentaram os melhores resultados nos ensaios anteriores e passou-se a estudar a floculação para a flotação, variando-se o gradiente

médio de velocidade de floculação e tempo de floculação. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.7 e Gráficos 5.15 a 5,26.

Na seqüência, foram realizados ensaios para investigar a eficiência da oxidação química associada à sedimentação. Para tanto, foram selecionados os ensaios Tipo 1 que, de maneira geral, apresentaram os mais favoráveis resultados, variando-se pH de coagulação, dosagem de cloreto férrico, gradiente médio de velocidade de floculação e tempo de floculação. Os resultados apresentam-se nas Tabelas 5.11 a 5.16 e Gráficos 5.27 a 5.51.

Para os ensaios de flotação com velocidade de 12 cm/min e de sedimentação com velocidade de 2,5 cm/min, determinou-se concentração de ferro e de manganês total após digestão química e detectável sem digestão química.

### 5.1. ENSAIOS DE REMOÇÃO DE FERRO E MANGANÊS COM USO DE OXIDAÇÃO QUÍMICA ASSOCIADA A FAD EM ESCALA DE LABORATÓRIO

Para esses ensaios adotou-se hipoclorito de sódio (NaOCl) como oxidante. Foi fixada dosagem de 2,7 mg/L. O  $\text{FeCl}_3$  (cloreto férrico) foi utilizado como coagulante.

Para a realização dos ensaios, foi necessário fixar alguns parâmetros, apresentados na TABELA 5.1.

É importante salientar que são apresentados os resultados obtidos apenas com velocidade de flotação de 12 cm/min, mas todos os ensaios (Tipo 1, 2 e 3) foram efetuados nas seguintes velocidades de flotação: 5, 12, 18, 25 e 30 cm/min e se encontram apresentados na dissertação de Rodrigo Braga Moruzzi.

Tabela 5.1 – Condições fixadas durante os ensaios de remoção de ferro e manganês utilizando a FAD conjugada a oxidação química.

Dosagem de oxidante adotada (mg/L)	$2,7 \pm 0,2$
G médio de velocidade de mistura rápida e dispersão do oxidante ( $\text{s}^{-1}$ )	$800 \pm 10$
Tempo de dispersão do oxidante (s)	5
Tempo de mistura rápida (s)	20
G médio de velocidade de floculação ( $\text{s}^{-1}$ )	$60 \pm 5$
Tempo de floculação (min)	20
Razão de recirculação (%)	10
Pressão de saturação (kPa)	$450 \pm 10$

### 5.1.1. Ensaio Tipo 1 - Aplicação do Oxidante e do Coagulante no Momento da Mistura Rápida

Para esses ensaios, o oxidante (hipoclorito de sódio) foi acrescentado à água de estudo 5 segundos antes do acréscimo do coagulante, procedendo-se a coagulação química seguida da floculação e flotação da água de estudo em diferentes dosagens de coagulante e de valores de pH de coagulação. Os resultados apresentam-se nas Tabelas 5.2, 5.3 e Gráficos 5.1 a 5.4.

Analisando-se as Tabelas 5.2, 5.3 e os Gráficos 5.1 a 5.4, é possível observar que os melhores resultados, ou seja, os menores valores residuais de cor aparente, turbidez e ferro foram obtidos em valores de pH entre 5,9 e 7,0.

Os Gráficos apresentam as frações residuais de cor aparente, turbidez, ferro e manganês para as dosagens de CF de 15, 25, 30 e 35 mg/L, respectivamente. Através do Gráfico 5.3, para DCF=30 mg/L, é possível observar que a remoção de ferro total após a FAD foi eficiente (>90%) em valores de pH entre 5,8 e 7,1. É interessante observar que esses valores de pH são menores que os usualmente recomendados (>7,5) para a oxidação desse metal com o hipoclorito de sódio. Isso provavelmente se deve ao fato de as formas de ferro poderem ser removidas juntamente com o ácido húmico.

Notou-se também que para manganês total residual, os melhores resultados apresentaram-se em valores de pH inferiores a 6,0 ou superiores a 8,0. No primeiro caso esses valores de pH são menores que o usualmente recomendado para a oxidação do manganês (pH>8,5).

Para as dosagens de cloreto férrico estudadas: 15, 25, 30 e 35 mg/L, nos valores de pH de 6,4; 6,8; 5,9 e 7,0 respectivamente, foram observados baixos valores de cor aparente e ferro residuais.

Analisando-se as dosagens de cloreto férrico (DCF), observou-se que as dosagens de 15 e 30 mg/L apresentaram os melhores resultados nos valores de pH de 6,4 e 5,9 respectivamente. A DCF=15 mg/L apresentou ferro total residual na concentração de 0,17 mg/L e para DCF=30 mg/L, ferro total residual na concentração de 0,25 mg/L, sendo que para as duas dosagens de cloreto férrico, o manganês total residual foi de 0,08 mg/L e cor aparente residual menor que 2 uC.

Através da Tabela 5.3, é possível, ainda, observar que os melhores resultados apresentam-se com potencial zeta entre -13,8 e -7,2 mV.

Comparando-se as dosagens de coagulante de 15 e 30 mg/L na análise dos demais valores de pH, verifica-se que a dosagem de 30 mg/L pode ser selecionada como a mais adequada para os ensaios Tipo 1.

Selecionou-se a DCF de 30 mg/L no valor de pH de 5,9 como a mais adequada para os ensaios Tipo 1, pois apresentou turbidez residual de 0,71 uT, cor aparente residual menor que 2 uC e residuais de ferro e manganês nas concentrações de 0,25 e 0,08 mg/L, respectivamente.

Segundo CARLSON, KNOCKE & GERTIG (1997), as espécies solúveis de ferro e manganês requerem a adição de oxidante químico para promover a conversão das formas mais solúveis para as menos solúveis. No entanto as espécies coloidais de ferro e manganês não são efetivamente tratadas pela adição dos oxidantes químicos, devendo-se buscar a otimização de processos de separação sólido-líquido para a remoção dessas espécies.

A Tabela 5.3 apresenta um resumo dos melhores resultados obtidos nos ensaios Tipo 1.

TABELA 5.2 – Resultados referentes aos ensaios de FAD conjugada à oxidação química (ensaios Tipo 1) em diferentes valores de pH e diferentes dosagens de cloreto férrico (DCF).

Condições de Ensaio: Tipo 1, DCL=2,7 mg/L,  $G_{MR}=800 \text{ s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20 \text{ s}$ ,  $G_F=60 \text{ s}^{-1}$ ,  $T_F=20 \text{ min}$ ,  $R=10\%$ , Pressão de saturação=450 kPa, temperatura=25 °C.

<b>DCF = 15 mg/L</b>					
pH de oxidação	6,38	7,25	7,45	7,56	9,03
pH após coagulação	6,38	7,25	7,45	7,56	9,03
Potencial Zeta (mV)	-13,8	-11,6	-13,1	-13,1	-11,7
Mobilidade Eletroforética	-1,155	-0,947	-1,089	-1,013	-0,976
Cor após Mistura Rápida (uC)	238	195	201	191	179
Turbidez após Mistura Rápida (uT)	16,6	13,0	14,9	12,7	17,5
Velocidade de Flotação (cm/min)	12	12	12	12	12
Turbidez após clarificação (uT)	0,79	2,65	3,20	3,73	0,79
Cor após clarificação (uC)	<2	45	44	51	42
Fe após clarificação (mg/L) D/ND	0,17/0,02	1,23/0,48	1,10/0,53	0,96/0,45	2,14/1,56
Mn após clarificação (mg/L) D/ND	0,08/0,12	0,17/0,12	0,15/0,09	0,24/0,13	0,11/0,10
<b>DCF = 25 mg/L</b>					
pH de oxidação	6,07	6,79	7,03	7,28	8,80
pH após coagulação	6,07	6,79	7,03	7,28	8,80
Potencial Zeta (mV)	-10,2	-10,7	-11,6	-10,0	-11,6
Mobilidade Eletroforética	-0,861	-0,886	-0,973	-0,777	-0,963
Cor após Mistura Rápida (uC)	272	251	245	245	196
Turbidez após Mistura Rápida (uT)	16,3	14,1	16,1	13,2	17,4
Velocidade de Flotação (cm/min)	12	12	12	12	12
Turbidez após clarificação (uT)	1,4	1,12	1,21	2,05	3,96
Cor após clarificação (uC)	3	<2	22	6	26
Fe após clarificação (mg/L) D/ND	0,59/nd	0,46/0,08	0,78/0,14	0,99/0,42	1,32/1,62
Mn após clarificação (mg/L) D/ND	0,22/0,16	0,14/0,14	0,18/0,13	0,16/0,11	0,11/0,10
<b>DCF = 30 mg/L</b>					
pH de oxidação	5,85	6,70	6,87	7,11	8,44
pH após coagulação	5,85	6,70	6,87	7,11	8,44
Potencial Zeta (mV)	-7,2	-3,6	-12,8	-9,4	-12,4
Mobilidade Eletroforética	-0,609	-0,298	-1,068	-0,777	-1,029
Cor após Mistura Rápida (uC)	282	251	260	241	238
Turbidez após Mistura Rápida (uT)	15,5	14,1	16,1	15,4	18,5
Velocidade de Flotação (cm/min)	12	12	12	12	12
Turbidez após clarificação (uT)	0,71	1,39	1,08	2,83	4,03
Cor após clarificação (uC)	<2	3	19	23	40
Fe após clarificação (mg/L) D/ND	0,25/0,04	0,95/0,05	0,89/0,10	1,50/0,24	-
Mn após clarificação (mg/L) D/ND	0,08/0,09	0,23/0,18	0,16/0,14	0,19/0,11	-

	DCF = 35 mg/L				
pH de oxidação	5,59	6,54	6,80	6,99	8,24
pH após coagulação	5,59	6,54	6,80	6,99	8,24
Potencial Zeta (mV)	17,4	1,7	-12,0	-10,0	-11,8
Mobilidade Eletroforética	1,467	0,143	-0,998	-0,814	-0,978
Cor após Mistura Rápida (uC)	270	282	276	271	266
Turbidez após Mistura Rápida (uT)	14	13,9	16,1	14,9	18,6
Velocidade de Flotação (cm/min)	12	12	12	12	12
Turbidez após clarificação (uT)	4,25	0,98	1,04	1,16	2,23
Cor após clarificação (uC)	75	<2	4	<2	40
Fe após clarificação (mg/L) D/ND	3,07/2,90	1,19/0,09	4,10/0,10	0,53/0,15	1,11/1,16
Mn após clarificação (mg/L) D/ND	0,23/0,19	0,29/0,17	0,27/0,15	0,16/0,13	0,09/0,08

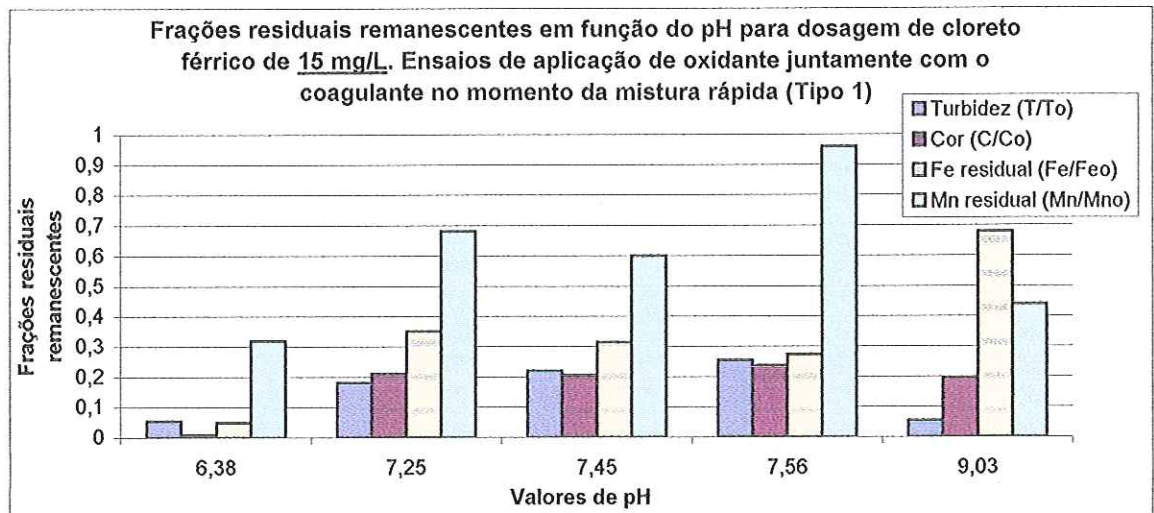


GRÁFICO 5.1 – Frações residuais remanescentes de turbidez, cor, ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 1. Condições de Ensaio: Tipo 1, DCF=15 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $G_{MR}=800 \text{ s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20 \text{ s}$ ,  $G_F=60 \text{ s}^{-1}$ ,  $T_F=20 \text{ min}$ ,  $R=10\%$ , Pressão de saturação=450 kPa, temperatura=25 °C.

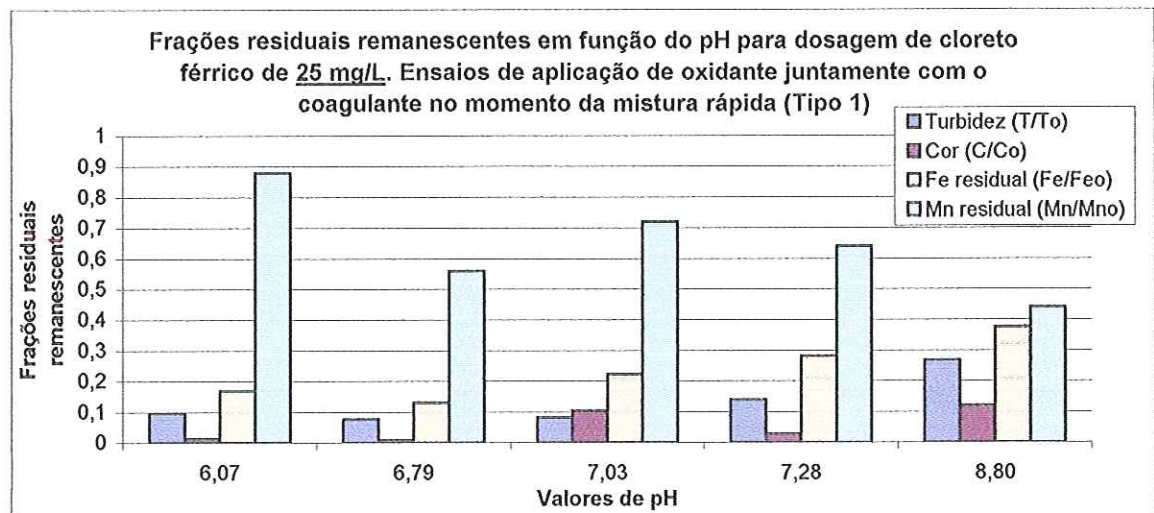


GRÁFICO 5.2 – Frações residuais remanescentes de turbidez, cor, ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 1. Condições de Ensaio: Tipo 1, DCF=25 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $G_{MR}=800 \text{ s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20 \text{ s}$ ,  $G_F=60 \text{ s}^{-1}$ ,  $T_F=20 \text{ min}$ ,  $R=10\%$ , Pressão de saturação=450 kPa, temperatura=25 °C.

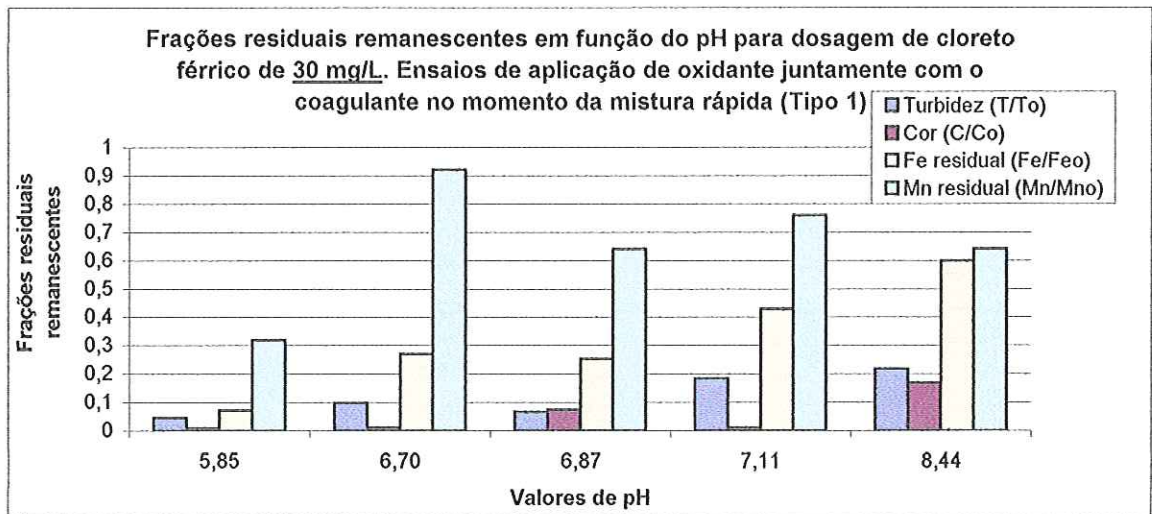


GRÁFICO 5.3 – Frações residuais remanescentes de turbidez, cor, ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 1. Condições de Ensaio: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $G_{MR}=800\text{ s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20\text{ s}$ ,  $G_F=60\text{ s}^{-1}$ ,  $T_F=20\text{ min}$ ,  $R=10\%$ , Pressão de saturação=450 kPa, temperatura=25 °C.

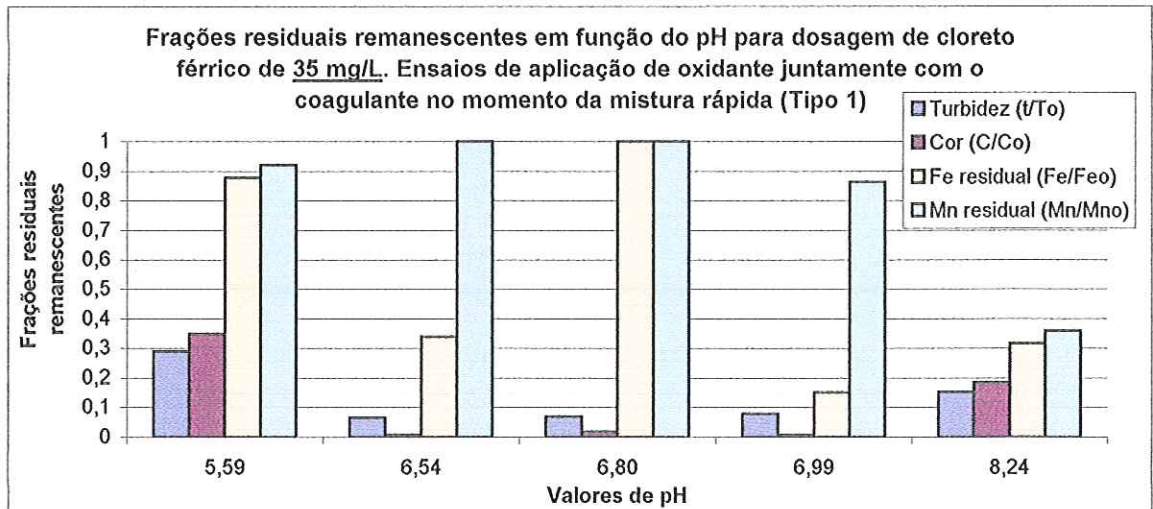


GRÁFICO 5.4 – Frações residuais remanescentes de turbidez, cor, ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 1. Condições de Ensaio: Tipo 1, DCF=35 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $G_{MR}=800\text{ s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20\text{ s}$ ,  $G_F=60\text{ s}^{-1}$ ,  $T_F=20\text{ min}$ ,  $R=10\%$ , Pressão de saturação=450 kPa, temperatura=25 °C.

TABELA 5.3 – Resumo dos melhores resultados referentes aos ensaios de FAD conjugada à oxidação (ensaios Tipo 1). Condições de Ensaio: Tipo 1, DCI=2,7 mg/L,  $G_{MR}=800\text{ s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20\text{ s}$ ,  $G_F=60\text{ s}^{-1}$ ,  $T_F=20\text{ min}$ ,  $R=10\%$ , Pressão de saturação=450 kPa, temperatura=25 °C.

	DCF = 15 mg/L	DCF = 25 mg/L	DCF = 30 mg/L	DCF = 35 mg/L
pH de oxidação	6,38	6,79	5,85	6,99
pH após coagulação	6,38	6,79	5,85	6,99
Potencial zeta (mV)	- 13,8	- 10,7	- 7,2	- 10,0
Velocidade de Flotação (cm/min)	12	12	12	12
Turbidez após clarificação (uT)	0,79	1,12	0,71	1,16
Cor após clarificação (uC)	< 2	< 2	< 2	< 2
Fe após clarificação (mg/L) D/ND	0,17/0,02	0,46/0,08	0,25/0,04	0,53/0,15
Mn após clarificação (mg/L) D/ND	0,08/0,12	0,14/0,14	0,08/0,09	0,16/0,13



### 5.1.2. Ensaio Tipo 2 - Aplicação do Oxidante 5 Minutos Antes da Aplicação do Coagulante

Para esses ensaios, o oxidante (hipoclorito de sódio) foi acrescentado à água de estudo 5 minutos antes do acréscimo do coagulante ( $\text{FeCl}_3$ ), mantido o gradiente médio de velocidade em torno de  $150 \text{ s}^{-1}$ . Ao final desse período o gradiente médio de velocidade era aumentado para  $800 \text{ s}^{-1}$  e acrescentado o coagulante, procedendo-se a mistura rápida por 20 segundos. Nesses ensaios, os valores de pH de oxidação foram diferentes dos valores de pH de coagulação (após mistura rápida). Os resultados apresentam-se nas Tabelas 5.4, 5.5 e Gráficos 5.5 a 5.10.

Através da análise da Tabela 5.4, pode-se observar que, quando foi aplicada a pré-oxidação, os menores valores de cor aparente residual foram obtidos em valores de pH mais elevados (7,5 a 8,5) quando comparados aos resultados dos ensaios Tipo 1 (5,8 a 7,0).

No caso em que o cloreto férrico não foi aplicado, ficou prejudicada a remoção de cor aparente, turbidez e ferro. Isso indica não ter sido suficiente a oxidação e a coagulação provocada pela ação apenas do oxidante (hipoclorito de sódio) na dosagem de 2,7 mg/L. Analisando-se o manganês total, nota-se que para pH de 7,5, esse metal apresentou-se com concentração de 0,12 mg/L. Para pH de 8,0, a concentração foi 0,23 mg/L e para pH de 8,5 a concentração foi 0,11 mg/L. Comparando-se com os melhores resultados obtidos nos ensaios Tipo 1, com 30 mg/L de cloreto férrico e pH de 5,8, no qual a concentração do manganês total foi de 0,08 mg/L, verifica-se ter branda diferença entre as concentrações obtidas sem e com cloreto férrico, o que indica haver pouca influência desse coagulante na remoção do manganês.

Pode-se verificar também que a remoção de cor aparente foi bastante prejudicada pela pré-oxidação da água de estudo, o que foi notado mais intensamente nas menores dosagens de cloreto férrico.

No entanto, observa-se que, apesar da remoção de cor aparente ter sido prejudicada – foram atingidos baixos valores de ferro e manganês residuais (na faixa de 0,17 a 0,30 mgFe/L e 0,06 a 0,15 mgMn/L) – nas melhores condições de ensaios quando foram aplicadas as seguintes dosagens de cloreto férrico e valores de pH: DCF = 15 mg/L e pH = 6,3; DCF = 20, 25 e 30 mg/L e pH = 7,5; DCF = 35 mg/L e pH = 8,0.

Uma possível explicação é, provavelmente, que o oxidante tenha quebrado parte da ligação presente entre ácido húmico e ferro, e modificado a relação de remoção desses metais em relação à cor aparente (relação esta verificada nos ensaios Tipo 1).

Nota-se que quando o coagulante foi aplicado, a turbidez residual apresentou remoção maior que 65% para todos os valores de pH estudados, porém resultado algum se encontrou menor que a unidade (1 uT), ao contrário do observado nos ensaios Tipo 1. Verifica-se, claramente, a queda na eficiência dos resultados obtidos nos ensaios Tipo 2 quando comparados aos resultados obtidos nos ensaios Tipo 1.

Selecionou-se a DCF = 30 mg/L como a mais adequada para os ensaios Tipo 2 no valor de pH de 7,5 por apresentar maior eficiência, menores valores de cor, turbidez, ferro e manganês. A Tabela 5.5 apresenta um resumo dos melhores resultados obtidos nos ensaios Tipo 2.

TABELA 5.4 – Resultados referentes aos ensaios de FAD conjugada à oxidação (ensaios Tipo 2) em diferentes valores de pH e diferentes dosagens de cloreto férrico (DCF).

Condições de Ensaio: Tipo 2, DCL=2,7 mg/L,  $G_{DO}=150\text{ s}^{-1}$ ,  $T_{ODO}=5\text{ min}$ ,  $G_{MR}=800\text{ s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20\text{ s}$ ,  $G_F=60\text{ s}^{-1}$ ,  $T_F=20\text{ min}$ , R=10%, Pressão de saturação=450 kPa, temperatura=25 °C.

<b>DCF = 0 mg/L</b>					
pH de oxidação	7,46	7,99	8,52		
pH após coagulação	7,96	8,19	8,48		
Potencial Zeta (mV)	-14,7	-12,7	-13,9		
Mobilidade Eletroforética	-1,181	-1,093	-1,114		
Cor após Mistura Rápida (uC)	171	171	168		
Turbidez após Mistura Rápida (uT)	11,8	11,8	11,8		
Velocidade de Flotação (cm/min)	12	12	12		
Turbidez após clarificação (uT)	8,98	11,6	9,05		
Cor após clarificação (uC)	113	167	125		
Fe após clarificação (mg/L) D/ND	0,89/0,60	1,58/1,12	0,76/0,78		
Mn após clarificação (mg/L) D/ND	0,12/0,14	0,23/0,19	0,11/0,15		
<b>DCF = 15 mg/L</b>					
pH de oxidação	6,31	6,95	7,58	8,07	8,57
pH após coagulação	6,24	6,81	7,12	7,25	7,56
Potencial Zeta (mV)	-9,2	-13,0	-12,1	-12,3	-13,3
Mobilidade Eletroforética	-0,782	-1,041	-1,042	-0,997	-1,129
Cor após Mistura Rápida (uC)	248	242	237	211	194
Turbidez após Mistura Rápida (uT)	13,2	13,4	13,6	13,2	12,6
Velocidade de Flotação (cm/min)	12	12	12	12	12
Turbidez após clarificação (uT)	1,71	1,11	1,36	2,77	4,76
Cor após clarificação (uC)	63	49	65	63	73
Fe após clarificação (mg/L) D/ND	0,17/nd	1,26/0,02	0,43/0,27	0,67/0,43	1,43/0,97
Mn após clarificação (mg/L) D/ND	0,06/0,07	0,14/0,07	0,03/0,05	0,08/0,06	0,05/0,07
<b>DCF = 20 mg/L</b>					
pH de oxidação	7,46	7,99	8,52		
pH após coagulação	6,83	7,03	7,27		
Potencial Zeta (mV)	-9,3	-11,5	-10,9		
Mobilidade Eletroforética	-0,789	-0,983	-0,888		
Cor após Mistura Rápida (uC)	242	235	232		
Turbidez após Mistura Rápida (uT)	14,8	15,1	13,8		
Velocidade de Flotação (cm/min)	12	12	12		
Turbidez após clarificação (uT)	4,69	1,67	4,88		
Cor após clarificação (uC)	21	11	37		
Fe após clarificação (mg/L) D/ND	0,24/0,12	1,21/0,18	0,95/0,48		
Mn após clarificação (mg/L) D/ND	0,10/0,15	0,14/0,12	0,12/0,12		
<b>DCF = 25 mg/L</b>					
pH de oxidação	7,46	7,99	8,52		
pH após coagulação	6,7	6,86	7,00		
Potencial Zeta (mV)	-13,2	-10,0	-11,1		
Mobilidade Eletroforética	-1,054	-0,851	-0,904		

Cor após Mistura Rápida (uC)	275	264	246		
Turbidez após Mistura Rápida (uT)	14,4	14,7	12,9		
Velocidade de Flotação (cm/min)	12	12	12		
Turbidez após clarificação (uT)	2,63	1,36	2,99		
Cor após clarificação (uC)	15	8	15		
Fe após clarificação (mg/L) D/ND	0,25/0,07	0,80/0,11	0,34/0,16		
Mn após clarificação (mg/L) D/ND	0,12/0,16	0,19/0,13	0,15/0,14		
<b>DCF = 30 mg/L</b>					
pH de oxidação	6,31	7,46	7,99	8,52	9,18
pH após coagulação	5,85	6,57	6,66	6,85	7,66
Potencial Zeta (mV)	5,8	-9,1	-10,6	-9,7	-11,2
Mobilidade Eletroforética	0,469	-0,729	-0,907	-0,786	-0,974
Cor após Mistura Rápida (uC)	302	280	276	280	226
Turbidez após Mistura Rápida (uT)	15,3	14,7	15,8	14,5	15,4
Velocidade de Flotação (cm/min)	12	12	12	12	12
Turbidez após clarificação (uT)	1,65	1,59	1,13	1,19	2,33
Cor após clarificação (uC)	59	16	7	8	44
Fe após clarificação (mg/L) D/ND	1,43/nd	0,25/0,05	0,37/0,05	0,23/0,04	0,54/0,58
Mn após clarificação (mg/L) D/ND	0,17/0,09	0,15/0,16	0,18/0,14	0,12/0,11	0,03/0,04
<b>DCF = 35 mg/L</b>					
pH de oxidação	7,46	7,99	8,52		
pH após coagulação	6,42	6,57	6,72		
Potencial Zeta (mV)	-3,8	-8,3	-9,3		
Mobilidade Eletroforética	-0,302	-0,717	-0,755		
Cor após Mistura Rápida (uC)	303	301	289		
Turbidez após Mistura Rápida (uT)	15,2	16,3	14,0		
Velocidade de Flotação (cm/min)	12	12	12		
Turbidez após clarificação (uT)	1,96	1,06	1,08		
Cor após clarificação (uC)	16	5	16		
Fe após clarificação (mg/L) D/ND	0,73/0,07	0,30/0,08	0,31/0,11		
Mn após clarificação (mg/L) D/ND	0,26/0,18	0,14/0,15	0,11/0,16		

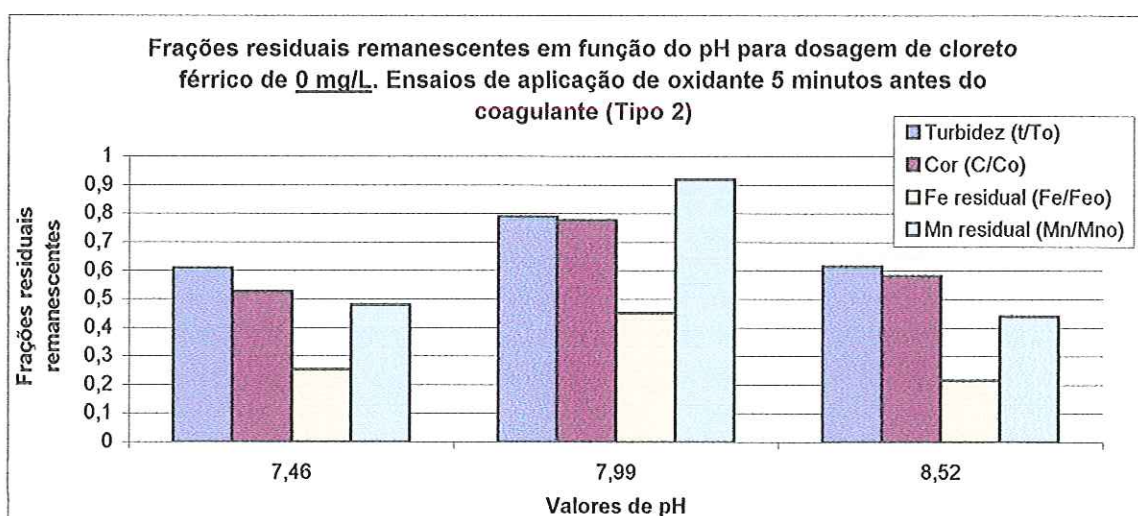


GRÁFICO 5.5 – Frações residuais remanescentes de turbidez, cor, ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 2. Condições de Ensaio: Tipo 2, DCF=0 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $G_{DO}=150 \text{ s}^{-1}$ ,  $T_{DO}=5 \text{ min}$ ,  $G_{MR}=800 \text{ s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20 \text{ s}$ ,  $G_F=60 \text{ s}^{-1}$ ,  $T_F=20 \text{ min}$ , R=10%, Pressão de saturação=450 kPa, temperatura=25 °C.

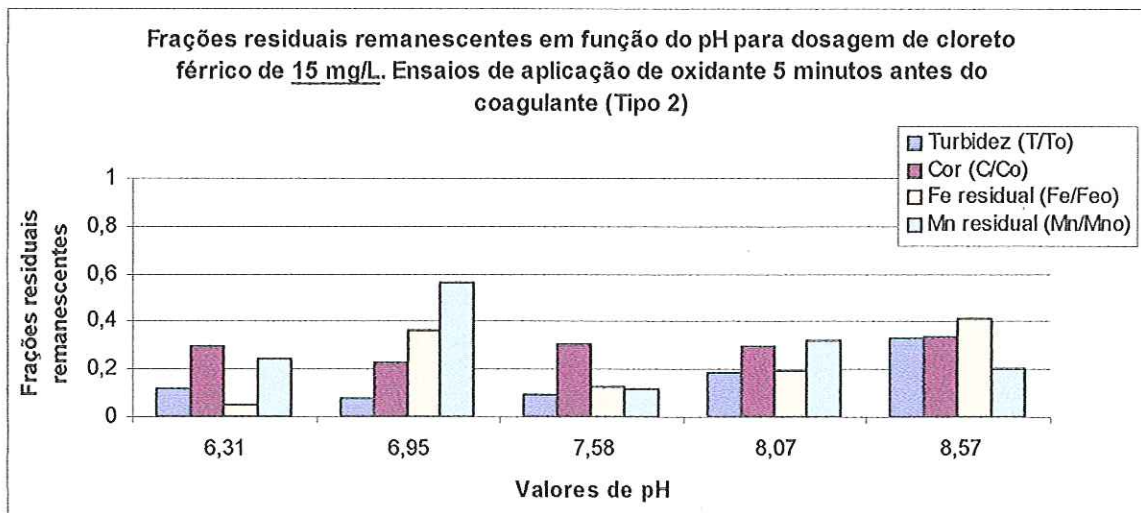


GRÁFICO 5.6 – Frações residuais remanescentes de turbidez, cor, ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 2. Condições de Ensaio: Tipo 2,  $DCF=15 \text{ mg/L}$ ,  $DCI=2,7 \text{ mg/L}$ ,  $G_{DO}=150 \text{ s}^{-1}$ ,  $T_{DO}=5 \text{ min}$ ,  $G_{MR}=800 \text{ s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20 \text{ s}$ ,  $G_F=60 \text{ s}^{-1}$ ,  $T_F=20 \text{ min}$ ,  $R=10\%$ , Pressão de saturação=450 kPa, temperatura=25 °C.

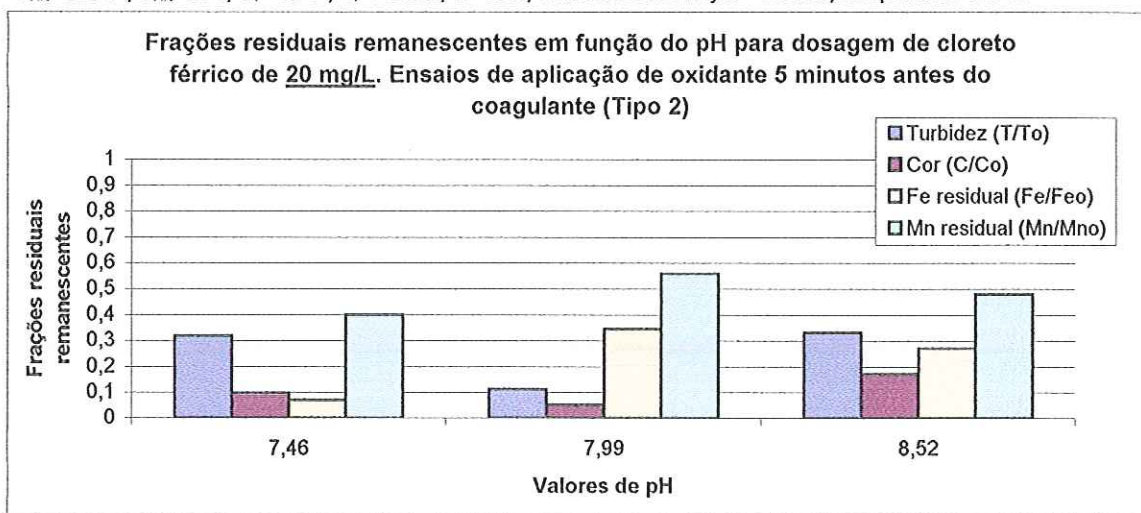


GRÁFICO 5.7 – Frações residuais remanescentes de turbidez, cor, ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 2. Condições de Ensaio: Tipo 2,  $DCF=20 \text{ mg/L}$ ,  $DCI=2,7 \text{ mg/L}$ ,  $G_{DO}=150 \text{ s}^{-1}$ ,  $T_{DO}=5 \text{ min}$ ,  $G_{MR}=800 \text{ s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20 \text{ s}$ ,  $G_F=60 \text{ s}^{-1}$ ,  $T_F=20 \text{ min}$ ,  $R=10\%$ , Pressão de saturação=450 kPa, temperatura=25 °C.

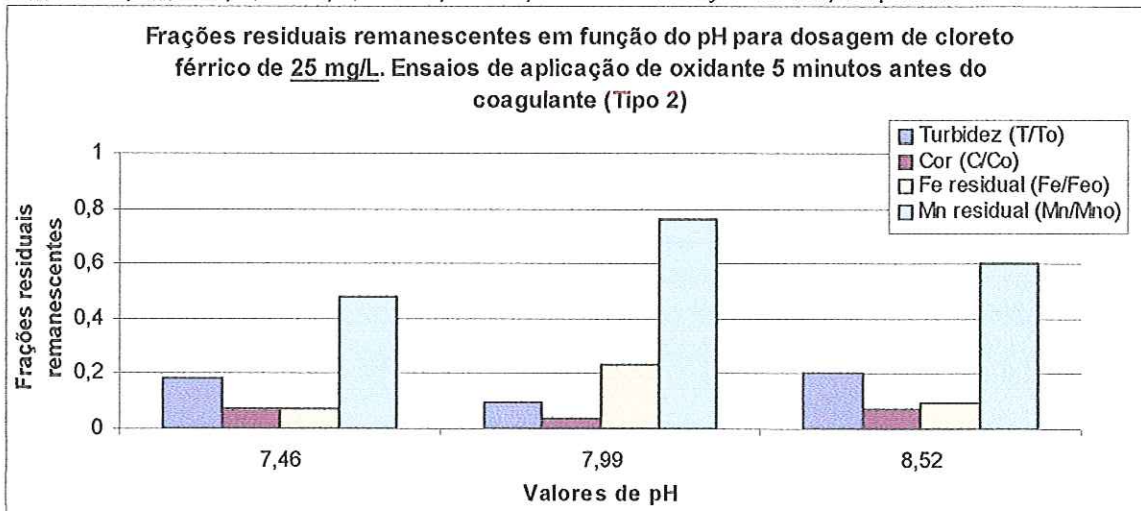


GRÁFICO 5.8 – Frações residuais remanescentes de turbidez, cor, ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 2. Condições de Ensaio: Tipo 2,  $DCF=25 \text{ mg/L}$ ,  $DCI=2,7 \text{ mg/L}$ ,  $G_{DO}=150 \text{ s}^{-1}$ ,  $T_{DO}=5 \text{ min}$ ,  $G_{MR}=800 \text{ s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20 \text{ s}$ ,  $G_F=60 \text{ s}^{-1}$ ,  $T_F=20 \text{ min}$ ,  $R=10\%$ , Pressão de saturação=450 kPa, temperatura=25 °C.

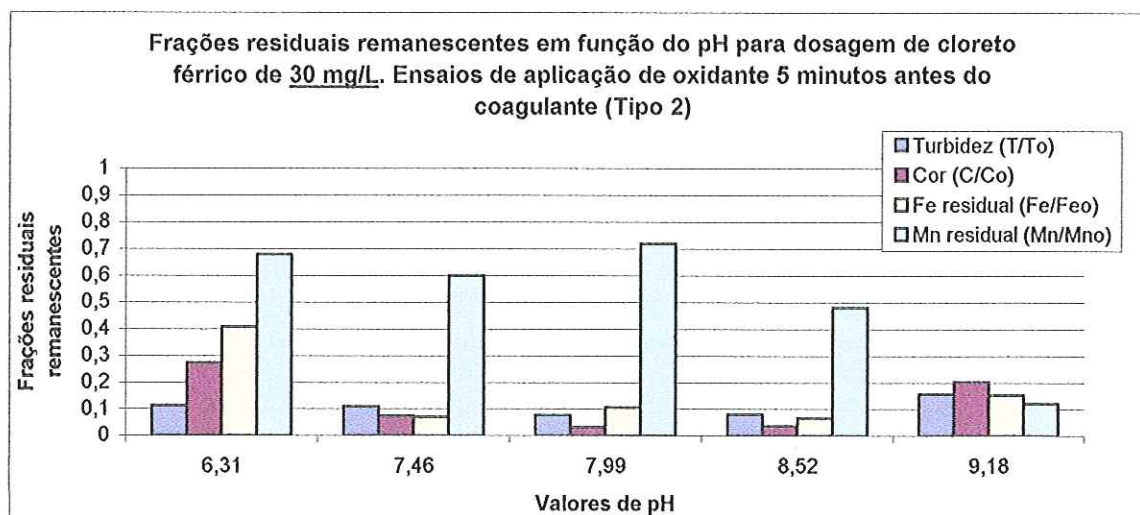


GRÁFICO 5.9 – Frações residuais remanescentes de turbidez, cor, ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 2. Condições de Ensaio: Tipo 2, DCF=30 mg/L, DCL=2,7 mg/L,  $G_{DO}=150\text{ s}^{-1}$ ,  $T_{DO}=5\text{ min}$ ,  $G_{MR}=800\text{ s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20\text{ s}$ ,  $G_F=60\text{ s}^{-1}$ ,  $T_F=20\text{ min}$ ,  $R=10\%$ , Pressão de saturação=450 kPa, temperatura=25 °C.

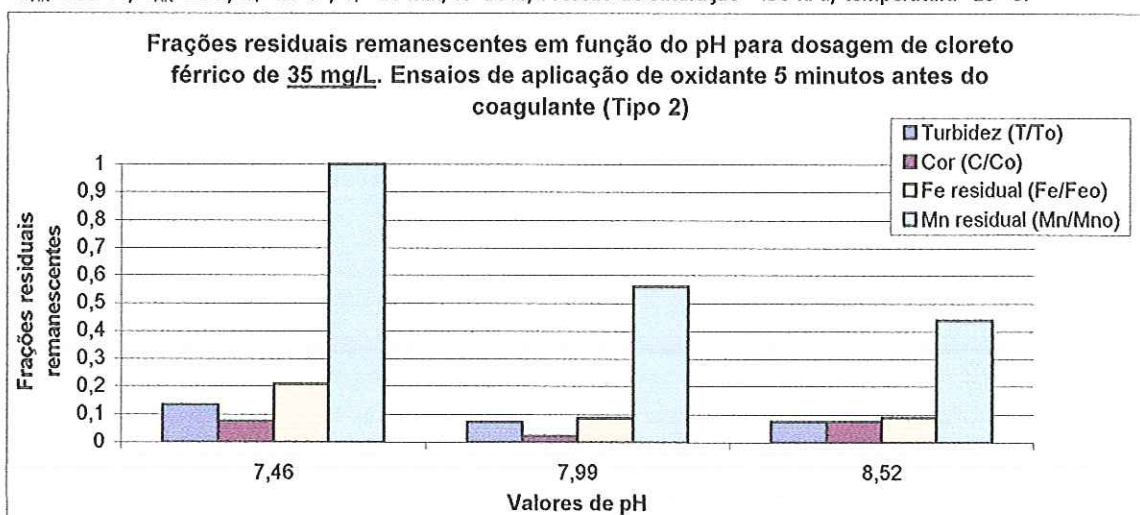


GRÁFICO 5.10 – Frações residuais remanescentes de turbidez, cor, ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 2. Condições de Ensaio: Tipo 2, DCF=35 mg/L, DCL=2,7 mg/L,  $G_{DO}=150\text{ s}^{-1}$ ,  $T_{DO}=5\text{ min}$ ,  $G_{MR}=800\text{ s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20\text{ s}$ ,  $G_F=60\text{ s}^{-1}$ ,  $T_F=20\text{ min}$ ,  $R=10\%$ , Pressão de saturação=450 kPa, temperatura=25 °C.

TABELA 5.5 – Resumo dos melhores resultados referentes aos ensaios de FAD conjugada à oxidação (ensaios Tipo 2). Condições de Ensaio: Tipo 2, DCL=2,7 mg/L,  $G_{DO}=150\text{ s}^{-1}$ ,  $T_{DO}=5\text{ min}$ ,  $G_{MR}=800\text{ s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20\text{ s}$ ,  $G_F=60\text{ s}^{-1}$ ,  $T_F=20\text{ min}$ ,  $R=10\%$ , Pressão de saturação=450 kPa, temperatura=25 °C.

	DCF = 0 mg/L	DCF = 15 mg/L	DCF = 20 mg/L	DCF = 25 mg/L	DCF = 30 mg/L	DCF = 35 mg/L
pH de oxidação	7,46	6,31	7,46	7,46	7,46	7,99
pH após coagulação	7,96	6,24	6,83	6,7	6,57	6,57
Potencial zeta (mV)	- 14,7	- 9,2	- 9,3	- 13,2	- 9,1	- 8,3
Vel. de Flotação (cm/min)	12	12	12	12	12	12
Turbidez após flot. (uT)	8,98	1,71	4,69	2,63	1,59	1,06
Cor após flotação (uC)	113	63	21	15	16	5
Fe após flotação (mg/L) D/ND	0,89/060	0,17/nd	0,24/0,12	0,25/0,07	0,25/0,05	0,30/0,08
Mn após flotação (mg/L) D/ND	0,12/0,14	0,06/0,07	0,10/0,15	0,12/0,16	0,15/0,16	0,14/0,15

### 5.1.3. Ensaio Tipo 3 – Aplicação do Oxidante Após a Clarificação por Flotação

Os resultados dos ensaios apresentados nesse item foram obtidos através da aplicação do oxidante (hipoclorito de sódio) com dosagem de 2,7 mg/L, após a clarificação por FAD. Após a coleta da amostra referente à velocidade de flotação de 12 cm/min, foi realizada a inserção do oxidante, com tempo de reação de 10 minutos. Na seqüência as amostras foram submetidas à filtração em filtro de papel 8  $\mu$ m (Whatman 40). As determinações das concentrações residuais de ferro, manganês, turbidez e cor aparente foram realizadas nas amostras após clarificação por FAD e após oxidação/filtração.

Os resultados apresentam-se nas Tabelas 5.6, 5.7 e Gráficos 5.11 a 5.14.

Analisando-se a Tabela 5.6, nota-se que para a DCF = 15 mg/L, os valores de ferro e manganês residuais após digestão química apresentaram-se, após a FAD, para o valor de pH = 6,6, com concentração de 0,20 mg/L para o ferro total e 0,09 mg/L para o manganês total, abaixo dos limites permitidos (0,30 mgFe/L e 0,10 mgMn/L). Após a filtração em filtro de papel 8  $\mu$ m (Whatman 40), o ferro total residual esteve dentro do padrão de potabilidade para valores de pH de 6,0 e 6,6, correspondentes a concentrações de 0,16 mgFe/L.

No caso do manganês, após a filtração e para valores de pH superiores a 6,6, as concentrações apresentaram-se dentro do padrão de potabilidade. É interessante observar a eficiência de remoção de manganês total residual após a FAD para os valores de pH de 6,0 e 6,6 e após a filtração também.

Para os valores de pH de 7,2 e 8,2, os valores de manganês total residual apresentaram-se com concentrações de 0,16 e 0,11 mg/L respectivamente. No entanto, após a oxidação e filtração, o manganês apresentou-se com concentrações muito baixas (menores que 0,02 mg/L). Isso indica que, para as condições do ensaio Tipo 3, valores elevados de pH são mais eficientes na oxidação-remoção do manganês.

Com relação ao ferro, valores de pH mais baixos apresentaram resultados mais eficientes. Para os valores de pH de 6,0 e 6,6 após a clarificação por FAD, o ferro residual total apresentou-se com concentrações de 0,30 e 0,20 mg/L respectivamente e após a oxidação-filtração no valor de 0,16 mg/L. Já para os valores mais elevados de pH, como 6,9, 7,1, 7,2 e 8,2, as concentrações apresentaram-se também com valores mais elevados, entre 0,38 e 1,62 mg/L e após a oxidação-filtração, valores entre 0,37 e 0,81 mg/L.

Para a DCF de 30 mg/L, após a clarificação por FAD, nenhum dos valores referentes ao ferro apresentaram-se abaixo do limite estabelecido (0,30 mg/L). No entanto, após a oxidação-filtração, as concentrações apresentaram-se abaixo do limite para os seguintes valores de pH: 6,5; 6,7; 6,8 e 7,0.

Com relação ao manganês total residual, após a oxidação-filtração, as concentrações foram menores que o limite máximo permitido (0,10 mg/L) para todos os valores de pH, exceto para o valor de pH = 6,5.

Como dosagem mais adequada para o ensaio Tipo 3, selecionou-se a DCF de 30 mg/L, pois, a análise de todos os valores de pH estudados mostrou que essa dosagem proporcionou os melhores resultados de remoção, tanto do ferro quanto do manganês. Selecionou-se, portanto, o valor de pH de 7,0, pois apresentou os menores valores de ferro e manganês residuais, 0,16 mgFe/L e manganês não detectado, além de apresentar cor aparente residual com 11 uC e turbidez de 1,05 uT.

A Tabela 5.8 apresenta um resumo dos melhores resultados obtidos nos três tipos de ensaios e, nesse contexto, BENEFIELD & MORGAN (1990) relataram que o momento mais apropriado para a aplicação do oxidante é antes da adição de qualquer produto químico.

No presente estudo, verificou-se que, aplicado o oxidante 5 minutos antes do coagulante (ensaios Tipo 2), a eficiência foi inferior à obtida quando aplicados juntos, no momento da mistura rápida (ensaios Tipo 1), como verificado na Tabela 5.8.

Selecionou-se, portanto, os ensaios Tipo 1 como os que apresentaram os melhores resultados de remoção de turbidez, cor, ferro e manganês. A Tabela 5.8 apresenta um resumo dos melhores resultados obtidos nos ensaios Tipo 1, Tipo 2 e Tipo 3.

TABELA 5.6 – Resultados referentes aos ensaios de FAD conjugada à oxidação (ensaios Tipo 3) em diferentes valores de pH e diferentes dosagens de cloreto férrico (DCF). Condições de Ensaio: Tipo 3, DCL=2,7mg/L,  $G_{MR}=800s^{-1}$ ,  $T_{MR}=20s$ ,  $G_F=60s^{-1}$ ,  $T_F=20min$ , R=10%, Pressão de saturação=450kPa, temperatura=25°C.

	DCF = 15 mg/L					
pH de oxidação	5,97	6,64	6,88	7,12	7,22	8,21
pH após coagulação	5,97	6,64	6,88	7,12	7,22	8,21
Potencial Zeta (mV)	-8,1	-5,8	-9,1	-9,4	-9,4	-11,2
Mobilidade Eletroforética	-0,664	-0,478	-0,754	-0,778	-0,776	-0,912
Cor após Mistura Rápida (uC)	213	143	214	212	151	146
Turbidez após Mistura Rápida (uT)	14,5	14,5	13,7	14,6	15,3	15,5
Velocidade de Flotação (cm/min)	12	12	12	12	12	12
Turbidez após flotação (uT)	0,87	0,89	0,97	1,38	1,41	9,04
Cor após flotação (uC)	10	14	12	22	26	111
Fe após flotação (mg/L) D/ND	0,34/nd	0,20/0,01	0,48/0,06	0,38/0,35	0,94/0,31	1,62/0,58
Mn após flotação (mg/L) D/ND	0,06/0,07	0,09/0,10	0,18/0,14	0,11/0,09	0,16/0,12	0,11/0,01
Turbidez após oxidação seguida de filtração (uT)	0,84	0,93	1,51	2,97	1,07	1,19
Cor após oxidação seguida de filtração (uC)	17	12	63	88	14	11

Fe após oxidação seguida de filtração (mg/L) D/ND	0,16/nd	0,16/nd	0,37/nd	0,38/nd	0,57/nd	0,81/nd	
Mn após oxidação seguida de filtração (mg/L) D/ND	0,17/0,10	0,09/0,08	0,13/0,06	0,16/0,08	nd/nd	0,02/nd	
<b>DCF = 30 mg/L</b>							
pH de oxidação	5,47	6,36	6,51	6,67	6,76	7,04	8,44
pH após coagulação	5,47	6,36	6,51	6,67	6,76	7,04	8,44
Potencial Zeta (mV)	17,1	9,8	6,6	-0,4	-4,3	-6,9	-9,4
Mobilidade Eletroforética	1,417	0,798	0,538	-0,034	-0,353	-0,564	-0,796
Cor após Mistura Rápida (uC)	220	194	156	251	175	211	235
Turbidez após Mistura Rápida (uT)	15,1	15,3	14,1	16,9	16,4	15,9	14,4
Velocidade de Flotação (cm/min)	12	12	12	12	12	12	12
Turbidez após flotação (uT)	2,56	0,67	0,72	1,18	1,23	1,13	5,71
Cor após flotação (uC)	75	8	9	16	15	12	67
Fe após flotação (mg/L) D/ND	1,44/1,75	0,70/0,01	1,59/nd	0,56/0,06	0,32/0,06	0,40/0,18	2,78/2,11
Mn após flotação (mg/L) D/ND	0,07/0,08	0,15/0,13	0,09/0,12	0,19/0,13	0,11/0,15	0,10/0,14	0,20/0,17
Turbidez após oxidação seguida de filtração (uT)	1,25	1,23	2,24	1,16	1,15	1,05	1,52
Cor após oxidação seguida de filtração (uC)	20	14	43	14	17	11	11
Fe após oxidação seguida de filtração (mg/L) D/ND	0,46/nd	0,96/nd	0,22/nd	0,19/nd	0,23/nd	0,16/nd	0,69/nd
Mn após oxidação seguida de filtração (mg/L) D/ND	nd/nd	0,01/nd	0,12/0,02	nd/nd	nd/nd	nd/nd	0,02/0,02



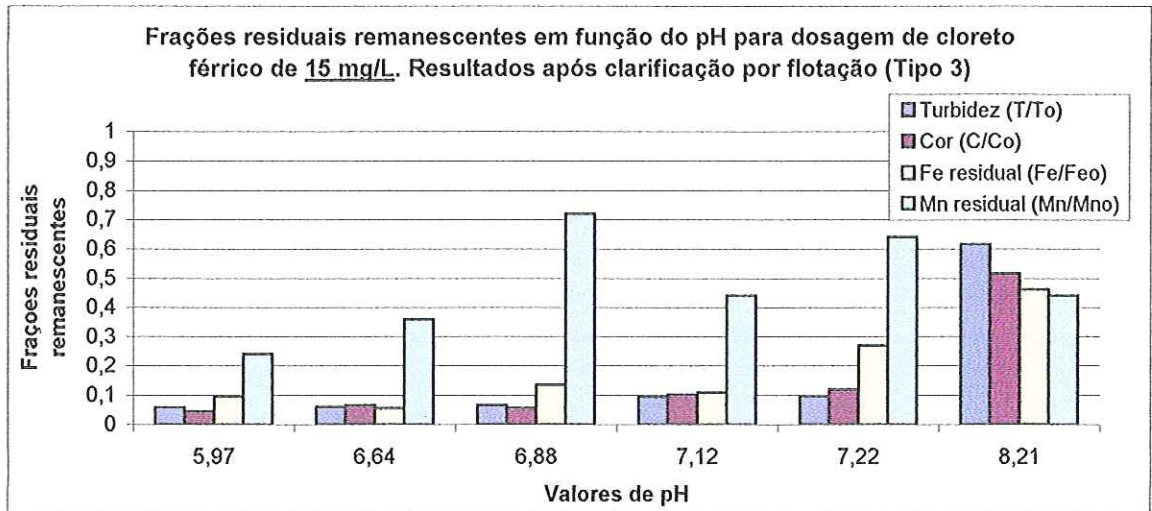


GRÁFICO 5.11 – Frações residuais remanescentes de turbidez, cor, ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 3, sem oxidação. Condições de Ensaio: Tipo 3,  $DCF=15\text{mg/L}$ ,  $DCI=2,7\text{mg/L}$ ,  $G_{MR}=800\text{s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20\text{s}$ ,  $G_F=60\text{s}^{-1}$ ,  $T_F=20\text{min}$ ,  $R=10\%$ , Pressão de saturação= $450\text{kPa}$ , temperatura= $25^\circ\text{C}$ .

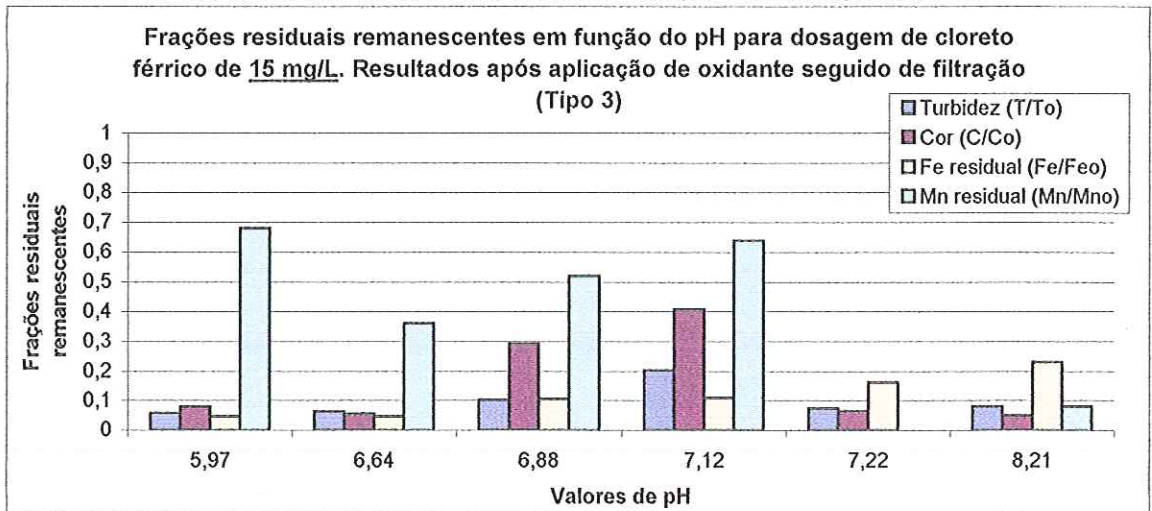


GRÁFICO 5.12 – Frações residuais remanescentes de turbidez, cor, ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 3, após oxidação seguida de filtração. Condições de Ensaio: Tipo 3,  $DCF=15\text{mg/L}$ ,  $DCI=2,7\text{mg/L}$ ,  $G_{DO}=150\text{s}^{-1}$ ,  $T_{DO}=5\text{min}$ ,  $G_{MR}=800\text{s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20\text{s}$ ,  $G_F=60\text{s}^{-1}$ ,  $T_F=20\text{min}$ ,  $R=10\%$ , Pressão de saturação= $450\text{kPa}$ , temperatura= $25^\circ\text{C}$ .

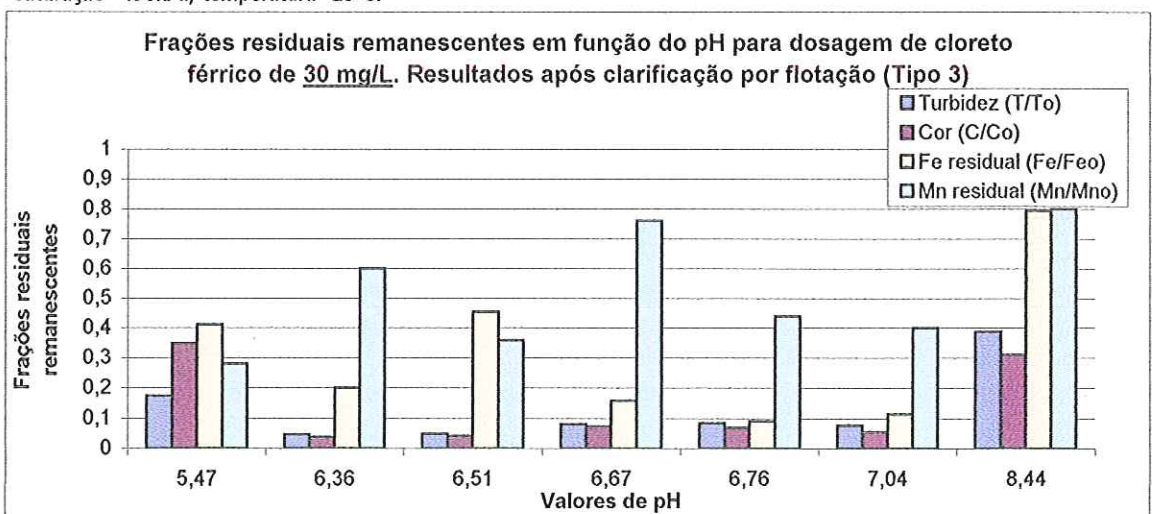


GRÁFICO 5.13 – Frações residuais remanescentes de turbidez, cor, ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 3, sem oxidação. Condições de Ensaio: Tipo 3,  $DCF=30\text{mg/L}$ ,  $DCI=2,7\text{mg/L}$ ,  $G_{MR}=800\text{s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20\text{s}$ ,  $G_F=60\text{s}^{-1}$ ,  $T_F=20\text{min}$ ,  $R=10\%$ , Pressão de saturação= $450\text{kPa}$ , temperatura= $25^\circ\text{C}$ .

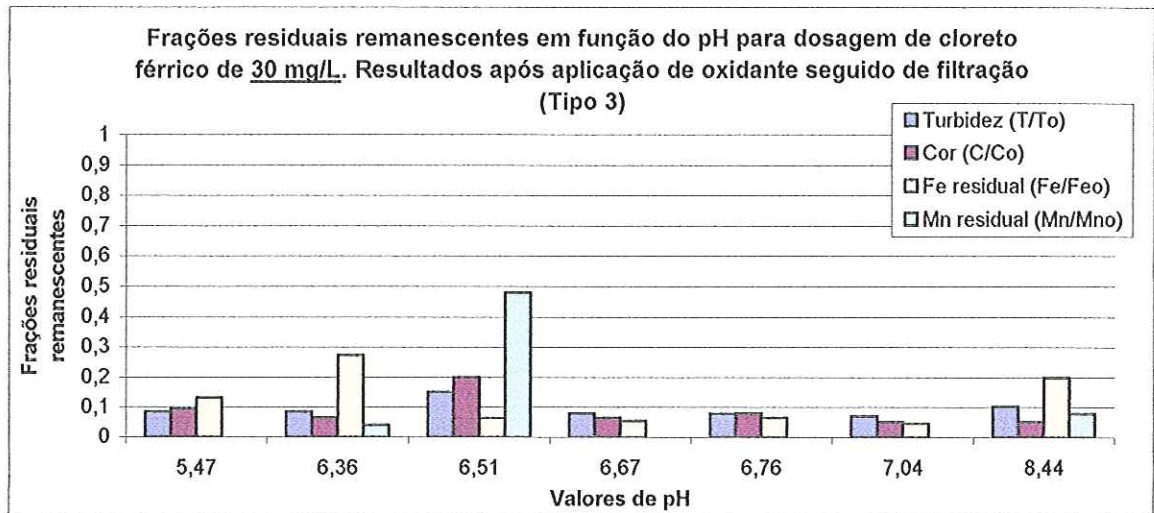


GRÁFICO 5.14 – Frações residuais remanescentes de turbidez, cor, ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 3, após oxidação seguida de filtração. Condições de Ensaio: Tipo 3, DCF=30mg/L, DCL=2,7mg/L,  $G_{DO}=150s^{-1}$ ,  $T_{DO}=5min$ ,  $G_{MR}=800s^{-1}$ ,  $T_{MR}=20s$ ,  $G_F=60s^{-1}$ ,  $T_F=20min$ ,  $R=10\%$ , Pressão de saturação=450kPa, temperatura=25°C.

TABELA 5.7 – Resumo dos melhores resultados referentes aos ensaios de FAD conjugada à oxidação (ensaios Tipo 3). Condições de Ensaio: Tipo 3, DCL=2,7mg/L,  $G_{MR}=800s^{-1}$ ,  $T_{MR}=20s$ ,  $G_F=60s^{-1}$ ,  $T_F=20min$ ,  $R=10\%$ , Pressão de saturação=450kPa, temperatura=25°C.

	DCF = 15 mg/L	DCF = 30 mg/L
pH de oxidação	6,64	7,04
pH após coagulação	6,64	7,04
Potencial zeta (mV)	-5,8	-6,9
Velocidade de Flotação (cm/min)	12	12
Turbidez após flotação (uT)	0,89	1,13
Cor após flotação (uC)	14	12
Fe após flotação (mg/L) D/ND	0,20/0,01	0,40/0,18
Mn após flotação (mg/L) D/ND	0,09/0,10	0,10/0,14
Turbidez após oxidação seguida de filtração (uT)	0,93	1,05
Cor após oxidação seguida de filtração (uC)	12	11
Fe após oxidação seguida de filtração (mg/L) D/ND	0,16/nd	0,16/nd
Mn após oxidação seguida de filtração (mg/L) D/ND	0,09/0,08	nd/nd

TABELA 5.8 – Resumo dos melhores resultados referentes aos ensaios de FAD conjugada à oxidação (ensaios Tipo 1, 2 e 3). Condições de Ensaio: DCL=2,7mg/L,  $G_{MR}=800s^{-1}$ ,  $T_{MR}=20s$ ,  $G_F=60s^{-1}$ ,  $T_F=20min$ ,  $R=10\%$ , Pressão de saturação=450kPa, temperatura=25°C.

	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
Dosagem cloreto férrico (mg/L)	30	30	30
pH de oxidação	5,85	7,46	7,04
pH após coagulação	5,85	6,57	7,04
Potencial zeta (mV)	-7,2	-9,1	-6,9
Turbidez oxid/flot (uT)	0,71	1,59	1,13
Cor oxid/flot (uC)	< 2	16	12
Fe oxid/flot (mg/L) D/ND	0,25/0,04	0,25/0,05	0,40/0,18
Mn oxid/flot (mg/L) D/ND	0,08/0,09	0,15/0,16	0,10/0,14
Turbidez flot/oxid/fil (mg/L)	-	-	1,05
Cor flot/oxid/fil (mg/L)	-	-	11
Fe flot/oxid/fil (mg/L) D/ND	-	-	0,16/nd
Mn flot/oxid/fil (mg/L) D/ND	-	-	nd/nd

## 5.2. ENSAIOS COM VARIAÇÃO DA DOSAGEM DO OXIDANTE

Para todos os ensaios, Tipo 1, 2 e 3, selecionou-se a DCF de 30 mg/L como a mais adequada para a água de estudo e, na seqüência, procedeu-se repetição dos ensaios variando-se a dosagem de oxidante aplicada 1,3, 2,7 e 4,0 mg/L. Todos os ensaios, correspondentes aos diferentes momentos de aplicação do oxidante (Tipo 1, 2 e 3) foram submetidos à filtração em papel de filtro (Whatman 40) após a FAD. O monitoramento dos ensaios foi realizado após a clarificação por FAD e após a oxidação/filtração. As Tabelas 5.9 e 5.10 apresentam os resultados dos ensaios.

É possível observar que tanto os ensaios Tipo 1 quanto os ensaios Tipo 2 apresentaram resultados muito satisfatórios após a filtração. Após a FAD observou-se que o aumento na dosagem de oxidante trouxe prejuízo nos resultados, como aumento de turbidez e cor.

Selecionou-se os ensaios Tipo 1 como os que, de maneira geral, apresentaram os melhores resultados. A remoção de ferro total residual, após a FAD, esteve entre 80 e 90%, correspondendo a concentrações de 0,33 e 0,73 mg/L respectivamente. As parcelas de ferro detectadas sem digestão química (ND) apresentaram resultados bastante satisfatórios, indicando melhores resultados em dosagens mais elevadas de oxidante. Isso possivelmente relaciona-se à remoção das formas de ferro como precipitados de hidróxidos.

A remoção de manganês residual total apresentou eficiência de 36 a 56% da concentração total presente, indicando que o processo de FAD juntamente com a oxidação química remove parte dos óxidos de manganês presentes, como precipitados ou colóides.

Após a filtração em papel de filtro 8  $\mu\text{m}$  (Whatman 40), estranhamente verificou-se pequeno aumento nos valores de turbidez residual para os ensaios Tipo 1 e dosagem de 1,3 mg/L (0,86 uT após a FAD e 1,25 uT após a filtração).

Para a dosagem de oxidante de 1,3 mg/L e ensaio Tipo 1, observou-se queda na eficiência da remoção de cor aparente residual (de 2 uC para 10 uC), sendo que para as dosagens de 2,7 e 4,0 mg/L a cor aparente residual apresentou os melhores resultados após filtração (7 e 6 uC, respectivamente).

Quanto ao ferro e o manganês, observa-se que as concentrações atingiram níveis tão baixos que não foram detectados pelo espectrofotômetro de absorção atômica, tanto para os ensaios Tipo 1 quanto para o Tipo 2, após a filtração. Isso indica que as concentrações foram menores que 0,005 mg/L (para o ferro) e menores que 0,03 mg/L (para o manganês), pois esses valores correspondem aos limites de detecção do espectrofotômetro de absorção atômica.

Selecionou-se, portanto, a dosagem de oxidante de 2,7 mg/L como a mais adequada para a água em estudo e o ensaio Tipo 1, que de maneira geral, apresentou os melhores resultados.

TABELA 5.9 – Resultados referentes aos ensaios de FAD conjugada à oxidação para DCF=30mg/L, em diferentes valores de pH e diferentes dosagens de oxidante. Condições de Ensaio: DCF=30mg/L, DCL=2,7mg/L,  $G_{MR}=800s^{-1}$ ,  $T_{MR}=20s$ ,  $G_F=60s^{-1}$ ,  $T_F=20min$ ,  $R=10\%$ , Pressão de saturação=450kPa, temperatura=25°C.

<b>Ensaio Tipo 1</b>			
Dosagem Ca(OH) <sub>2</sub> (mg/L)	0	0	0
Dosagem Oxidante (mg/L)	1,3	2,7	4,0
Tempo oxidação total* (minutos)	20	20	20
pH após coagulação	5,74	5,80	5,83
Velocidade de flotação (cm/min)	12	12	12
Turbidez após flotação (uT)	0,86	1,04	1,56
Cor após flotação (uC)	<2	<2	45
Fe após flotação (mg/L) D/ND	0,73/0,19	0,33/nd	0,43/0,04
Mn após flotação (mg/L) D/ND	0,16/0,10	0,11/0,08	0,15/0,14
Turbidez após filtração (uT)	1,25	1,20	1,60
Cor após filtração (uC)	10	7	6
Fe após filtração (mg/L) D/ND	nd/nd	nd/nd	nd/nd
Mn após filtração (mg/L) D/ND	nd/nd	nd/nd	nd/nd
<b>Ensaio Tipo 2</b>			
Dosagem Ca(OH) <sub>2</sub> (mg/L)	15	15	15
Dosagem Oxidante (mg/L)	1,3	2,7	4,0
Tempo oxidação total* (minutos)	25	25	25
pH após coagulação	6,70	6,84	6,90
Velocidade de flotação (cm/min)	12	12	12
Turbidez após flotação (uT)	0,82	1,21	1,25
Cor após flotação (uC)	4	17	7
Fe após flotação (mg/L) D/ND	0,36/0,05	0,24/0,07	0,22/0,12
Mn após flotação (mg/L) D/ND	0,16/0,18	0,11/0,06	0,09/0,09
Turbidez após filtração (uT)	1,20	0,90	0,90
Cor após filtração (uC)	10	4	5
Fe após filtração (mg/L) D/ND	nd/nd	nd/nd	nd/nd
Mn após filtração (mg/L) D/ND	nd/nd	nd/nd	nd/nd
<b>Ensaio Tipo 3</b>			
Dosagem Ca(OH) <sub>2</sub> (mg/L)	15	15	15
Dosagem Oxidante (mg/L)	1,3	2,7	4,0
Tempo oxidação total** (minutos)	10	10	10
pH após coagulação	6,82	6,85	6,90
Velocidade de flotação (cm/min)	12	12	12
Turbidez após flotação (uT)	0,88	0,96	1,09
Cor após flotação (uC)	9	9	11
Fe após flotação (mg/L) D/ND	0,49/0,24	0,46/0,35	0,53/0,30
Mn após flotação (mg/L) D/ND	0,19/0,16	0,26/0,19	0,23/0,17
Fe após filtração (mg/L) D/ND	0,32/nd	0,19/nd	0,27/nd
Mn após filtração (mg/L) D/ND	0,18/0,14	0,23/0,17	0,25/0,17
Turbidez após oxidação e filtração (uT)	1,63	1,42	1,10
Cor após oxidação e filtração (uC)	14	10	5
Fe após oxidação e filtração (mg/L) D/ND	0,30/nd	0,20/nd	0,25/nd
Mn após oxidação/filtração (mg/L) D/ND	0,03/0,01	0,03/0,01	0,01/0,01

\*Tempo de oxidação total: corresponde ao tempo da adição do oxidante até a flotação.

\*\* Tempo de oxidação total: corresponde ao tempo da adição do oxidante até a filtração.

TABELA 5.10 – Resumo dos melhores resultados referentes aos ensaios de FAD conjugada à oxidação para DCF=30mg/L em diferentes dosagens de oxidante. Condições de Ensaio: DCF=30mg/L, DCL=2,7mg/L,  $G_{MR}=800s^{-1}$ ,  $T_{MR}=20s$ ,  $G_F=60s^{-1}$ ,  $T_F=20min$ ,  $R=10\%$ , Pressão de saturação=450kPa, temperatura=25°C.

	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
Dosagem Ca(OH) <sub>2</sub> mg/L	0	15	15
Dosagem Oxidante (mg/L)	2,7	2,7	4,0
Tempo de oxidação total (min)	20	25	10
pH após coagulação	5,8	6,84	6,9
Velocidade de flotação (cm/min)	12	12	12
Turbidez após flotação (uT)	1,04	1,21	1,09
Cor após flotação (uC)	< 2	17	11
Fe após flotação (mg/L) D/ND	0,33/nd	0,24/0,07	0,53/0,30
Mn após flotação (mg/L) D/ND	0,11/0,08	0,11/0,06	0,23/0,17
Fe após flot/filt (mg/L) D/ND	-	-	0,27/ nd
Mn após flot/filt (mg/L) D/ND	-	-	0,25/0,17
Turbidez após (oxidação)* filtração (uT)	1,20	0,90	1,10
Cor após (oxidação)* filtração (uC)	7	4	5
Fe após (oxidação)* filtração (mg/L) D/ND	nd/nd	nd/nd	0,25/ nd
Mn após (oxidação)* filtração (mg/L) D/ND	nd/nd	nd/nd	0,01/0,01

(oxidação)\* - válido apenas para Ensaios Tipo 3.

### 5.3. ENSAIOS PARA ADEQUAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE FLOCULAÇÃO PARA FLOTAÇÃO

Após o estudo dos ensaios Tipo 1, 2 e 3, selecionou-se o modo de aplicação de oxidante Tipo 1 como o mais adequado para a água de estudo (aplicação do oxidante no mesmo momento que o coagulante) e as melhores condições de ensaios: pH = 6,2, potencial zeta (mV) =  $-5,8 \pm 0,9$ , com DCF = 30 mg/L para água com 3,5/4,5 mgFe/L, 0,2/0,3 mgMn/L, 5 mg/L de ácido húmico, cor = 215 uC e turbidez = 14,1 uT. Nessas condições deu-se início ao estudo de floculação, com vistas a adequá-lo ao processo de flotação.

Os ensaios anteriores foram realizados em parceria com o então mestrando Rodrigo Braga Moruzzi e os resultados apresentados neste trabalho foram os obtidos na velocidade de 12 cm/min, pois os demais, ou seja, os obtidos nas velocidades de 5, 18, 25 e 30 cm/min estão devidamente apresentados na dissertação do referido aluno (MORUZZI, 2000). \*

A partir deste item (5.3.), os ensaios pertenceram exclusivamente ao escopo da presente tese e os resultados são apresentados em todas as velocidades de flotação estudadas, conforme a Tabela 5.11 demonstra.

Através da análise da Tabela 5.11 e dos Gráficos 5.15 a 5.26, é possível observar que o aumento na eficiência do processo em relação à variação do gradiente médio de velocidade de floculação ( $G_F$ ) associado à variação do tempo de floculação em minutos não foi tão significativo para turbidez e cor aparente, pois todos os valores de  $G_F$  ( $s^{-1}$ ) e tempos de floculação estudados forneceram resultados muito bons. No entanto, é possível observar que os ensaios utilizando  $G_F=40 s^{-1}$  associados a tempo de floculação de 5 e 10 minutos, apresentaram eficiência ligeiramente menor.

Analisando-se as concentrações de ferro e manganês, observa-se influência do tempo e do gradiente médio de velocidade de floculação na remoção destes metais. Nota-se que, para  $G_F = 40 \text{ s}^{-1}$ , o ferro total residual apresentou-se com concentração entre 0,50 a 0,59 mg/L até 25 minutos de floculação, reduzindo para concentração de 0,39 mg/L somente com 30 minutos de floculação. Verificando-se agora  $G_F = 60 \text{ s}^{-1}$ , observa-se que a concentração de ferro total residual ficou entre 0,54 e 0,57 mg/L para 5 e 10 minutos de floculação, caindo para 0,38 mg/L quando utilizados 15 minutos e para 0,29 mg/L, com 20 minutos de floculação.

Observando-se os valores altos de gradiente médio de velocidade estudados como  $G_F$  de 70 e  $80 \text{ s}^{-1}$  verifica-se, novamente que, as concentrações de ferro e de manganês diminuíram um pouco quando com 15 minutos de floculação e, para 20 minutos de floculação, a redução foi maior, com concentração de ferro entre 0,25 e 0,27 mg/L e de manganês entre 0,10 e 0,15 mg/L.

Portanto, para a remoção de ferro e manganês, tem grande influência o tempo de floculação aliado ao gradiente médio de velocidade utilizado.

Os valores de  $G_F$  de 60, 70 e  $80 \text{ s}^{-1}$  aliados a valores de tempos de floculação de 15, 20, 25 e 30 minutos apresentaram resultados muito satisfatórios. Selecionou-se uma faixa que varia entre  $G_F$  de 60 a  $80 \text{ s}^{-1}$ , associado ao tempo de floculação de 20 minutos, como os resultados ligeiramente melhores que os demais.

O Quadro 5.1 apresenta um resumo dos melhores resultados obtidos nos ensaios Tipo 1, 2 e 3, nos ensaios com variação da dosagem de oxidante e nos ensaios para estudo da floculação.

TABELA 5.11 - Resultados referentes aos ensaios de floculação para flotação conjugada à oxidação (ensaios Tipo1). Condições de ensaios: pH=6,2, potencial zeta (mV)=-5,8±0,9, DCF=30mg/L, DCL=2,7mg/L,  $G_{MR}=800\text{s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20\text{s}$ , R=10%, Pressão de saturação=450kPa, temperatura=25°C.

Velocidade de Flotação (cm/min)	Turbidez (uT)	Cor (uC)	Fe ND/D (mg/L)	Mn ND/D (mg/L)
<b>G= 40 s<sup>-1</sup> e Tempo de floculação = 5 minutos</b>				
6,0	1,3	3		
12,0	1,6	3	0,37/0,59	0,14/0,22
20,0	1,9	3		
30,0	2,8	19		
<b>G= 40 s<sup>-1</sup> e Tempo de floculação = 10 minutos</b>				
6,0	0,8	<2		
12,0	1,3	3	0,23/0,54	0,11/0,21
20,0	1,7	3		
30,0	2,7	10		
<b>G= 40 s<sup>-1</sup> e Tempo de floculação = 15 minutos</b>				
6,0	0,5	<2		
12,0	0,7	<2	0,19/0,50	0,09/0,19
20,0	1,0	<2		
30,0	2,7	10		
<b>G= 40 s<sup>-1</sup> e Tempo de floculação = 20 minutos</b>				
6,0	0,6	<2		
12,0	0,6	<2	0,03/0,57	0,04/0,21

20,0	0,7	<2		
30,0	2,4	13		
<b>G= 40 s<sup>-1</sup> e Tempo de floculação = 25 minutos</b>				
6,0	0,5	<2		
12,0	0,5	<2	0,13/0,55	0,14/0,22
20,0	1,1	<2		
30,0	2,0	17		
<b>G= 40 s<sup>-1</sup> e Tempo de floculação = 30 minutos</b>				
6,0	0,5	<2		
12,0	0,6	<2	0,13/0,39	0,05/0,18
20,0	1,1	3		
30,0	1,3	23		
<b>G= 60 s<sup>-1</sup> e Tempo de floculação = 5 minutos</b>				
6,0	1,2	<2		
12,0	1,3	3	0,35/0,57	0,10/0,16
20,0	1,3	3		
30,0	1,7	3		
<b>G= 60 s<sup>-1</sup> e Tempo de floculação = 10 minutos</b>				
6,0	0,9	<2		
12,0	0,9	3	0,14/0,54	0,07/0,17
20,0	1,1	3		
30,0	1,5	3		
<b>G= 60 s<sup>-1</sup> e Tempo de floculação = 15 minutos</b>				
6,0	0,8	<2		
12,0	0,8	<2	0,07/0,38	0,08/0,21
20,0	1,0	3		
30,0	2,4	4		
<b>G= 60 s<sup>-1</sup> e Tempo de floculação = 20 minutos</b>				
6,0	0,7	<2		
12,0	0,8	<2	0,04/0,29	0,10/0,14
20,0	1,1	<2		
30,0	1,8	<2		
<b>G= 60 s<sup>-1</sup> e Tempo de floculação = 25 minutos</b>				
6,0	0,5	<2		
12,0	0,6	<2	0,06/0,25	0,08/0,15
20,0	1,0	<2		
30,0	1,8	<2		
<b>G= 60 s<sup>-1</sup> e Tempo de floculação = 30 minutos</b>				
6,0	0,7	<2		
12,0	0,8	<2	0,04/0,29	0,04/0,10
20,0	1,1	<2		
30,0	1,4	<2		
<b>G= 70 s<sup>-1</sup> e Tempo de floculação = 5 minutos</b>				
6,0	0,9	<2		
12,0	1,1	3	0,31/0,56	0,08/0,18
20,0	1,3	3		
30,0	1,5	3		
<b>G= 70 s<sup>-1</sup> e Tempo de floculação = 10 minutos</b>				
6,0	0,6	<2		
12,0	0,8	<2	0,10/0,54	0,08/0,18
20,0	1,0	<2		
30,0	1,3	<2		
<b>G= 70 s<sup>-1</sup> e Tempo de floculação = 15 minutos</b>				
6,0	0,8	<2		
12,0	0,9	<2	0,10/0,37	0,09/0,15
20,0	1,0	<2		

30,0	2,3	3		
<b>G= 70 s<sup>-1</sup> e Tempo de floculação = 20 minutos</b>				
6,0	0,7	<2		
12,0	0,8	<2	0,05/0,27	0,09/0,15
20,0	1,0	<2		
30,0	1,8	<2		
<b>G= 70 s<sup>-1</sup> e Tempo de floculação = 25 minutos</b>				
6,0	0,6	<2		
12,0	0,7	<2	0,07/0,25	0,09/0,15
20,0	1,1	<2		
30,0	1,7	<2		
<b>G= 70 s<sup>-1</sup> e Tempo de floculação = 30 minutos</b>				
6,0	0,8	<2		
12,0	0,9	<2	0,06/0,25	0,08/0,15
20,0	1,2	<2		
30,0	1,7	<2		
<b>G= 80 s<sup>-1</sup> e Tempo de floculação = 5 minutos</b>				
6,0	0,7	<2		
12,0	0,7	<2	0,23/0,52	0,11/0,21
20,0	0,9	<2		
30,0	1,4	<2		
<b>G= 80 s<sup>-1</sup> e Tempo de floculação = 10 minutos</b>				
6,0	0,6	<2		
12,0	0,7	<2	0,18/0,57	0,09/0,18
20,0	0,7	<2		
30,0	1,2	<2		
<b>G= 80 s<sup>-1</sup> e Tempo de floculação = 15 minutos</b>				
6,0	0,8	<2		
12,0	1,0	<2	0,06/0,37	0,07/0,19
20,0	1,3	<2		
30,0	2,2	3		
<b>G= 80 s<sup>-1</sup> e Tempo de floculação = 20 minutos</b>				
6,0	0,6	<2		
12,0	0,7	<2	0,04/0,25	0,07/0,09
20,0	0,9	<2		
30,0	1,3	<2		
<b>G= 80 s<sup>-1</sup> e Tempo de floculação = 25 minutos</b>				
6,0	0,7	<2		
12,0	0,8	<2	0,08/0,27	0,04/0,10
20,0	1,2	<2		
30,0	1,8	<2		
<b>G= 80 s<sup>-1</sup> e Tempo de floculação = 30 minutos</b>				
6,0	0,9	<2		
12,0	0,9	<2	0,04/0,25	0,08/0,10
20,0	1,4	<2		
30,0	1,8	<2		



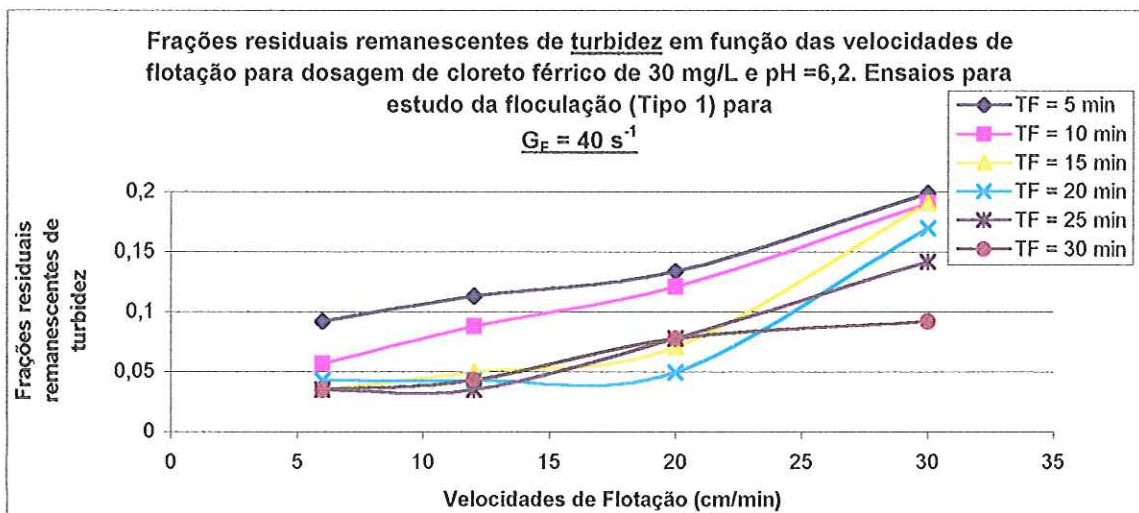


GRÁFICO 5.15 – Frações residuais remanescentes de turbidez para ensaios de flotação Tipo 1. Condições de Ensaio: Tipo 1, DCF=30mg/L, pH=6,2, DCI=2,7mg/L,  $G_{MR}=800\text{s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20\text{s}$ ,  $G_F=40\text{s}^{-1}$ , R=10%, Pressão de saturação=450kPa, temperatura=25°C.

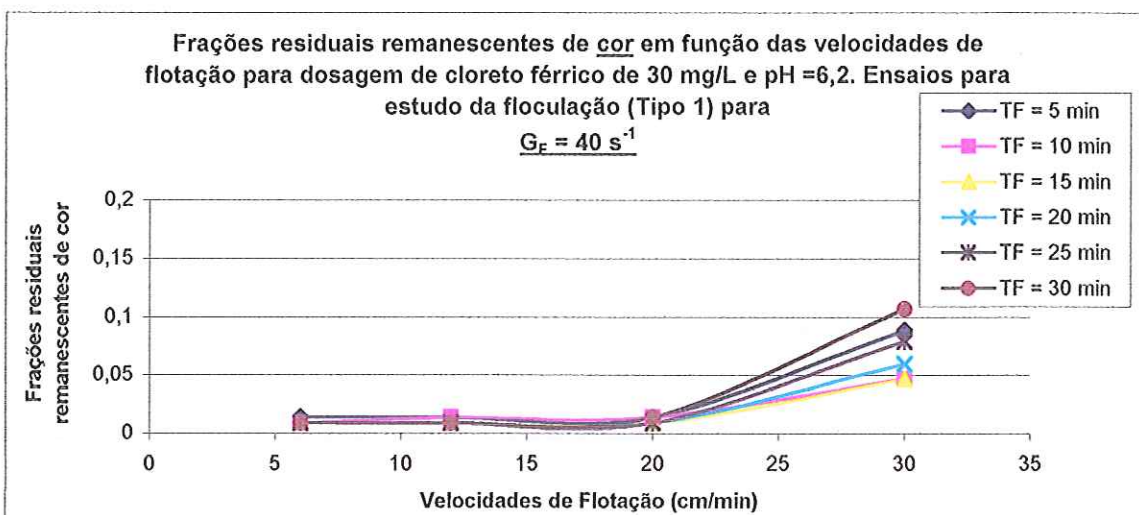


GRÁFICO 5.16 – Frações residuais remanescentes de cor para ensaios de flotação Tipo 1. Condições de Ensaio: Tipo 1, DCF=30mg/L, pH=6,2, DCI=2,7mg/L,  $G_{MR}=800\text{s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20\text{s}$ ,  $G_F=40\text{s}^{-1}$ , R=10%, Pressão de saturação=450kPa, temperatura=25°C.

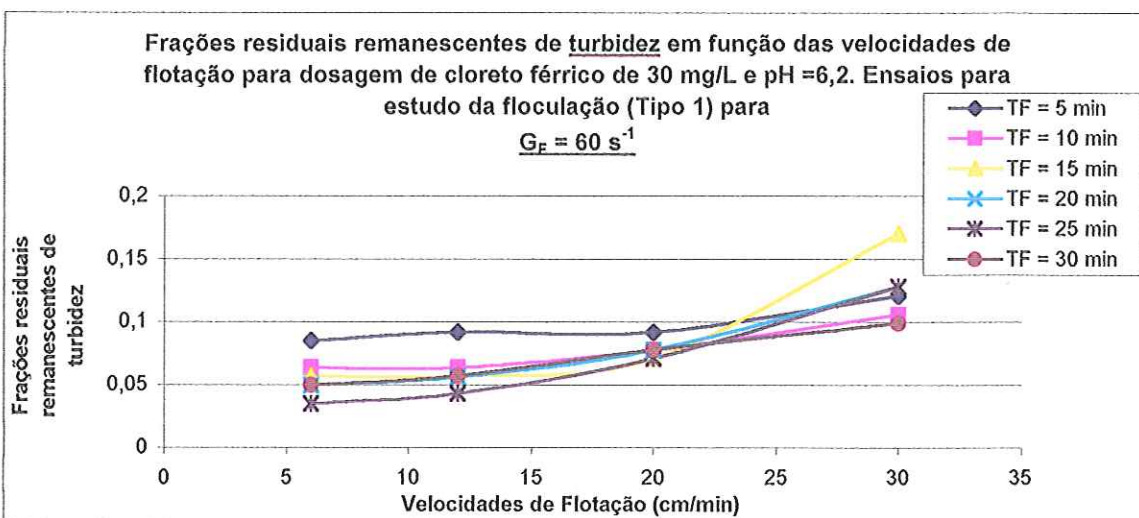


GRÁFICO 5.17 – Frações residuais remanescentes de turbidez para ensaios de flotação Tipo 1. Condições de Ensaio: Tipo 1, DCF=30mg/L, pH=6,2, DCI=2,7mg/L,  $G_{MR}=800\text{s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20\text{s}$ ,  $G_F=60\text{s}^{-1}$ , R=10%, Pressão de saturação=450kPa, temperatura=25°C.

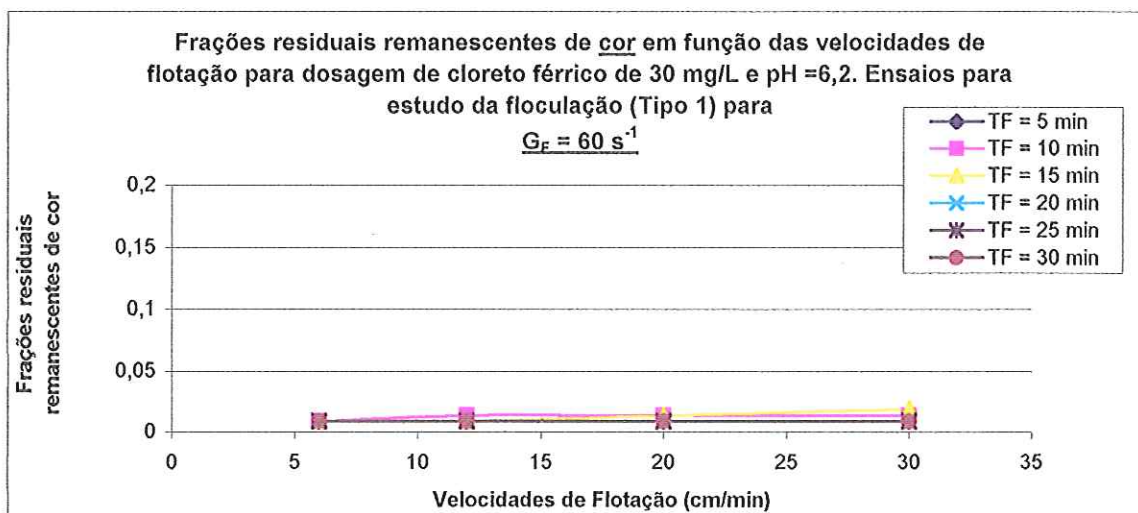


GRÁFICO 5.18 – Frações residuais remanescentes de cor para ensaios de flotação Tipo 1. Condições de Ensaio: Tipo 1, DCF=30mg/L, pH=6,2, DCI=2,7mg/L,  $G_{MR}=800\text{s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20\text{s}$ ,  $G_F=60\text{s}^{-1}$ ,  $R=10\%$ , Pressão de saturação=450kPa, temperatura=25°C.

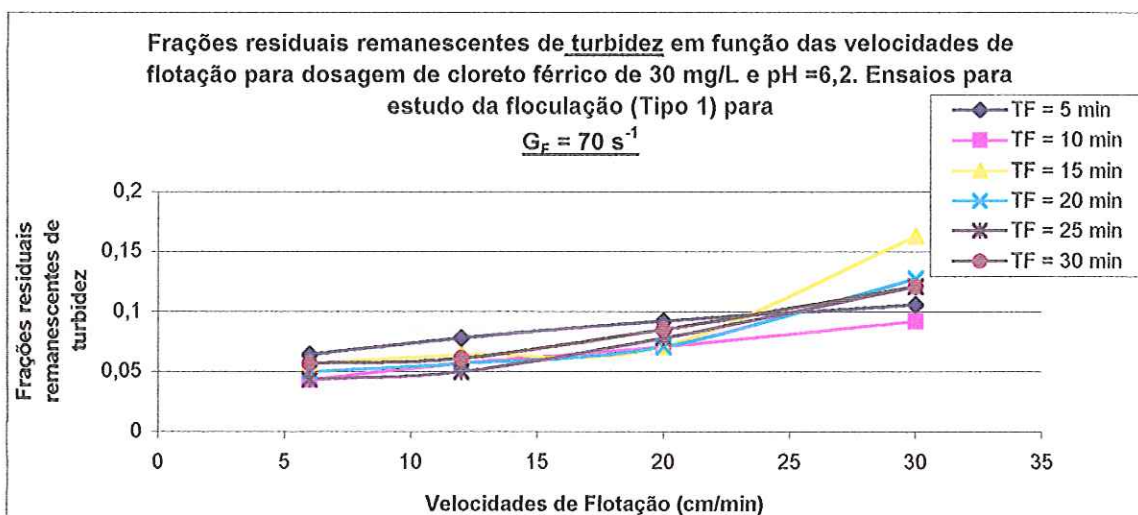


GRÁFICO 5.19 – Frações residuais remanescentes de turbidez para ensaios de flotação Tipo 1. Condições de Ensaio: Tipo 1, DCF=30mg/L, pH=6,2, DCI=2,7mg/L,  $G_{MR}=800\text{s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20\text{s}$ ,  $G_F=70\text{s}^{-1}$ ,  $R=10\%$ , Pressão de saturação=450kPa, temperatura=25°C.

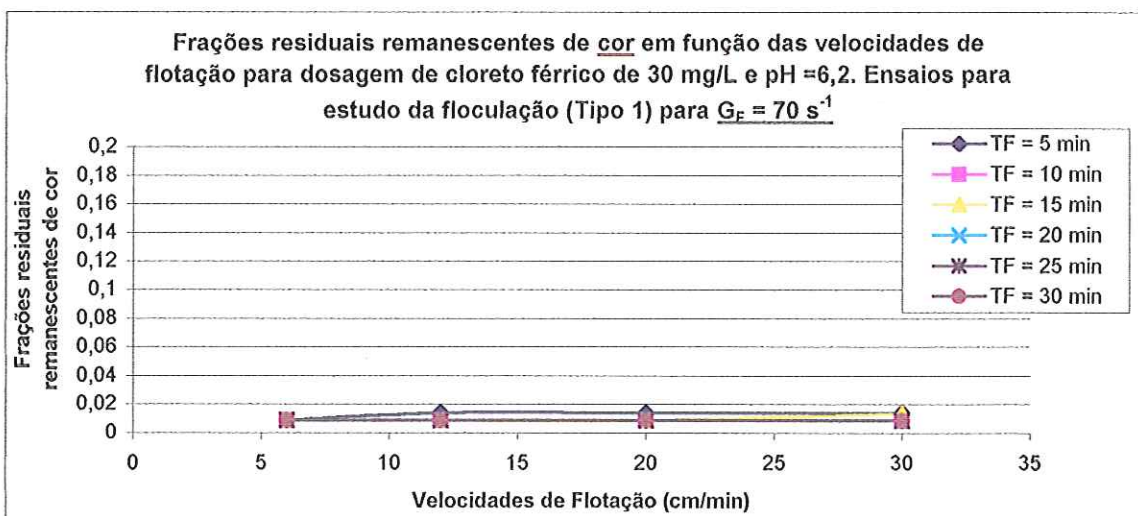


GRÁFICO 5.20 – Frações residuais remanescentes de cor para ensaios de flotação Tipo 1. Condições de Ensaio: Tipo 1, DCF=30mg/L, pH=6,2, DCI=2,7mg/L,  $G_{MR}=800\text{s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20\text{s}$ ,  $G_F=70\text{s}^{-1}$ ,  $R=10\%$ , Pressão de saturação=450kPa, temperatura=25°C.

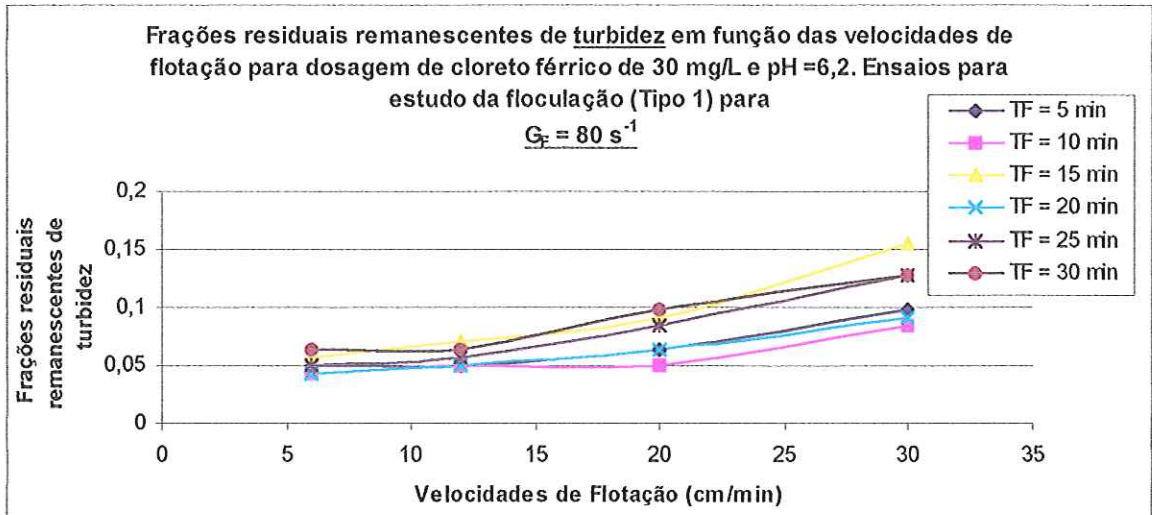


GRÁFICO 5.21 – Frações residuais remanescentes de turbidez para ensaios de flotação Tipo 1. Condições de Ensaio: Tipo 1, DCF=30mg/L, pH=6,2, DCI=2,7mg/L,  $G_{MR}=800\text{s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20\text{s}$ ,  $G_F=80\text{s}^{-1}$ , R=10%, Pressão de saturação=450kPa, temperatura=25°C.

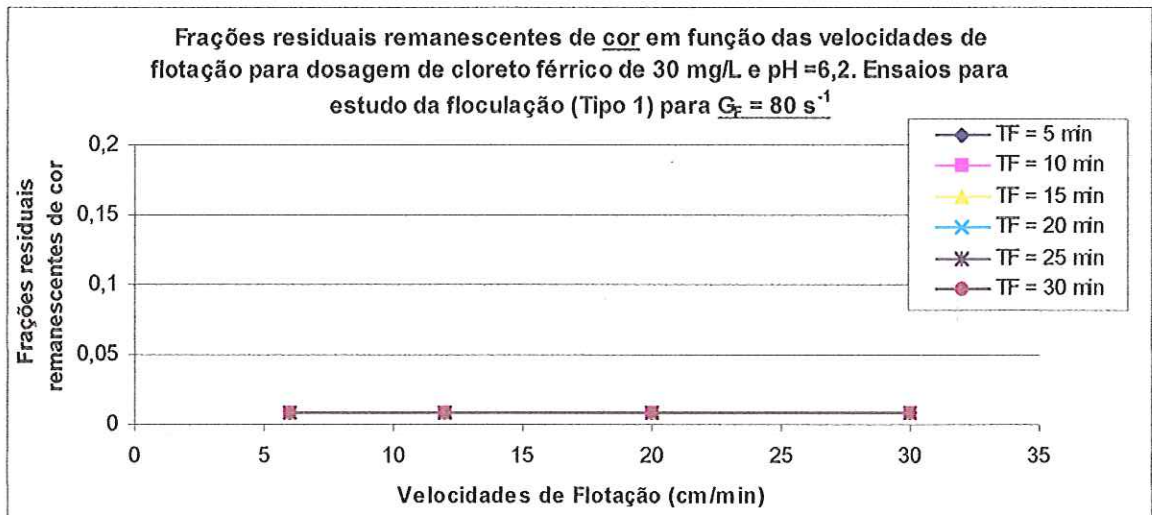


GRÁFICO 5.22 – Frações residuais remanescentes de cor para ensaios de flotação Tipo 1. Condições de Ensaio: Tipo 1, DCF=30mg/L, pH=6,2, DCI=2,7mg/L,  $G_{MR}=800\text{s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20\text{s}$ ,  $G_F=80\text{s}^{-1}$ , R=10%, Pressão de saturação=450kPa, temperatura=25°C.

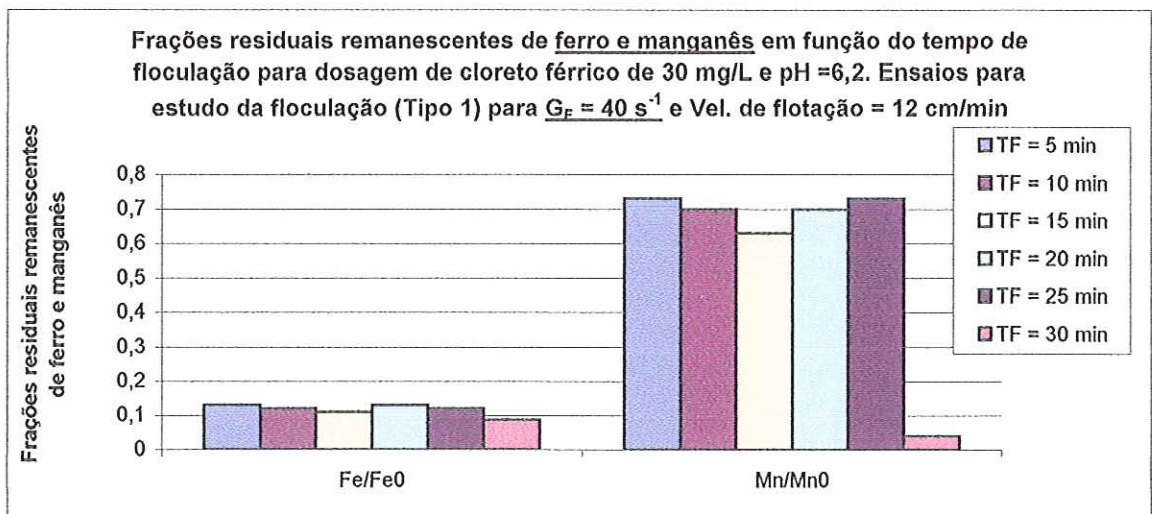


GRÁFICO 5.23 – Frações residuais remanescentes de ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 1. Condições de Ensaio: Tipo 1, DCF=30mg/L, pH=6,2, DCI=2,7mg/L,  $G_{MR}=800\text{s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20\text{s}$ ,  $G_F=40\text{s}^{-1}$ , R=10%, Pressão de saturação=450kPa, temperatura=25°C.

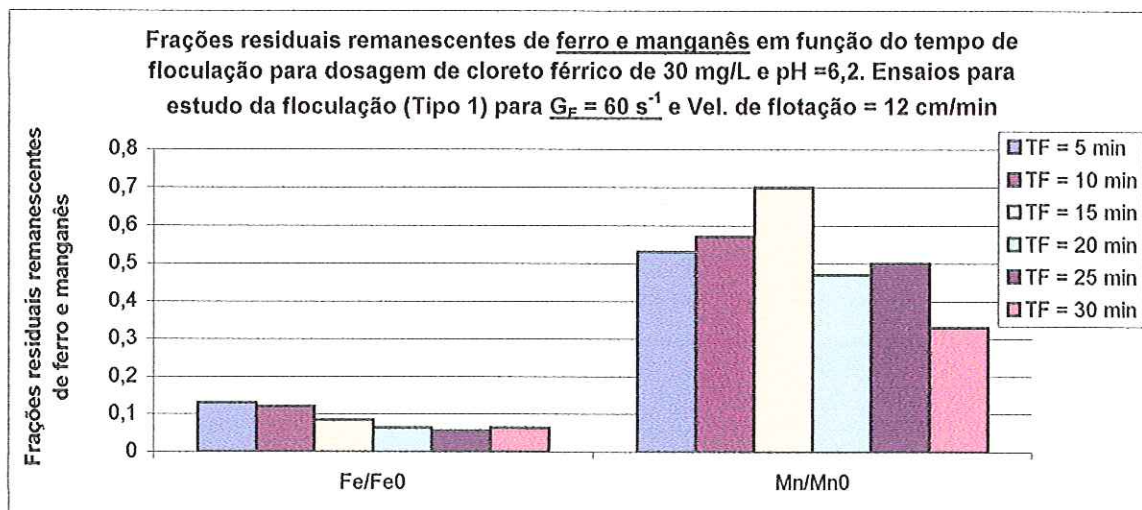


GRÁFICO 5.24 – Frações residuais remanescentes de ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 1. Condições de Ensaio: Tipo 1, DCF=30mg/L, pH=6,2, DCI=2,7mg/L,  $G_{MR}=800\text{s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20\text{s}$ ,  $G_F=60\text{s}^{-1}$ , R=10%, Pressão de saturação=450kPa, temperatura=25°C.

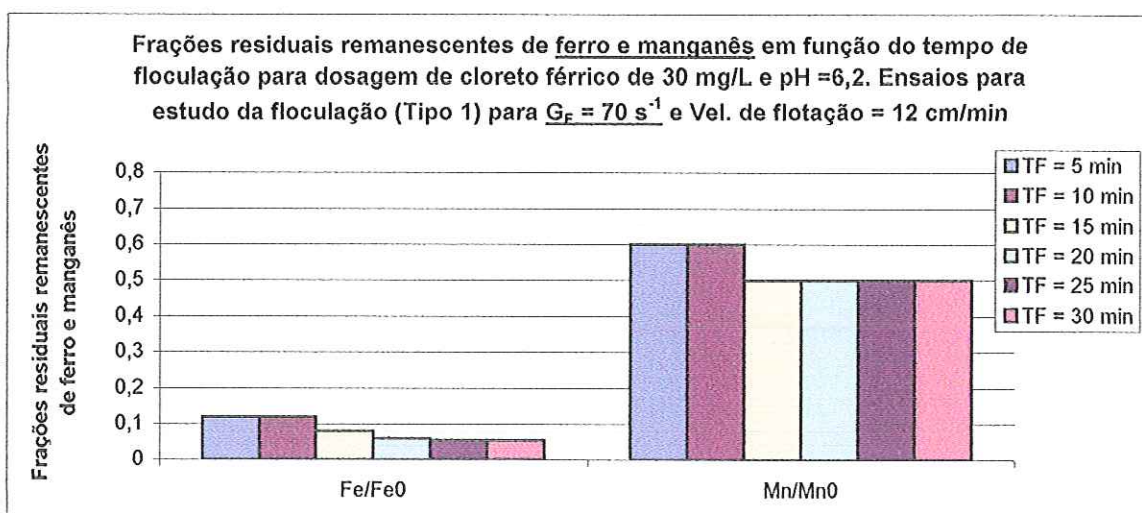


GRÁFICO 5.25 – Frações residuais remanescentes de ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 1. Condições de Ensaio: Tipo 1, DCF=30mg/L, pH=6,2, DCI=2,7mg/L,  $G_{MR}=800\text{s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20\text{s}$ ,  $G_F=70\text{s}^{-1}$ , R=10%, Pressão de saturação=450kPa, temperatura=25°C.

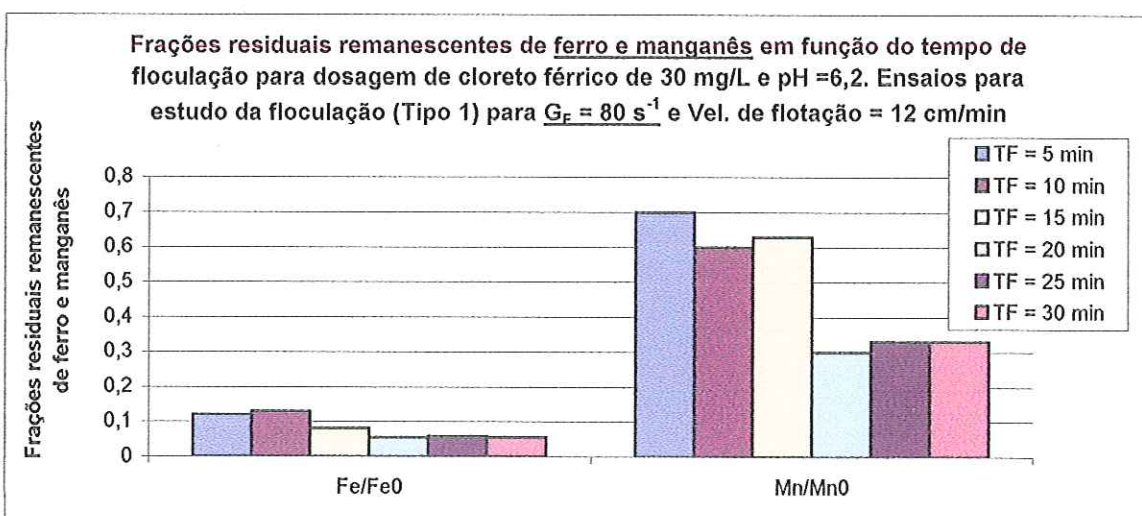
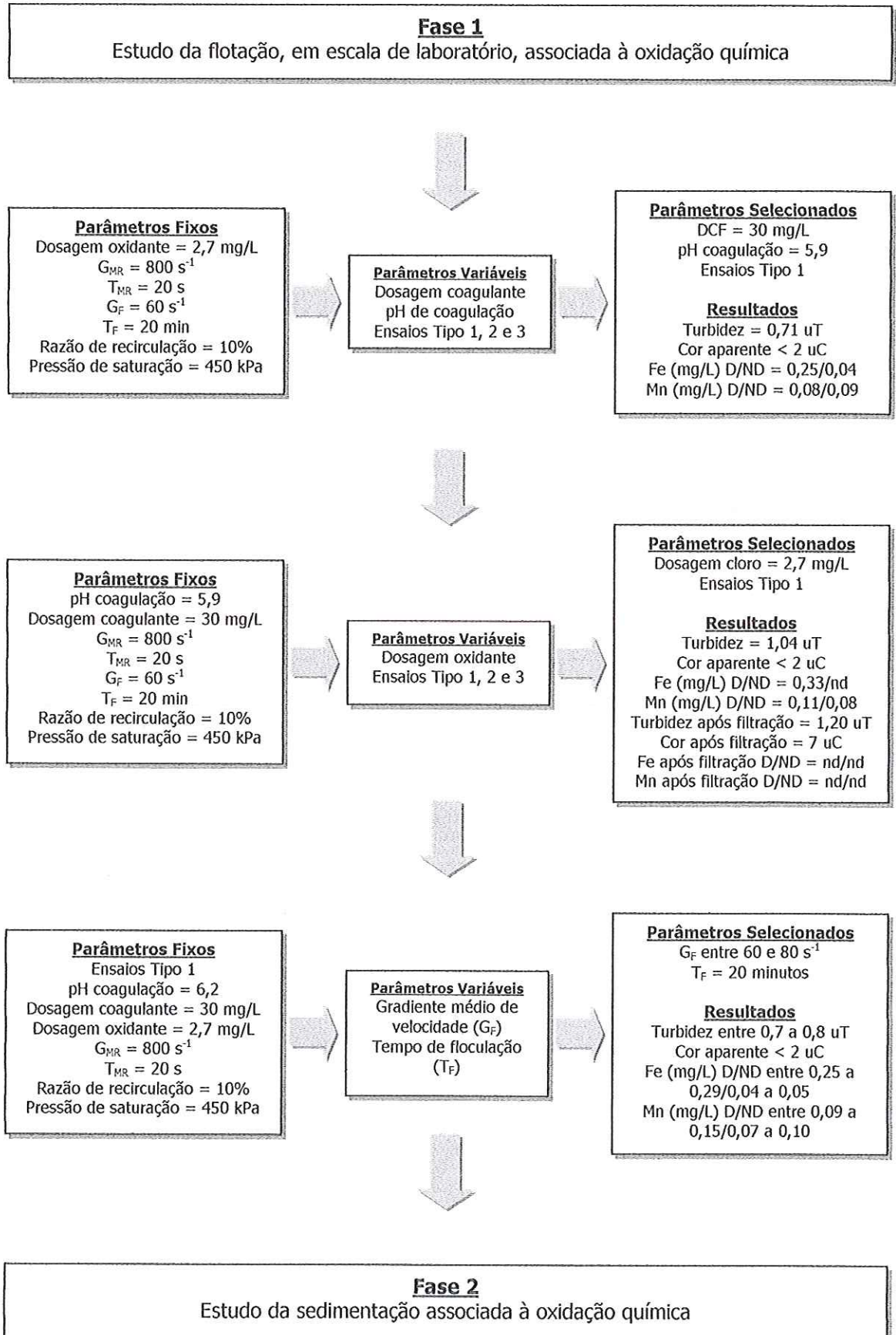


GRÁFICO 5.26 – Frações residuais remanescentes de ferro e manganês para ensaios de flotação Tipo 1. Condições de Ensaio: Tipo 1, DCF=30mg/L, pH=6,2, DCI=2,7mg/L,  $G_{MR}=800\text{s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20\text{s}$ ,  $G_F=80\text{s}^{-1}$ , R=10%, Pressão de saturação=450kPa, temperatura=25°C.

QUADRO 5.1 – Resumo dos melhores resultados referentes aos ensaios de FAD conjugada à oxidação química da Fase 1, para DCF=30mg/L. Condições de Ensaio: Tipo 1, DCF=30mg/L, DCI=2,7mg/L,  $G_{MR}=800s^{-1}$ ,  $T_{MR}=20s$ ,  $G_F=60s^{-1}$ ,  $T_F=20min$ ,  $R=10\%$ , Pressão de saturação=450kPa, temperatura=25°C.



## 5.4. ESTUDO DA REMOÇÃO DE FERRO E MANGANÊS COM USO DE OXIDAÇÃO QUÍMICA ASSOCIADA À SEDIMENTAÇÃO

Para esses ensaios, em escala de laboratório, adotou-se o hipoclorito de sódio (NaOCl) como oxidante. Foi fixada dosagem de 2,7 mg/L. O FeCl<sub>3</sub> (cloreto férrico) foi utilizado como coagulante na dosagem de 30 mg/L.

Estudou-se então, a floculação com vistas à sedimentação, com variação do gradiente médio de velocidade de floculação e tempo de floculação, além da variação do pH de oxidação e dosagem de coagulante.

Para a realização dos ensaios, foi necessária fixação de alguns parâmetros, apresentados na Tabela 5.12.

TABELA 5.12 – Condições fixadas durante os ensaios de remoção de ferro e manganês utilizando a sedimentação conjugada à oxidação química.

Dosagem de oxidante adotada (mg/L)	2,7
Dosagem de coagulante (mg/L)	30 / 45
G médio de velocidade de mistura rápida e dispersão do oxidante (s <sup>-1</sup> )	800
Tempo de dispersão do oxidante (s)	5
Tempo de mistura rápida (s)	20
G médio de velocidade de floculação (s <sup>-1</sup> )	variável
Tempo de floculação (s)	variável

As características da água de estudo apresentam-se na Tabela 5.13.

TABELA 5.13 – Características da água bruta utilizada para a realização dos ensaios que visaram a remoção do ferro e manganês com utilização da sedimentação conjugada à oxidação química.

Ácido Húmico (mg/L)	Fe total (D) (mg/L)	Fe total (ND) (mg/L)	Mn total (D) (mg/L)	Mn total (ND) (mg/L)	Cor (uC)	Turbidez (uT)	Alcalinidade (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	T (°C)
5,0	3,90	2,00	0,30	0,20	215	14,7	19,8	20

### 5.4.1. Ensaios Tipo 1 – Aplicação do Oxidante e do Coagulante no Momento da Mistura Rápida (Fase 2 da ETAPA I)

Para esses ensaios, o oxidante (hipoclorito de sódio) foi acrescentado à água de estudo 5 segundos antes do acréscimo do coagulante, procedendo-se a coagulação química seguida da floculação e sedimentação da água de estudo para diferentes valores de gradiente médio de

velocidade de floculação e tempo de floculação com vistas à sedimentação. Os resultados são apresentados na Tabela 5.14 e Gráficos 5.27 a 5.39.

É possível observar no Gráfico 5.27 que, os melhores resultados foram obtidos para valores de pH de 6,2 e 8,5.

Para o valor de pH de 6,2 aliado a  $G_F$  igual a  $40 \text{ s}^{-1}$  e tempo de floculação de 20 minutos forneceram ferro total residual na concentração de 1,33 mg/L, manganês total residual na concentração de 0,17 mg/L, turbidez residual de 2,1 uT e cor aparente residual de 21 uC, resultados muito satisfatórios. Já para o mesmo valor de gradiente e com tempo de floculação de 35 minutos, o ferro total residual apresentou-se na concentração de 1,53 mg/L e o manganês total residual com 0,22 mg/L, enquanto a turbidez residual foi de 2,6 uT e a cor aparente residual foi de 37 uC. Nota-se, nesse caso, ligeira queda na eficiência quando aumentado o tempo de floculação, porém, em todos os demais ensaios, foi observado o contrário, o acréscimo de tempo de floculação acarretou aumento na eficiência do sistema.

Aumentado o gradiente de floculação para  $60 \text{ s}^{-1}$  e tempo de floculação de 20 minutos, o ferro total residual foi de 3,36 mg/L e o manganês total residual apresentou-se com concentração de 0,39 mg/L, enquanto a turbidez residual foi de 5,1 uT e a cor aparente residual foi de 73 uC. Conservado o mesmo valor do gradiente ( $G_F$  igual a  $60 \text{ s}^{-1}$ ) e aumentado o tempo de floculação para 35 minutos, o ferro total residual decresceu para 1,60 mg/L e o manganês total residual decresceu para 0,26 mg/L.

É interessante observar que a eficiência foi diminuindo conforme o aumento do gradiente. Ao contrário da floculação visando a flotação que indicou os melhores resultados com a utilização dos maiores valores de  $G_F$  estudados, a floculação visando à sedimentação requereu menores valores de  $G_F$  aliados aos maiores valores de tempo de floculação, para o valor de pH de 6,2 e dosagem de cloreto férrico de 30 mg/L.

Para o valor de pH de 8,5 que apresentou os melhores resultados, a eficiência aumentou com aumento do tempo e do gradiente de floculação. Como é possível observar na Tabela 5.14, para  $G_F$  igual a  $40 \text{ s}^{-1}$  e tempo de floculação de 20 minutos, o ferro total residual apresentou-se com concentração de 1,63 mg/L e o manganês total residual foi de 0,23 mg/L, enquanto a turbidez residual foi de 4,7 uT e a cor aparente residual de 61 uC. Aumentado o gradiente de floculação para  $G_F$  igual a  $60 \text{ s}^{-1}$  e tempo de floculação de 20 minutos, a eficiência aumentou, pois o ferro total residual foi de 1,24 mg/L e o manganês total residual foi de 0,14 mg/L, enquanto a turbidez residual foi de 5,9 uT e a cor aparente residual foi de 62 uC. Aumentado também o tempo de floculação para 35 minutos, os resultados foram ainda melhores: ferro total residual de 1,06 mg/L e manganês total residual de 0,14 mg/L, enquanto a turbidez residual foi de 2,1 uT e cor aparente residual foi de 35 uC. Para o valor de pH de 8,5 os melhores resultados apresentaram-se nos maiores valores de  $G_F$  aliados aos maiores valores de tempo de floculação estudados.

Os melhores resultados da floculação visando sedimentação apresentam-se com  $G_F$  igual a  $60 \text{ s}^{-1}$  e tempo de floculação de 35 minutos, para o valor de pH de 8,5. Observa-se que

o pH em torno de 8,5 forneceu a melhor eficiência de remoção de turbidez, ferro e manganês. Porém, com relação à cor aparente, o pH em torno de 6,2 apresentou remoção maior que o pH em torno de 8,5.

Com o valor de pH,  $G_F$  e tempo de floculação selecionados:  $G_F$  igual a  $40 \text{ s}^{-1}$  e tempo de floculação de 20 minutos, variou-se a dosagem de cloreto férrico, 40 e 50 mg/L, como apresentado na Tabela 5.14. A dosagem de cloreto férrico de 30 mg/L apresentou os melhores resultados.

Com as variáveis, pH de oxidação e coagulação de 6,2,  $G_F$  igual a  $40 \text{ s}^{-1}$ , tempo de floculação de 20 minutos e dosagem de cloreto férrico de 30 mg/L adotadas, repetiu-se esse ensaio e, após coleta das amostras nas velocidades de 0,5, 1,0, 2,5, 5,0, e 10,0 cm/min, foram submetidas à filtração (Whatman 40), com resultados muito satisfatórios como ferro total residual não detectado e manganês total residual entre 0,18 e 0,20 mg/L, turbidez residual de 0,9 uT e cor aparente residual igual a 7 uC.

Selecionados gradiente, tempo de floculação e dois valores de pH (6,2 e 8,5), partiu-se para investigação dos dois outros tipos de ensaios estudados para flotação, Tipo 2 (aplicação do oxidante 5 minutos antes do coagulante) e Tipo 3 (aplicação do oxidante somente após os ensaios de flotação ou sedimentação).

Os resultados estão apresentados nas Tabelas 5.15 e Gráficos 5.40 a 5.42.

Observa-se, portanto, que os ensaios Tipo 2 forneceram resultados inferiores aos obtidos nos ensaios Tipo 1. Analisando-se a velocidade de sedimentação de 2,5 cm/min, o ferro total residual apresentou-se na concentração de 4,11 mg/L e o manganês total residual foi de 0,40 mg/L, enquanto a turbidez residual foi de 4,6 uT e a cor aparente residual foi de 45 uC. Já para os ensaios Tipo 3, os resultados foram melhores, pois o ferro total residual foi de 1,66 mg/L após sedimentação e 1,61 mg/L após a oxidação/filtração, enquanto o manganês total residual foi de 0,34 mg/L após sedimentação e 0,35 mg/L após a oxidação/filtração, turbidez residual de 2,8 uT após a sedimentação e de 3,6 uT após a oxidação/filtração e a cor aparente residual foi de 32 uC após sedimentação e de 27 uC após a oxidação/filtração. Os ensaios Tipo 1 foram selecionados como os que apresentaram os melhores resultados, 1,33 mgFe/L, 0,17 mgMn/L, turbidez igual a 2,1 uT e cor igual a 21 uC, para o valor de pH de 6,2 e DCF igual 30 mg/L.

Ainda com DCF igual a 30 mg/L estudou-se os ensaios Tipo 2 e 3 para o valor de pH de 8,5 que também apresentou resultados satisfatórios. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.16 e Gráfico 5.43 a 5.45.

Verifica-se que para o valor de pH de 8,5, os ensaios Tipo 2 apresentaram resultados muito bons quando comparados aos ensaios Tipo 2 para pH igual a 6,2 (4,11 mgFe/L, 0,40 mgMn/L, turbidez igual a 4,6 uT e a cor igual a 45 uC). Para o valor de pH igual a 8,5, os resultados dos ensaios Tipo 2 apresentaram ferro total residual na concentração de 1,79 mg/L e manganês total residual na concentração de 0,26 mg/L, turbidez residual de 4,1 uT e cor aparente residual de 36 uC. Os ensaios Tipo 3 apresentaram resultados ligeiramente superiores



aos ensaios Tipo 2, 1,41 mgFe/L após sedimentação e 1,42 mgFe/L após a oxidação/filtração e 0,20 mgMn/L após sedimentação e 0,19 mgMn/L após a oxidação/filtração, enquanto a turbidez residual foi de 3,6 uT após sedimentação e 5,5 uT após a oxidação/filtração e cor aparente residual de 13 uC após sedimentação e 25 uC após a oxidação/filtração.

Selecionou-se, portanto, os ensaios Tipo 1 como os que apresentaram os melhores resultados comparados aos ensaios Tipo 2 e Tipo 3. Os resultados fornecidos pelos ensaios Tipo 1 foram 1,06 mgFe/L, 0,14 mgMn/L, turbidez residual de 2,1 uT e cor aparente residual de 35 uC para pH de 8,5 e 1,33 mgFe/L, 0,17mgMn/L, turbidez residual de 2,1 uT e cor aparente residual de 21 uC, para pH de 6,2.

Para DCF igual a 30 mg/L, os ensaios Tipo 1 e o valor de pH em torno de 8,5 foram selecionados como os que forneceram os melhores resultados, ou seja, maior eficiência.

Adotados  $G_F$  de  $40 \text{ s}^{-1}$  e  $T_F$  de 35 minutos, deu-se início ao estudo com dosagem de cloreto férrico de 45 mg/L. Os resultados apresentam-se na Tabela 5.18 e Gráficos 5.46 a 5.48.

Observa-se que a eficiência com essa dosagem foi inferior a apresentada quando utilizado DCF igual 30 mg/L. É interessante observar que os valores de pH de 6,0 e 6,3 apresentaram resultados muito bons, mas os valores de pH de 8,1 e 8,7 forneceram os melhores resultados de ferro total residual (1,32 a 1,73 mg/L, respectivamente), manganês total residual entre 0,03 e 0,18 mg/L, turbidez residual entre 3,7 e 8,3 uT e cor aparente residual entre 17 e 22 uC.

Os melhores resultados alcançados com utilização de DCF igual a 45 mg/L não foram superiores aos resultados alcançados com DCF igual a 30 mg/L, selecionando-se essa dosagem como a que proporcionou os melhores resultados ao processo de oxidação química conjugada à sedimentação.

Mesmo com resultados inferiores, fez-se o estudo dos ensaios Tipo 2 e 3, a partir da seleção dos melhores resultados apresentados com investigação da DCF igual a 45 mg/L. Os resultados selecionados como os melhores para os ensaios Tipo 1 foram: para o valor de pH de 6,3, ferro total residual de 2,83 mg/L, manganês total residual de 0,43 mg/L, turbidez residual de 5,0 uT e cor aparente residual de 167 uC. Para o valor de pH de 8,1 os resultados foram superiores, como 1,32 mgFe/L, 0,03 mgMn/L, turbidez residual de 8,3 uT e cor aparente residual de 22 uC.

Os resultados obtidos com os ensaios Tipo 2 e 3 estão apresentados na Tabela 5.19 e Gráficos 5.49 a 5.51.

Observa-se, portanto, que os ensaios Tipo 1, 2 e 3 não forneceram resultados muito bons. Analisando-se a velocidade de sedimentação de 2,5 cm/min, para ensaios Tipo 2, o ferro total residual foi de 2,83 mg/L e o manganês total residual foi de 0,41 mg/L, enquanto a turbidez residual foi de 2,4 uT e a cor aparente residual foi de 121 uC. Já para os ensaios Tipo 3, os resultados foram: ferro total residual na concentração de 2,90 mg/L após sedimentação e 2,99 mg/L após a oxidação/filtração, enquanto o manganês total residual foi de 0,37 mg/L após



sedimentação e 0,38 mg/L após a oxidação/filtração, turbidez residual de 4,2 uT após sedimentação e de 5,8 uT após a oxidação/filtração e a cor aparente residual foi de 83 uC após sedimentação e de 74 uC após a oxidação/filtração. Os ensaios Tipo 1 apresentaram resultados como 2,83 mgFe/L, 0,43 mgMn/L, turbidez residual igual a 5,0 uT e cor aparente residual igual a 167 uC, para o valor de pH de 6,3 e DCF igual a 45 mg/L. Selecionou-se, nesse caso, os ensaios Tipo 2 como os que apresentaram os melhores resultados.

Ainda com DCF igual a 45 mg/L estudou-se os ensaios Tipo 2 e 3 para o valor de pH de 8,5 que apresentou resultados satisfatórios. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.20 e Gráficos 5.52 a 5.54.

É interessante observar que para o valor de pH de 8,1, os ensaios Tipo 2 apresentaram resultados muito bons quando comparados aos ensaios Tipo 2 para pH igual a 6,3 (4,11 mgFe/L, 0,40 mgMn/L, turbidez igual a 4,6 uT e cor igual 45 uC). Para o valor de pH igual a 8,1, os resultados Tipo 2 apresentaram: ferro total residual de 2,03 mg/L, manganês total residual de 0,20 mg/L, turbidez residual de 5,8 uT e cor aparente residual de 52 uC. Os ensaios Tipo 3, após a oxidação/filtração, apresentaram resultados ligeiramente superiores aos ensaios Tipo 2: 2,37 mgFe/L após sedimentação e 1,96 mgFe/L após a oxidação/filtração e 0,27 mgMn/L após sedimentação e 0,28 mgMn/L após a oxidação/filtração, enquanto a turbidez residual foi de 3,8 uT após sedimentação e de 4,6 uT após a oxidação/filtração e cor aparente residual de 12 uC após sedimentação e 26 uC após a oxidação/filtração.

Foram selecionados, portanto, os ensaios Tipo 1 como os que apresentaram os melhores resultados comparados aos ensaios Tipo 2 e Tipo 3. Os resultados fornecidos pelos ensaios Tipo 1 foram de 1,32 mgFe/L, 0,03 mgMn/L, turbidez de 8,3 uT e cor aparente de 22 uC. Nota-se que esses resultados apresentados (pH de 8,1) foram superiores aos apresentados para os três tipos de ensaios (Tipos 1, 2 e 3) com valor de pH de 6,3.

Para DCF igual a 45 mg/L, ensaios Tipo 1, o valor de pH de 8,1 foi selecionado como o que forneceu os melhores resultados: 1,32 mgFe/L, 0,04 mgMn/L, turbidez igual a 8,3 uT e cor aparente igual a 22 uC, e para a DCF igual a 30 mg/L, ensaios Tipo 1, valor de pH de 8,5, os melhores resultados foram: 1,06 mgFe/L, 0,14 mgMn/L, turbidez igual a 2,1 uT e cor aparente igual a 35 uC. A Tabela 5.21 apresenta um resumo dos melhores resultados obtidos nos ensaios de sedimentação conjugada à oxidação química.

TABELA 5.14 - Resultados referentes aos ensaios de sedimentação conjugada à oxidação (ensaios Tipo 1) em diferentes valores de pH com DCF = 30 mg/L. Condições de Ensaio: Tipo 1, DCF=30mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $G_{MR}=800s^{-1}$ ,  $T_{MR}=20s$ , temperatura=25°C.

Vel. sedim.	$G=40s^{-1}$								$G=60s^{-1}$							
	$T_F=20\text{ min}$				$T_F=35\text{ min}$				$T_F=20\text{ min}$				$T_F=35\text{ min}$			
	Turbidez (uT)	Cor (uC)	Fe ND/D (mg/L)	Mn ND/D (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor (uC)	Fe ND/D (mg/L)	Mn ND/D (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor (uC)	Fe ND/D (mg/L)	Mn ND/D (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor (uC)	Fe ND/D (mg/L)	Mn ND/D (mg/L)
pH de oxidação = 5,8 / pH após coagulação = 5,8 Potencial zeta (mV) = $16,2 \pm 1,2$ Cor após mistura rápida (uC) = 253 / Turbidez após mistura rápida (uT) = 18,1																
0,5	9,3	61			10,1	63			10,8	80			11,4	77		
1,0	12,5	106			13,3	111			12,9	127			13,0	113		
2,5	13,1	114	3,03/ 3,90	0,22/ 0,42	13,5	123	3,11/ 3,62	0,22/ 0,43	13,4	129	2,97/ 3,14	0,24/ 0,43	14,4	131	2,81/ 3,48	0,23/ 0,42
5,0	13,0	122			13,3	116			14,1	147			13,5	126		
10,0	12,8	126			14,1	125			13,6	138			13,6	129		
pH de oxidação = 6,2 / pH após coagulação = 6,2 Potencial zeta (mV) = $-3,0 \pm 0,8$ Cor após mistura rápida (uC) = 272 / Turbidez após mistura rápida (uT) = 16,8																
0,5	0,7	<2			0,9	<2			1,6	4			1,2	3		
1,0	1,2	6			1,4	4			2,9	54			1,5	14		
2,5	2,1	21	1,25/ 1,33	0,17/ 0,17	2,6	37	1,43/ 1,53	0,20/ 0,22	5,1	73	2,84/ 3,36	0,21/ 0,39	3,1	36	1,43/ 1,60	0,20/ 0,26
5,0	2,8	37			2,8	42			5,1	92			3,9	61		
10,0	3,9	52			3,6	58			6,6	111			5,0	77		
pH de oxidação = 6,5 / pH após coagulação = 6,5 Potencial zeta (mV) = $-13,6 \pm 0,6$ Cor após mistura rápida (uC) = 253 / Turbidez após mistura rápida (uT) = 17,7																
0,5	1,0	<2			1,4	<2			1,0	<2			2,1	15		
1,0	1,4	12			1,3	6			2,2	23			2,5	28		
2,5	4,0	49	1,65/ 1,87	0,24/ 0,24	3,4	35	1,60/ 2,18	0,24/ 0,37	5,7	72	1,98/ 2,23	0,25/ 0,30	4,3	58	1,88/ 1,90	0,25/ 0,30
5,0	5,6	76			4,0	42			6,7	86			5,2	74		
10,0	7,5	101			5,3	71			7,9	106			6,4	86		
pH de oxidação = 6,7 / pH após coagulação = 6,7 Potencial zeta (mV) = $-12,9 \pm 0,7$ Cor após mistura rápida (uC) = 252 / Turbidez após mistura rápida (uT) = 15,3																
0,5	1,6	<2			1,7	<2			1,8	<2			1,5	<2		
1,0	3,4	23			2,4	14			2,9	11			3,0	26		
2,5	6,2	36	2,60/ 3,49	0,27/ 0,35	3,8	32	1,84/ 2,48	0,24/ 0,37	5,9	96	2,71/ 5,44	0,29/ 0,46	5,2	55	1,95/ 2,70	0,27/ 0,41
5,0	8,1	97			4,0	32			7,1	108			5,2	72		
10,0	8,2	111			4,3	41			8,6	107			6,5	92		
pH de oxidação = 7,1 / pH após coagulação = 7,1 Potencial zeta (mV) = $-15,7 \pm 0,3$ Cor após mistura rápida (uC) = 272 / Turbidez após mistura rápida (uT) = 17,0																
0,5	2,5	<2			1,4	<2			1,7	<2			2,2	<2		
1,0	3,6	19			1,8	11			2,4	31			2,6	29		
2,5	5,5	30	2,56/ 3,31	0,23/ 0,29	3,7	24	1,66/ 1,99	0,22/ 0,22	6,1	45	2,83/ 3,10	0,25/ 0,29	3,6	39	1,81/ 1,90	0,17/ 0,25
5,0	6,2	37			3,9	39			7,8	76			4,7	54		
10,0	7,2	65			5,2	48			9,2	95			5,2	72		
pH de oxidação = 7,5 / pH após coagulação = 7,5 Potencial zeta (mV) = $-16,9 \pm 0,2$ Cor após mistura rápida (uC) = 263 / Turbidez após mistura rápida (uT) = 17,8																
0,5	1,0	<1			0,8	<2			0,5	<2			0,8	<2		
1,0	1,6	7			1,9	4			1,5	13			2,1	12		
2,5	2,5	14	1,70/ 1,78	0,27/ 0,30	2,8	27	1,56/ 1,63	0,23/ 0,23	3,0	24	1,67/ 2,23	0,26/ 0,26	3,4	21	1,75/ 2,20	0,25/ 0,34
5,0	3,5	24			3,4	39			5,6	46			4,9	31		
10,0	4,4	40			4,3	41			6,8	64			5,81	41		
pH de oxidação = 8,0 / pH após coagulação = 8,0 Potencial zeta (mV) = $-18,9 \pm 0,4$ Cor após mistura rápida (uC) = 297 / Turbidez após mistura rápida (uT) = 17,2																
0,5	2,1	39			1,1	22			1,5	27			2,7	41		
1,0	3,2	48			1,9	32			2,3	35			3,5	46		
2,5	5,4	77	2,11/ 0,25/		3,1	44	1,35/ 0,19/		5,1	72	2,08/ 0,23/		3,7	54	1,55/ 0,21/	

			2,40	0,25			1,58	0,21			2,10	0,24			1,85	0,24
5,0	6,5	84			3,2	51			6,7	84			5,2	74		
10,0	7,9	108			4,3	64			8,3	106			6,5	76		

pH de oxidação = 8,5 / pH após coagulação = 8,5

Potencial zeta (mV) = -16,9 ± 0,8

Cor após mistura rápida (uC) = 232 / Turbidez após mistura rápida (uT) = 16,9

0,5	3,2	34			1,9	7			2,8	15			1,6	3		
1,0	3,7	43			3,0	35			4,6	46			2,0	7		
2,5	4,7	61	1,49/ 1,63	0,13/ 0,23	3,3	39	1,34/ 1,89	0,09/ 0,44	5,9	62	1,20/ 1,24	0,09/ 0,14	2,1	35	1,03/ 1,06	0,09/ 0,14
5,0	5,2	68			3,9	44			6,7	75			2,3	39		
10,0	9,24	81			4,6	47			10,7	94			3,5	49		

pH de oxidação = 6,2 / pH após coagulação = 6,2

Potencial Zeta (mV) = -3,0 ± 0,8

Cor após mistura rápida (uC) = 272 / Turbidez após mistura rápida (uT) = 16,8

$G_F = 40 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_F = 20 \text{ min}$

	Dosagem Cloreto Férrico = 40 mg/L				Dosagem Cloreto Férrico = 50 mg/L			
	Turbidez (uT)	Cor (uC)	Fe nd/d (mg/L)	Mn nd/d (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor (uC)	Fe nd/d (mg/L)	Mn nd/d (mg/L)
0,5	1,0	<2			2,0	<2		
1,0	2,9	11			3,6	20		
2,5	6,4	81	2,92/3,48	0,34/0,39	5,1	54	2,97/3,45	0,34/0,34
5,0	8,0	105			6,1	58		
10,0	8,6	111			6,4	64		

pH de oxidação = 6,2 / pH após coagulação = 6,2

Potencial zeta (mV) = -3,0 ± 0,8

Cor após mistura rápida (uC) = 272 / Turbidez após mistura rápida (uT) = 16,8

$G_F = 40 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_F = 20 \text{ min}$ ; DCF = 30 mg/L

	Após Sedimentação				Após Filtração (Whatman 40)			
	Turbidez nd/d (uT)	Cor nd/d (uC)	Fe nd/d (mg/L)	Mn nd/d (mg/L)	Turbidez nd/d (uT)	Cor nd/d (uC)	Fe nd/d (mg/L)	Mn nd/d (mg/L)
0,5	0,7/1,6	15/8	0,76/1,03	0,19/0,24	1,1/0,8	11/4	nd/nd	0,20/0,20
1,0	1,7/1,6	25/7	0,96/1,20	0,18/0,26	1,5/0,8	11/4	nd/nd	0,20/0,20
2,5	2,9/1,7	31/7	1,14/1,26	0,21/0,25	1,3/0,9	11/7	nd/nd	0,21/0,18
5,0	3,3/2,2	46/14	1,08/1,30	0,20/0,23	1,4/1,2	16/8	nd/nd	0,18/0,18
10,0	3,9/1,4	51/10	1,34/1,51	0,19/0,23	1,9/0,7	15/8	nd/nd	0,19/0,19

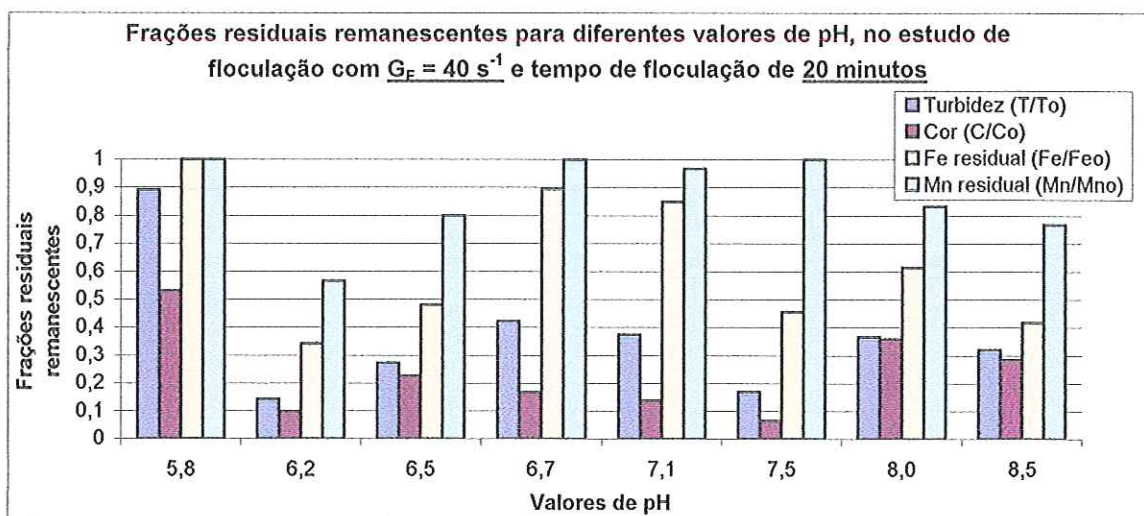


GRÁFICO 5.27 – Frações residuais remanescentes em função de valores de pH para ensaios de sedimentação Tipo 1. Condições de Ensaio: Tipo 1, DCF=30mg/L, DCI=2,7mg/L,  $G_{MR}=800\text{s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20\text{s}$ ,  $G_F=40\text{s}^{-1}$ ,  $T_F=20\text{min}$ , temperatura=25°C.

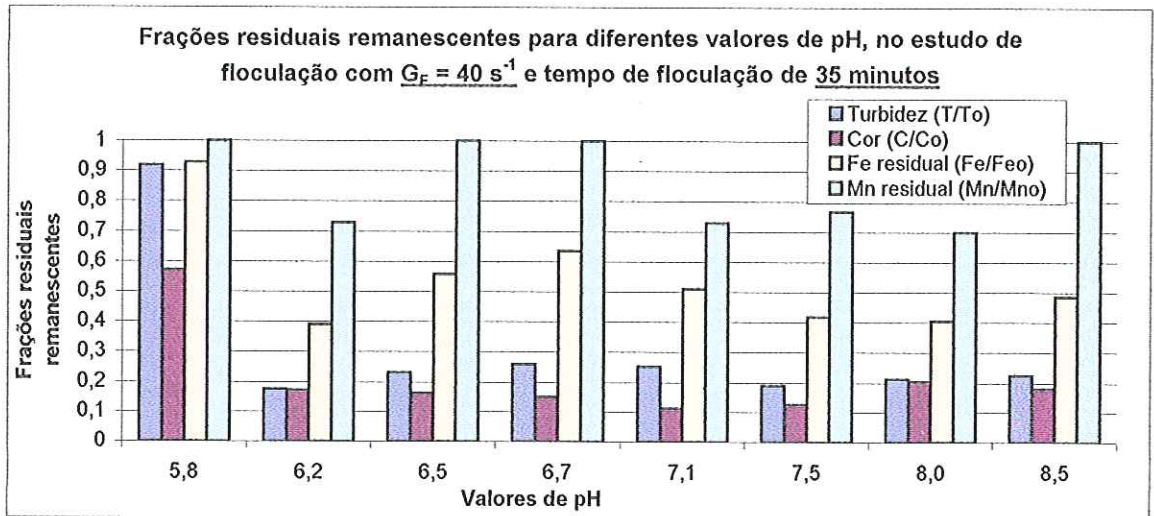


GRÁFICO 5.28 – Frações residuais remanescentes em função de valores de pH para ensaios de sedimentação Tipo 1. Condições de Ensaio: Tipo 1, DCF=30mg/L, DCI=2,7mg/L,  $G_{MR}=800\text{s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20\text{s}$ ,  $G_F=40\text{s}^{-1}$ ,  $T_F=35\text{min}$ , temperatura=25°C.

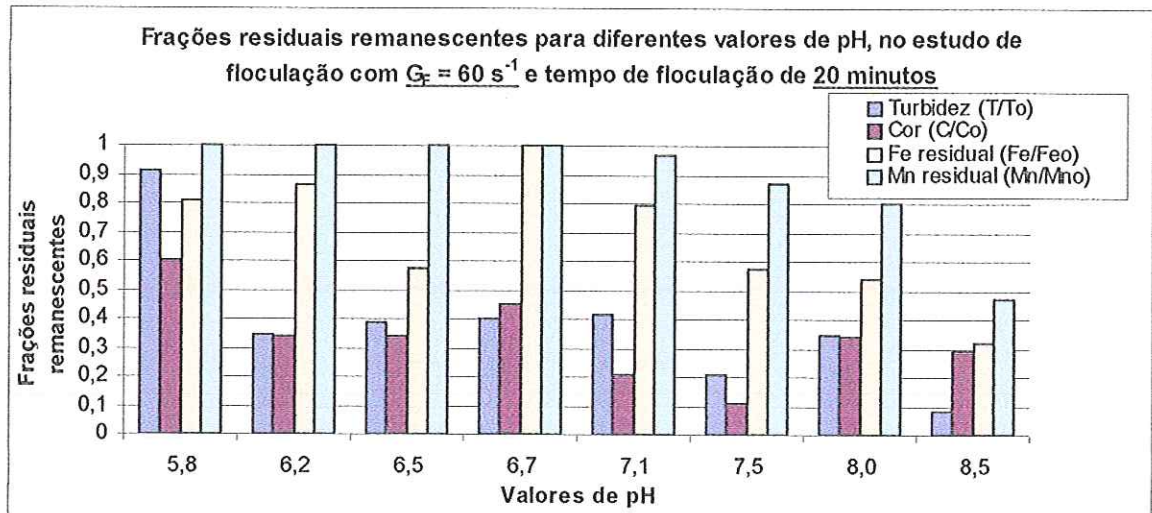


GRÁFICO 5.29 – Frações residuais remanescentes em função de valores de pH para ensaios de sedimentação Tipo 1. Condições de Ensaio: Tipo 1, DCF=30mg/L, DCI=2,7mg/L,  $G_{MR}=800\text{s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20\text{s}$ ,  $G_F=60\text{s}^{-1}$ ,  $T_F=20\text{min}$ , temperatura=25°C.

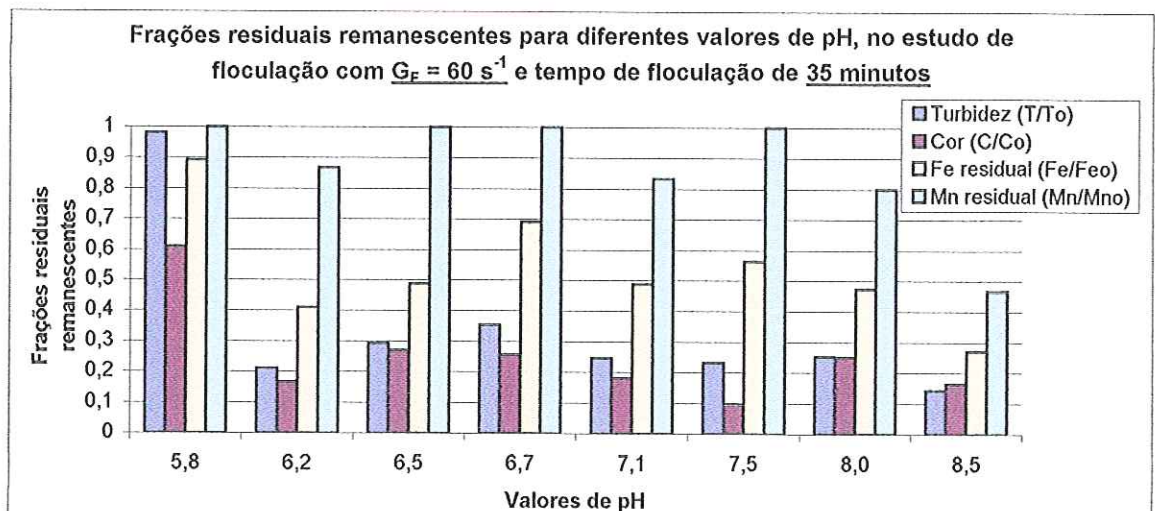


GRÁFICO 5.30 – Frações residuais remanescentes em função de valores de pH para ensaios de sedimentação Tipo 1. Condições de Ensaio: Tipo 1, DCF=30mg/L, DCI=2,7mg/L,  $G_{MR}=800\text{s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20\text{s}$ ,  $G_F=60\text{s}^{-1}$ ,  $T_F=35\text{min}$ , temperatura=25°C.

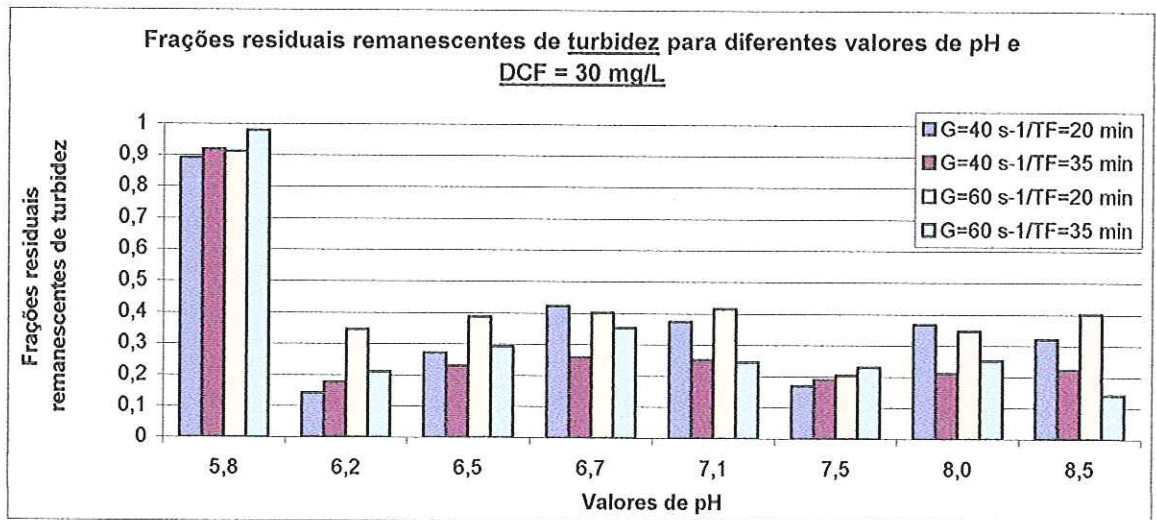


GRÁFICO 5.31 – Frações residuais remanescentes de turbidez em função de valores de pH, para ensaios de sedimentação Tipo 1. Condições de Ensaio: Tipo 1, DCF=30mg/L, DCI=2,7mg/L,  $G_{MR}=800s^{-1}$ ,  $T_{MR}=20s$ , temperatura=25°C.

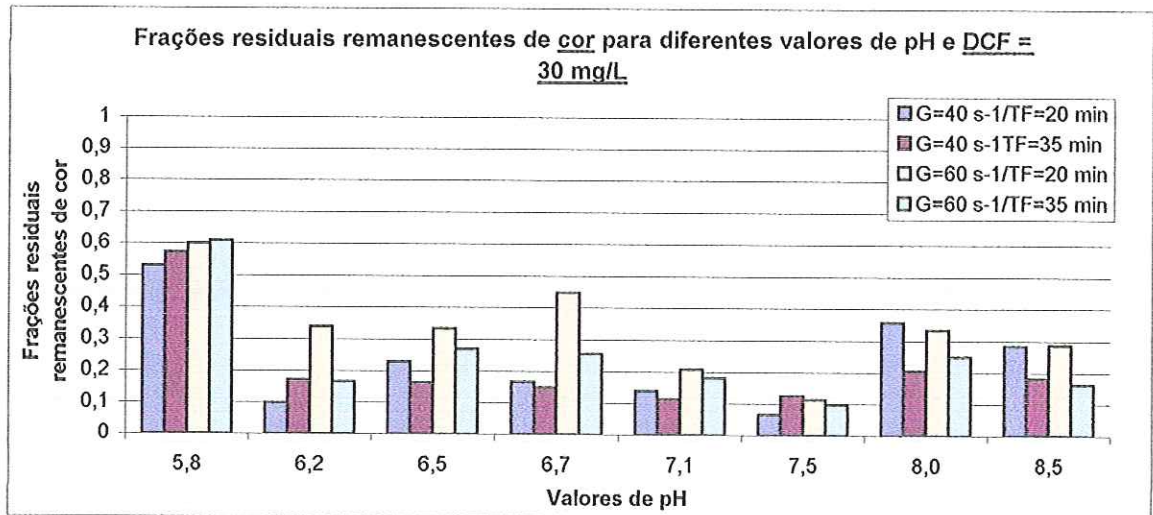


GRÁFICO 5.32 – Frações residuais remanescentes de cor em função de valores de pH, para ensaios de sedimentação Tipo 1. Condições de Ensaio: Tipo 1, DCF=30mg/L, DCI=2,7mg/L,  $G_{MR}=800s^{-1}$ ,  $T_{MR}=20s$ , temperatura=25°C.

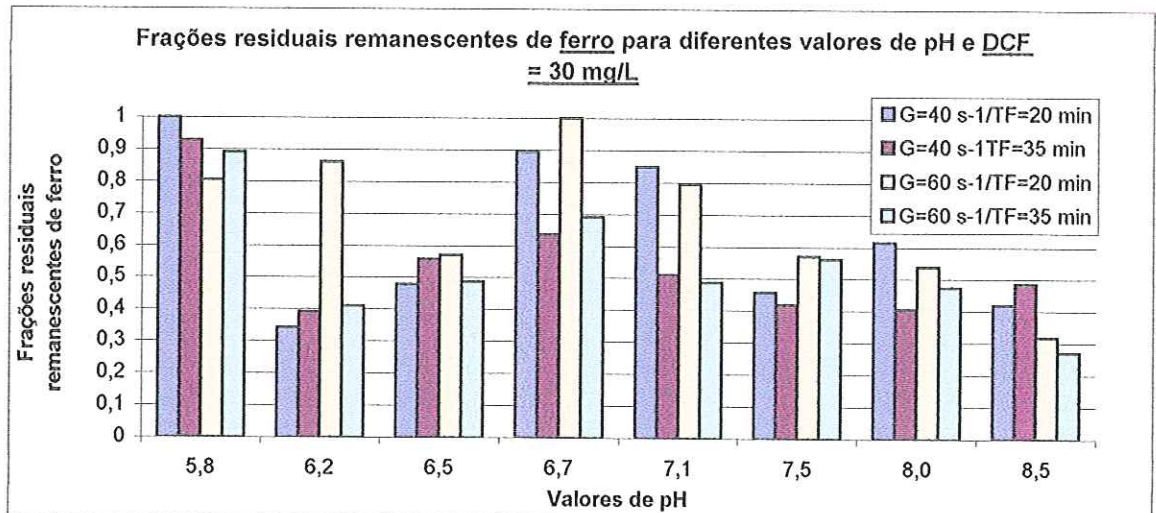


GRÁFICO 5.33 – Frações residuais remanescentes de ferro em função de valores de pH, para ensaios de sedimentação Tipo 1. Condições de Ensaio: Tipo 1, DCF=30mg/L, DCI=2,7mg/L,  $G_{MR}=800s^{-1}$ ,  $T_{MR}=20s$ , temperatura=25°C.

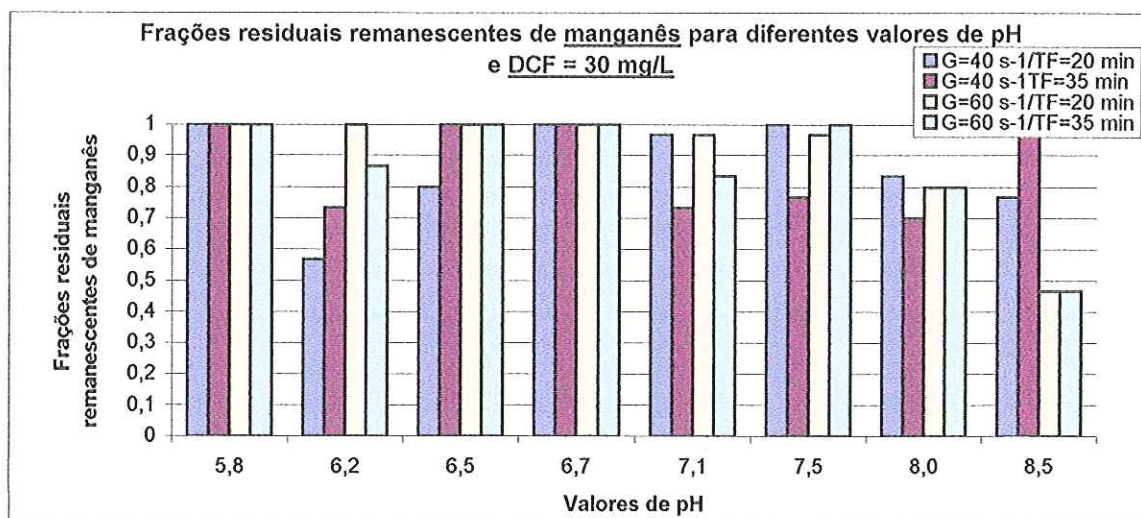


GRÁFICO 5.34 – Frações residuais remanescentes de manganês em função de valores de pH, para ensaios de sedimentação Tipo 1. Condições de Ensaio: Tipo 1,  $DCF=30\text{mg/L}$ ,  $DCI=2,7\text{mg/L}$ ,  $G_{MR}=800\text{s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20\text{s}$ , temperatura= $25^{\circ}\text{C}$ .

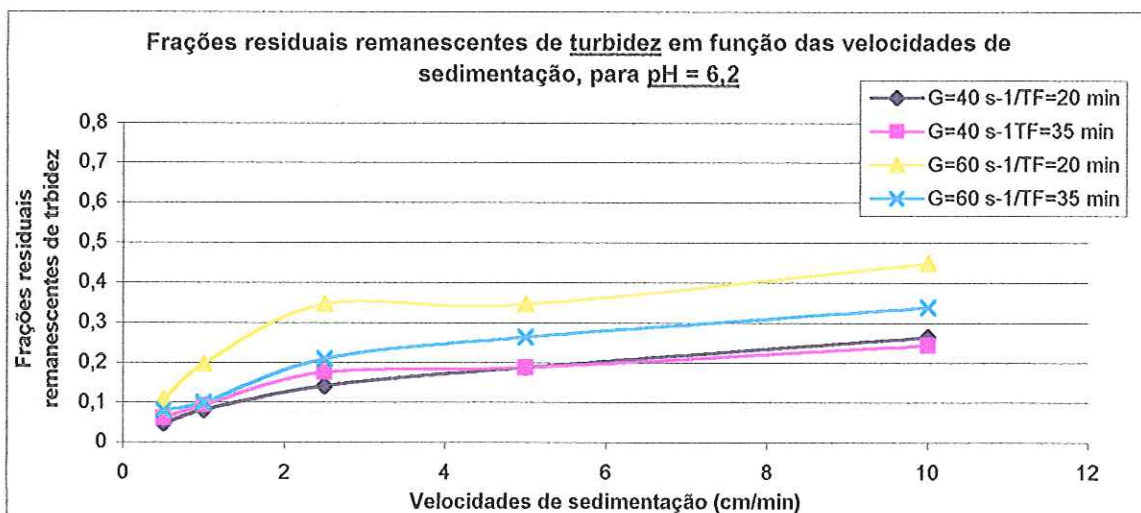


GRÁFICO 5.35 – Frações residuais remanescentes de turbidez em função das velocidades de sedimentação para pH=6,2 e ensaios de sedimentação Tipo 1. Condições de Ensaio: Tipo 1,  $DCF=30\text{mg/L}$ ,  $DCI=2,7\text{mg/L}$ ,  $\text{pH}=6,2$ ,  $G_{MR}=800\text{s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20\text{s}$ , temperatura= $25^{\circ}\text{C}$ .

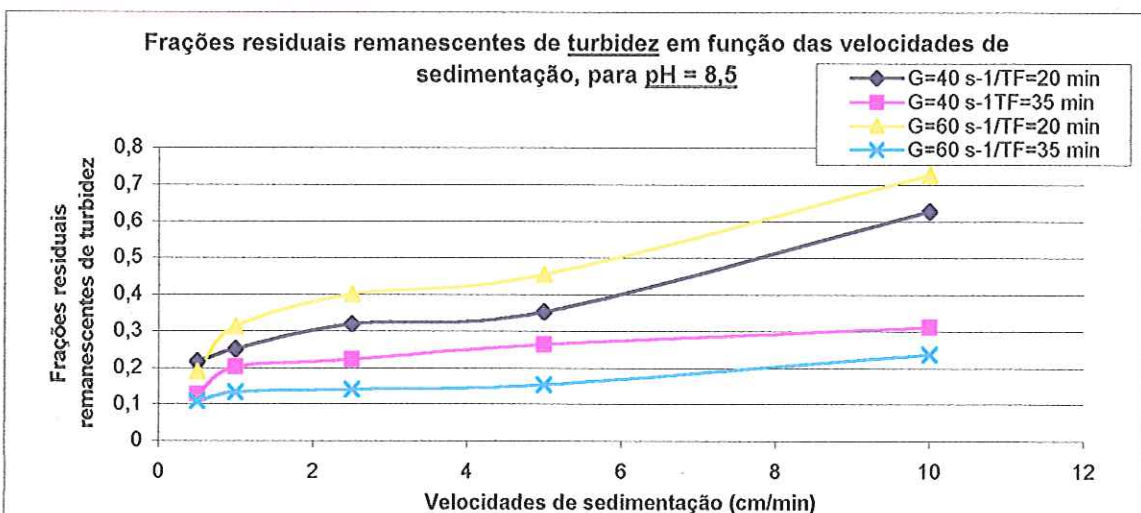


GRÁFICO 5.36 – Frações residuais remanescentes de turbidez em função das velocidades de sedimentação para pH=8,5 e ensaios de sedimentação Tipo 1. Condições de Ensaio: Tipo 1,  $DCF=30\text{mg/L}$ ,  $DCI=2,7\text{mg/L}$ ,  $\text{pH}=8,5$ ,  $G_{MR}=800\text{s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20\text{s}$ , temperatura= $25^{\circ}\text{C}$ .

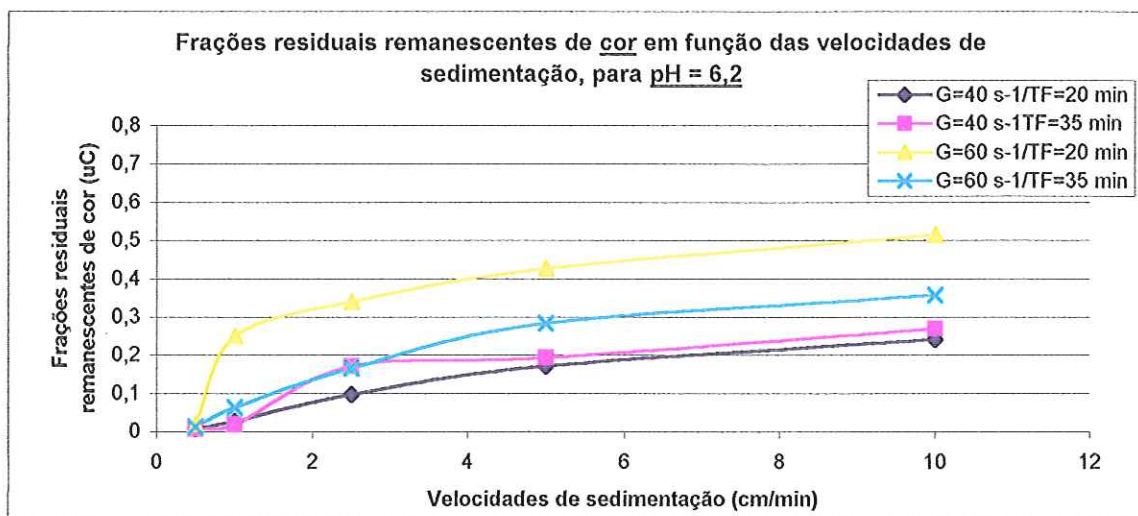


GRÁFICO 5.37 – Frações residuais remanescentes de cor em função das velocidades de sedimentação para pH=6,2 e ensaios de sedimentação Tipo 1. Condições de Ensaio: Tipo 1, DCF=30mg/L, DCI=2,7mg/L, pH=6,2,  $G_{MR}=800s^{-1}$ ,  $T_{MR}=20s$ , temperatura=25°C.

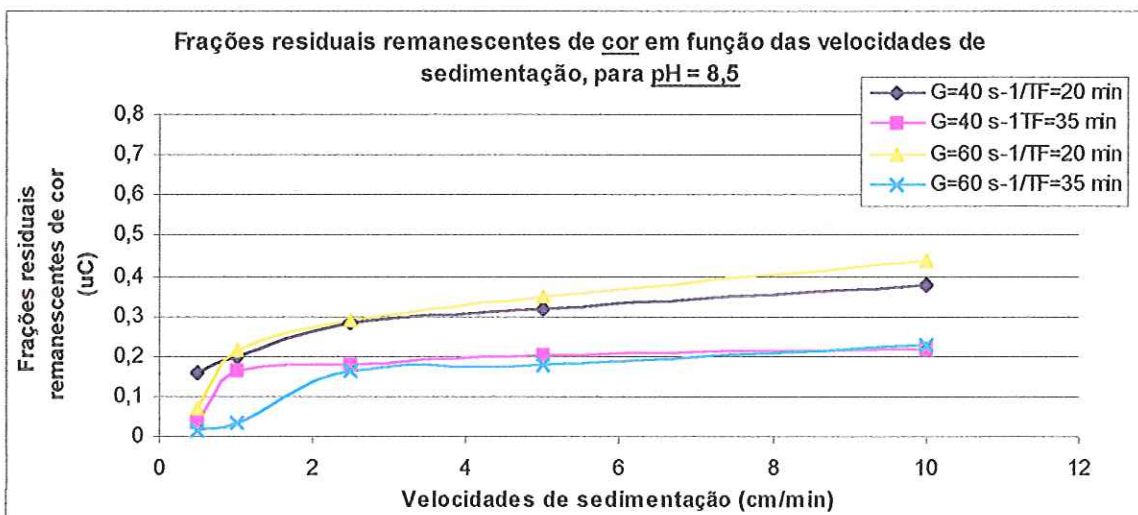


GRÁFICO 5.38 – Frações residuais remanescentes de cor em função das velocidades de sedimentação para pH=8,5 e ensaios de sedimentação Tipo 1. Condições de Ensaio: Tipo 1, DCF=30mg/L, DCI=2,7mg/L, pH=8,5,  $G_{MR}=800s^{-1}$ ,  $T_{MR}=20s$ , temperatura=25°C.

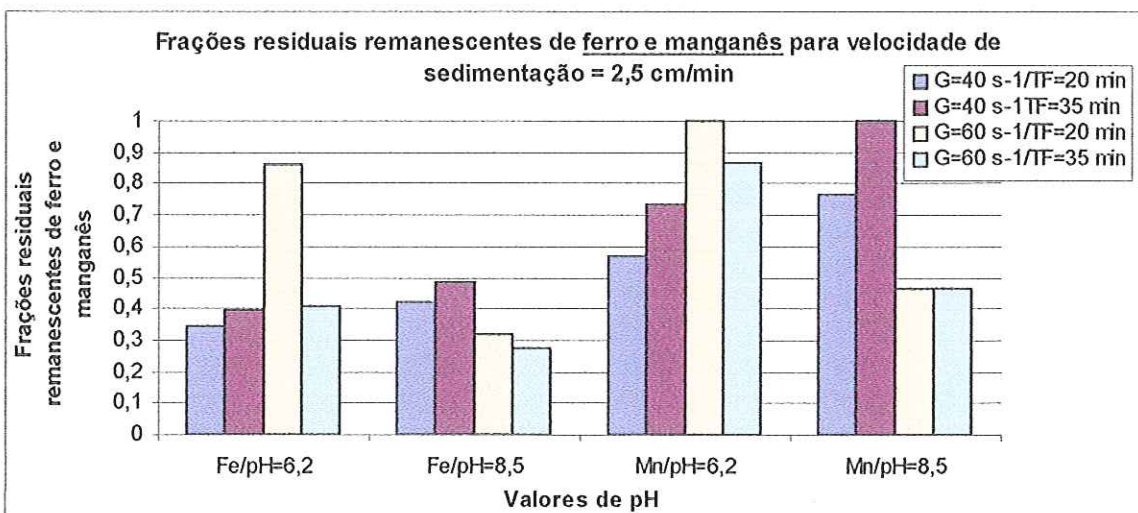


GRÁFICO 5.39 – Frações residuais remanescentes de ferro e manganês em função dos valores de pH para ensaios de sedimentação Tipo 1. Condições de Ensaio: Tipo 1, DCF=30mg/L, DCI=2,7mg/L,  $G_{MR}=800s^{-1}$ ,  $T_{MR}=20s$ , temperatura=25°C.



TABELA 5.15 - Resultados referentes aos ensaios de sedimentação conjugada à oxidação (ensaios Tipo 1, 2 e 3) no valor de pH de 6,2. Condições de Ensaio: Tipo 1, DCF=30mg/L, DCI=2,7mg/L,  $G_{MR}=800s^{-1}$ ,  $T_{MR}=20s$ ,  $G_F=40s^{-1}$ ,  $T_F=20min$ , temperatura=25°C.

Vel. Sed. cm/min	Tipo 1				Tipo 2				Tipo 3			
	Turbidez (uT)	Cor (uC)	Fe ND/D (mg/L)	Mn ND/D (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor (uC)	Fe ND/D (mg/L)	Mn ND/D (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor (uC)	Fe ND/D (mg/L)	Mn ND/D (mg/L)
0,5	0,7	<2			3,1	17			1,2	<2		
1,0	1,2	6			3,5	28			1,4	<2		
2,5	2,1	21	1,25/ 1,33	0,17/ 0,17	4,6	45	3,53/ 4,11	0,24/ 0,40	2,8/ 3,6*	32/ 27*	1,55/1,66 1,43/1,61*	0,24/0,34 0,28/0,35*
5,0	2,8	37			6,2	78			3,5	45		
10,0	3,9	52			11,5	184			7,1	62		

\* Após oxidação/filtração.

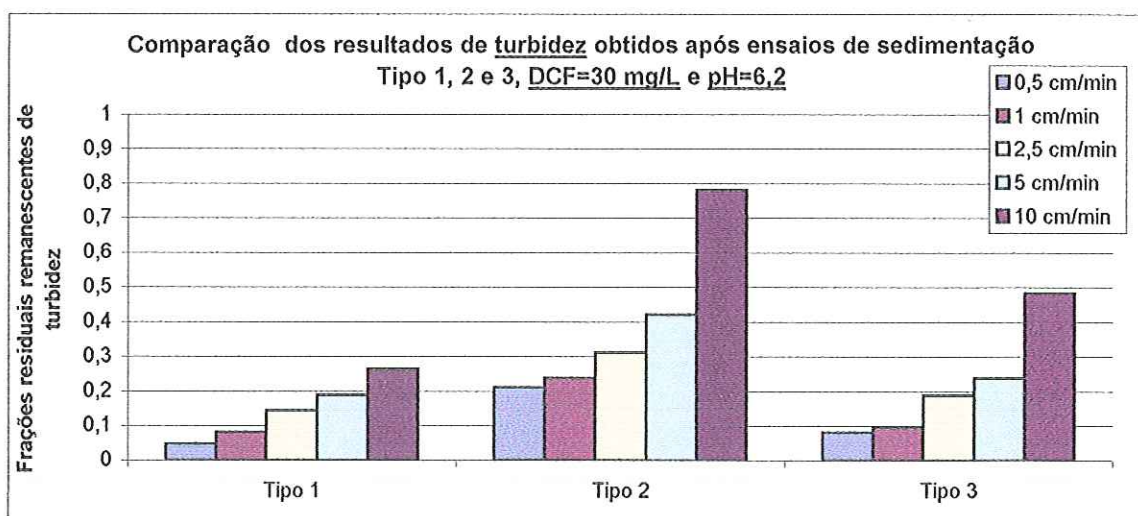


GRÁFICO 5.40 – Frações residuais remanescentes de turbidez obtidas após ensaios de sedimentação Tipos 1, 2 e 3. Condições de Ensaio: Tipos 1, 2 e 3, DCF=30mg/L, DCI=2,7mg/L, pH=6,2,  $G_{MR}=800s^{-1}$ ,  $T_{MR}=20s$ , temperatura=25°C.

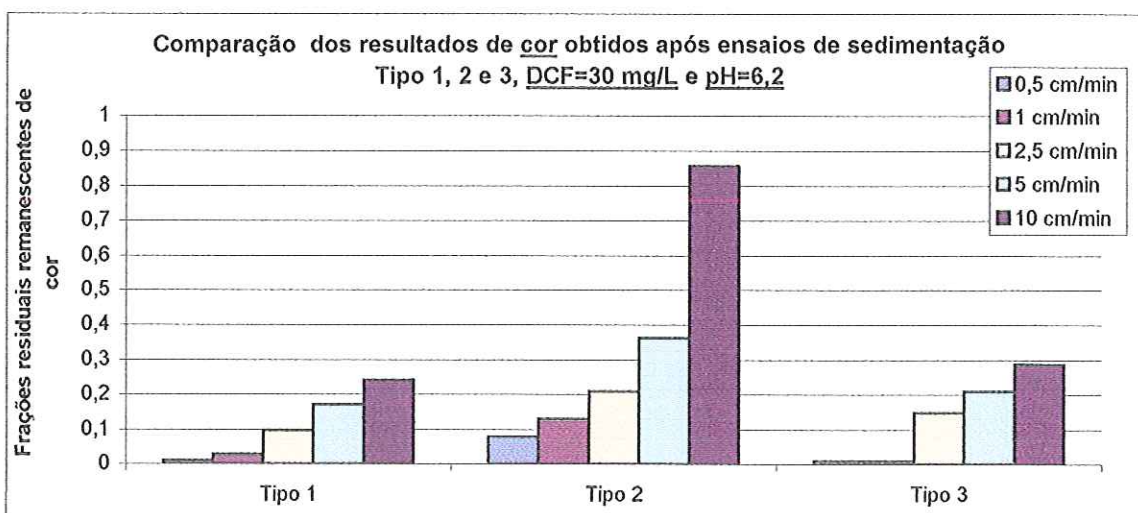


GRÁFICO 5.41 – Frações residuais remanescentes de cor obtidas após ensaios de sedimentação Tipos 1, 2 e 3. Condições de Ensaio: Tipos 1, 2 e 3, DCF=30mg/L, DCI=2,7mg/L, pH=6,2,  $G_{MR}=800s^{-1}$ ,  $T_{MR}=20s$ , temperatura=25°C.

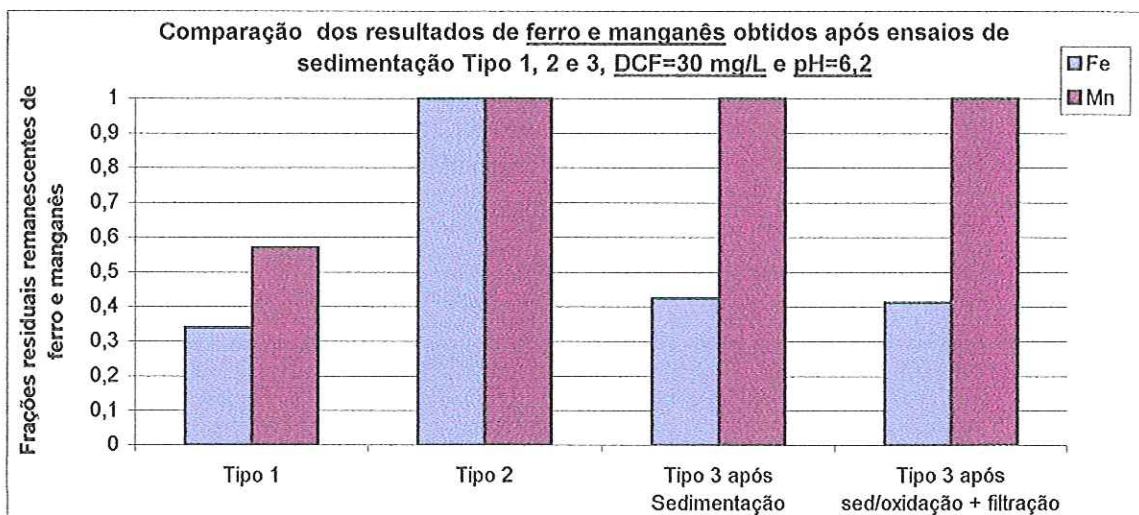


GRÁFICO 5.42 – Frações residuais remanescentes de ferro e manganês obtidas após ensaios de sedimentação Tipos 1, 2 e 3. Condições de Ensaio: Tipos 1, 2 e 3, DCF=30mg/L, DCl=2,7mg/L, pH=6,2,  $G_{MR}=800s^{-1}$ ,  $T_{MR}=20s$ , temperatura=25°C.

TABELA 5.16 - Resultados referentes aos ensaios de sedimentação conjugada à oxidação (ensaios Tipo 1, 2 e 3) no valor de pH de 8,5 e DCF de 30 mg/L. Condições de Ensaio: DCF=30mg/L, DCl=2,7mg/L,  $G_{MR}=800s^{-1}$ ,  $T_{MR}=20s$ ,  $G_F=60s^{-1}$ ,  $T_F=35min$ , temperatura=25°C.

Vel. Sed. cm/min	Tipo 1				Tipo 2				Tipo 3			
	Turbidez (uT)	Cor (uC)	Fe ND/D (mg/L)	Mn ND/D (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor (uC)	Fe ND/D (mg/L)	Mn ND/D (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor (uC)	Fe ND/D (mg/L)	Mn ND/D (mg/L)
0,5	1,6	3			1,5	5			1,5	<2		
1,0	2,0	7			2,7	6			2,4	4		
2,5	2,1	35	1,03/ 1,06	0,09/ 0,14	4,1	36	1,63/ 1,79	0,19/ 0,26	3,6/ 5,5*	13/ 25*	1,05/1,41	0,14/0,20
5,0	2,3	39			6,3	69			5,5			
10,0	3,5	49			9,8	178			10,1			

\* Após oxidação/filtração.

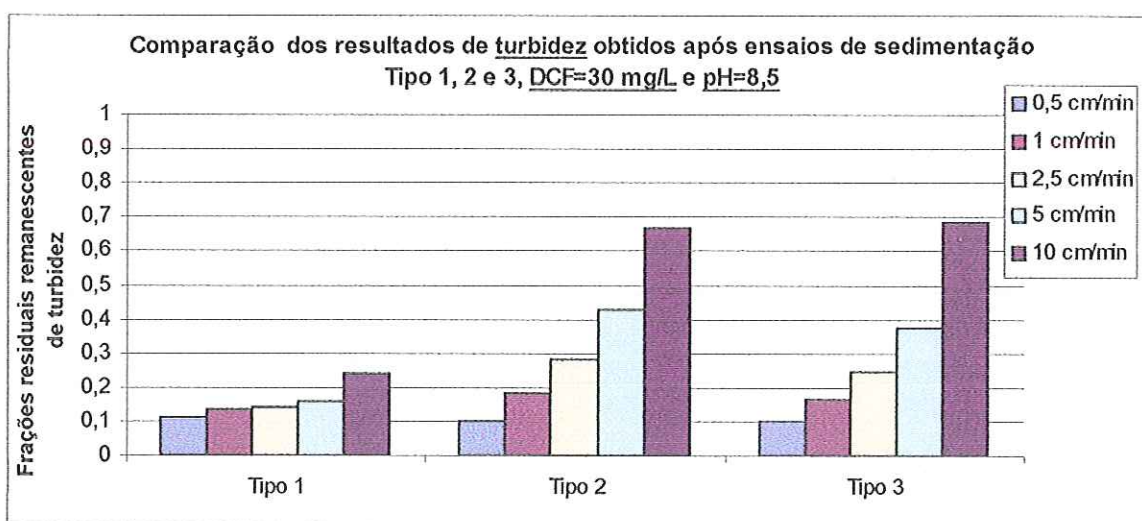


GRÁFICO 5.43 – Frações residuais remanescentes de turbidez obtidas após ensaios de sedimentação Tipos 1, 2 e 3. Condições de Ensaio: Tipos 1, 2 e 3, DCF=30mg/L, DCl=2,7mg/L, pH=8,5,  $G_{MR}=800s^{-1}$ ,  $T_{MR}=20s$ ,  $G_F=60s^{-1}$ ,  $T_F=35min$ , temperatura=25°C.

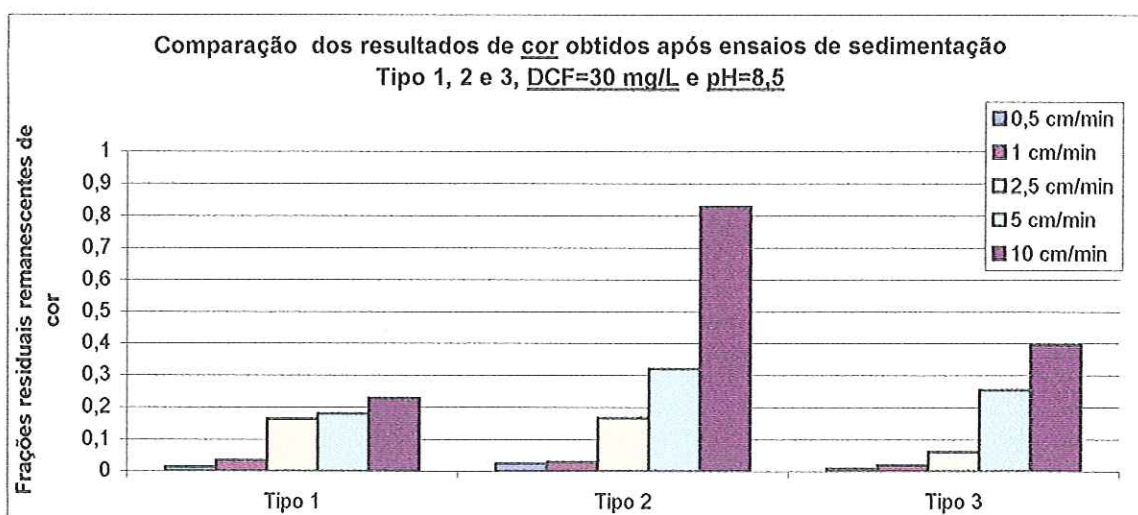


GRÁFICO 5.44 – Frações residuais remanescentes de cor obtidas após ensaios de sedimentação Tipos 1, 2 e 3. Condições de Ensaio: Tipos 1, 2 e 3, DCF=30mg/L, DCI=2,7mg/L, pH=8,5,  $G_{MR}=800s^{-1}$ ,  $T_{MR}=20s$ ,  $G_F=60s^{-1}$ ,  $T_F=35min$ , temperatura= $25^{\circ}C$ .

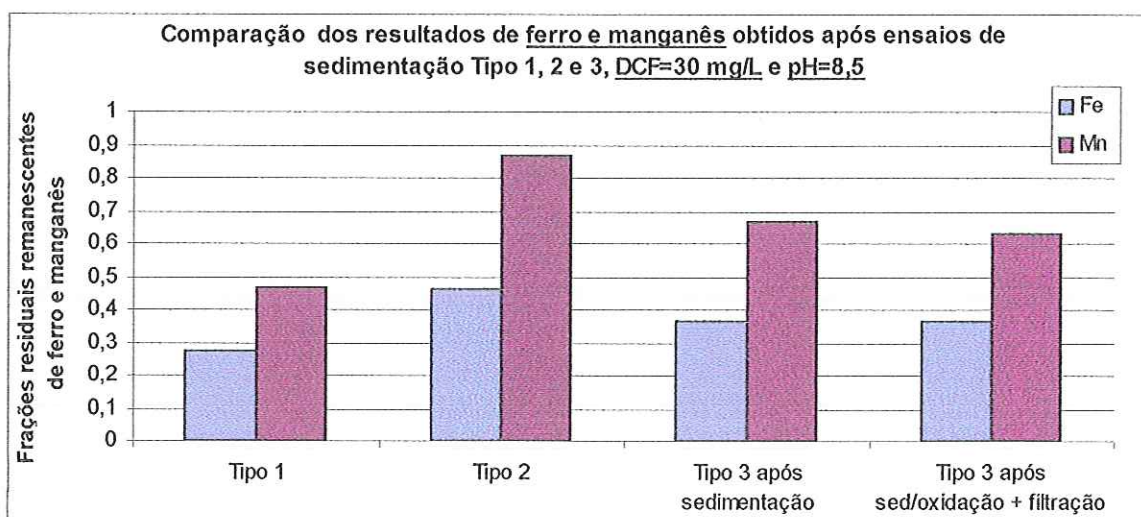


GRÁFICO 5.45 – Frações residuais remanescentes de ferro e manganês obtidas após ensaios de sedimentação Tipos 1, 2 e 3. Condições de Ensaio: Tipos 1, 2 e 3, DCF=30mg/L, DCI=2,7mg/L, pH=8,5,  $G_{MR}=800s^{-1}$ ,  $T_{MR}=20s$ ,  $G_F=60s^{-1}$ ,  $T_F=35min$ , temperatura= $25^{\circ}C$ .

TABELA 5.17 - Melhores resultados obtidos nos ensaios de sedimentação conjugada à oxidação química. Condições de Ensaio: DCF=30mg/L, DCI=2,7mg/L,  $G_{MR}=800s^{-1}$ ,  $T_{MR}=20s$ , temperatura= $25^{\circ}C$ , pH=6,2 ( $G_F=40s^{-1}$ ,  $T_F=20min$ ), pH=8,5 ( $G_F=60s^{-1}$ ,  $T_F=35min$ ).

	<u>pH = 6,2</u>	<u>pH = 8,5</u>
Ensaio Tipo	1	1
Dosagem cloreto férrico (mg/L)	30	30
pH após coagulação	6,2	8,5
Potencial zeta (mV)	-3,0	-16,9
Turbidez oxidação/flotação (uT)	2,1	2,1
Cor oxidação/flotação (uC)	21	35
Fe oxidação/flotação D/ND (mg/L)	1,33/1,25	1,06/1,03
Mn oxidação/flotação D/ND (mg/L)	0,17/0,17	0,14/0,09

TABELA 5.18 - Resultados referentes aos ensaios de sedimentação conjugada à oxidação (ensaios Tipo 1) em diferentes valores de pH com DCF igual a 45 mg/L. Condições de Ensaio: DCF=45mg/L, DCI=2,7mg/L,  $G_{MR}=800s^{-1}$ ,  $T_{MR}=20s$ , temperatura=25°C,  $G_F=40s^{-1}$  e  $T_F=35min$ .

Velocidade Sedimentação (cm/min)	Turbidez (uT)	Cor (uC)	Fe ND/D (mg/L)	Mn ND/D (mg/L)
pH de oxidação = 3,8 / pH após coagulação = 3,8 Potencial zeta (mV) = $18,8 \pm 0,7$ Cor após mistura rápida (uC) = 265 / Turbidez após mistura rápida (uT) = 18,3				
0,5	1,8	147		
1,0	2,7	166		
2,5	6,2	201	3,48/4,18	0,26/0,47
5,0	6,2	201		
10,0	8,7	237		
pH de oxidação = 5,0 / pH após coagulação = 5,0 Potencial zeta (mV) = $15,6 \pm 0,4$ Cor após mistura rápida (uC) = 273 / Turbidez após mistura rápida (uT) = 17,2				
0,5	1,1	83		
1,0	1,7	116		
2,5	4,0	160	2,64/4,19	0,27/0,45
5,0	4,3	173		
10,0	5,6	184		
pH de oxidação = 5,6 / pH após coagulação = 5,6 Potencial zeta (mV) = $11,9 \pm 0,9$ Cor após mistura rápida (uC) = 271 / Turbidez após mistura rápida (uT) = 16,3				
0,5	1,3	112		
1,0	1,6	123		
2,5	3,9	154	2,77/2,95	0,27/0,29
5,0	4,0	156		
10,0	4,9	177		
pH de oxidação = 6,0 / pH após coagulação = 6,0 Potencial zeta (mV) = $-2,0 \pm 0,9$ Cor após mistura rápida (uC) = 275 / Turbidez após mistura rápida (uT) = 17,5				
0,5	1,7	101		
1,0	2,4	125		
2,5	3,0	140	2,43/2,89	0,28/0,50
5,0	3,3	149		
10,0	3,8	159		
pH de oxidação = 6,3 / pH após coagulação = 6,3 Potencial zeta (mV) = $-5,8 \pm 0,9$ Cor após mistura rápida (uC) = 265 / Turbidez após mistura rápida (uT) = 17,3				
0,5	2,1	99		
1,0	2,9	122		
2,5	5,0	167	2,62/2,83	0,32/0,43
5,0	6,0	182		
10,0	6,2	192		
pH de oxidação = 6,6 / pH após coagulação = 6,6 Potencial zeta (mV) = $-11,8 \pm 0,7$ Cor após mistura rápida (uC) = 268 / Turbidez após mistura rápida (uT) = 17,9				
0,5	3,3	97		
1,0	3,7	113		
2,5	7,1	178	2,90/3,55	0,28/0,39
5,0	8,4	200		
10,0	10,0	207		

pH de oxidação = 7,2 / pH após coagulação = 7,2 Potencial zeta (mV) = -15,9 ± 0,4 Cor após mistura rápida (uC) = 270 / Turbidez após mistura rápida (uT) = 18,1				
0,5	2,9	90		
1,0	3,0	94		
2,5	6,2	131	3,08/4,12	0,23/0,48
5,0	6,5	148		
10,0	7,1	157		
pH de oxidação = 7,7 / pH após coagulação = 7,7 Potencial zeta (mV) = -18,8 ± 0,9 Cor após mistura rápida (uC) = 271 / Turbidez após mistura rápida (uT) = 18,3				
0,5	1,7	39		
1,0	2,0	58		
2,5	2,7	69	1,81/2,40	0,12/0,36
5,0	3,2	82		
10,0	3,9	87		
pH de oxidação = 8,1 / pH após coagulação = 8,1 Potencial zeta (mV) = -19,9 ± 0,4 Cor após mistura rápida (uC) = 273 / Turbidez após mistura rápida (uT) = 17,9				
0,5	7,0	16		
1,0	7,7	20		
2,5	8,3	22	0,75/1,32	0,02/0,03
5,0	8,5	24		
10,0	10,2	32		
pH de oxidação = 8,7 / pH após coagulação = 8,7 Potencial zeta (mV) = -23,8 ± 0,5 Cor após mistura rápida (uC) = 273 / Turbidez após mistura rápida (uT) = 18,1				
0,5	2,9	10		
1,0	3,3	11		
2,5	3,7	17	0,94/1,73	0,13/0,18
5,0	3,9	18		
10,0	4,3	22		

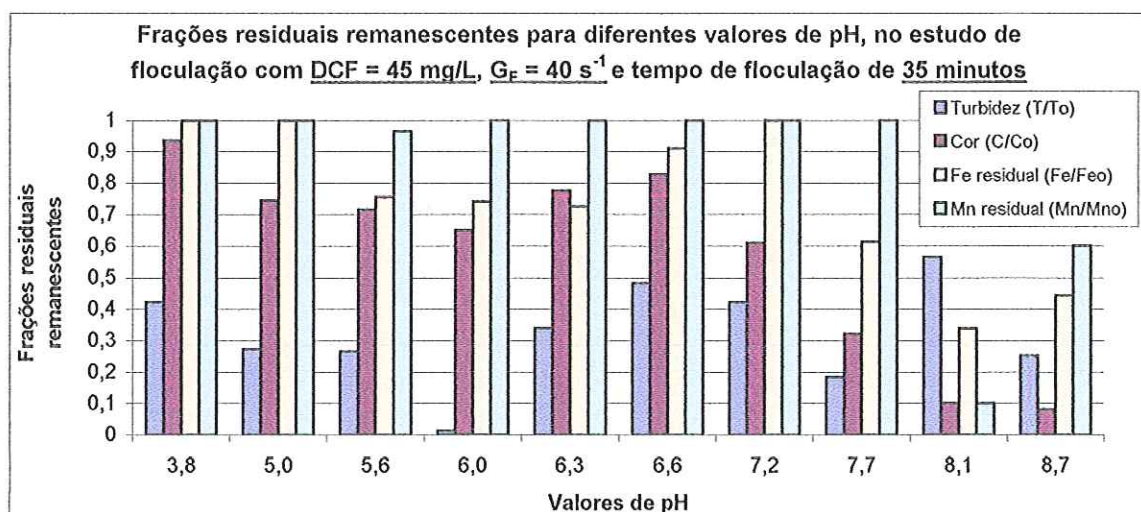


GRÁFICO 5.46 – Frações residuais remanescentes em função de valores de pH para ensaios de sedimentação Tipos 1. Condições de Ensaio: Tipo 1,  $DCF=45\text{mg/L}$ ,  $DCI=2,7\text{mg/L}$ ,  $pH=8,5$ ,  $G_{MR}=800\text{s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20\text{s}$ ,  $G_F=40\text{s}^{-1}$ ,  $T_F=35\text{min}$ , temperatura= $25^\circ\text{C}$ .

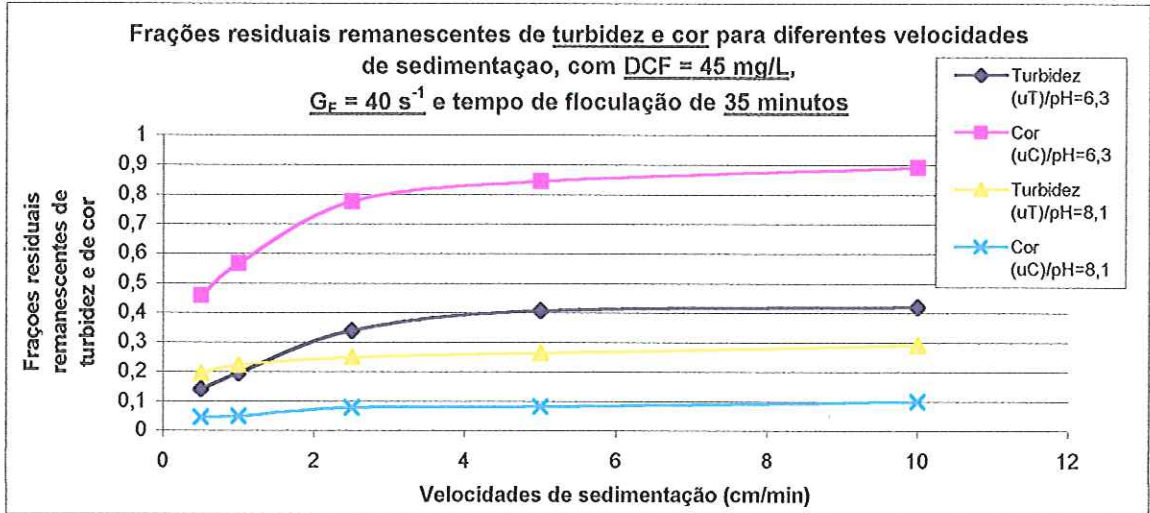


GRÁFICO 5.47 – Frações residuais remanescentes de turbidez e cor em função das velocidades de sedimentação para ensaios de sedimentação Tipo 1. Condições de Ensaio: Tipo 1, DCF=45mg/L, DCI=2,7mg/L,  $G_{MR}=800s^{-1}$ ,  $T_{MR}=20s$ ,  $G_F=40s^{-1}$ ,  $T_F=35min$ , temperatura=25°C.

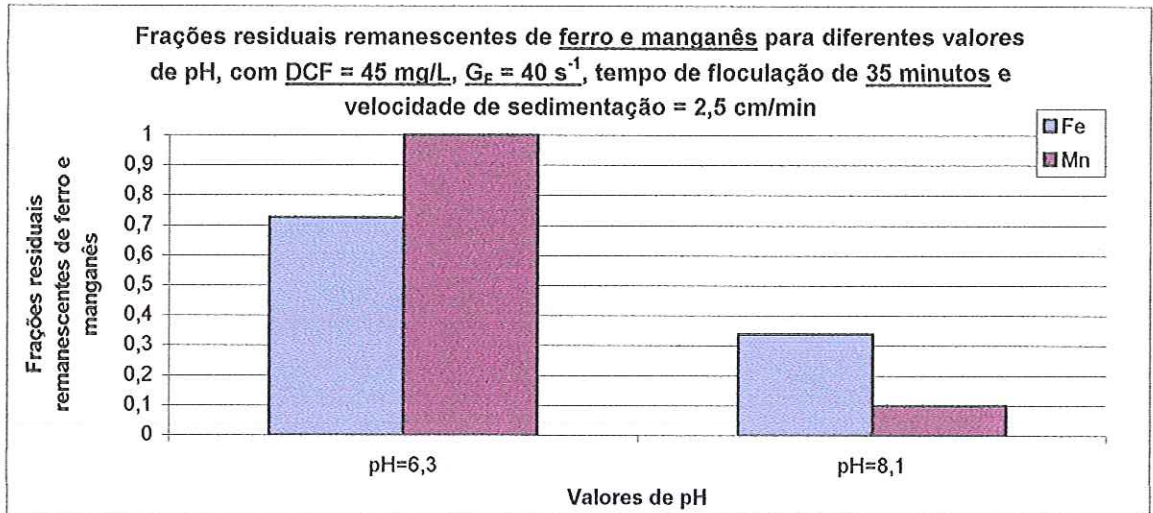


GRÁFICO 5.48 – Frações residuais remanescentes de ferro e manganês em função de valores de pH para ensaios de sedimentação Tipo 1. Condições de Ensaio: Tipo 1, DCF=45mg/L, DCI=2,7mg/L,  $G_{MR}=800s^{-1}$ ,  $T_{MR}=20s$ ,  $G_F=40s^{-1}$ ,  $T_F=35min$ , temperatura=25°C, velocidade de sedimentação=2,5cm/min.

TABELA 5.19 - Resultados referentes aos ensaios de sedimentação conjugada à oxidação (ensaios Tipo 1, 2 e 3) no valor de pH de 6,2 e DCF de 45 mg/L. Condições de Ensaio: DCF=45mg/L, DCI=2,7mg/L,  $G_{MR}=800s^{-1}$ ,  $T_{MR}=20s$ ,  $G_F=40s^{-1}$ ,  $T_F=35min$ , temperatura=25°C.

Vel. Sed. cm/min	Tipo 1				Tipo 2				Tipo 3			
	Turbidez (uT)	Cor (uC)	Fe ND/D (mg/L)	Mn ND/D (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor (uC)	Fe ND/D (mg/L)	Mn ND/D (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor (uC)	Fe ND/D (mg/L)	Mn ND/D (mg/L)
0,5	2,1	99			1,7	63			2,0	20		
1,0	2,9	122			2,2	113			2,4	30		
2,5	5,0	167	2,62/2,83	0,32/0,43	2,4	121	2,28/2,83	0,29/0,41	4,2/5,8	83/74*	2,76/2,90/2,94/2,99*	0,34/0,37/0,28/0,38*
5,0	6,0	182			3,8	156			5,6	114		
10,0	6,2	192			5,0	169			9,5	186		

\* Após oxidação/filtração.

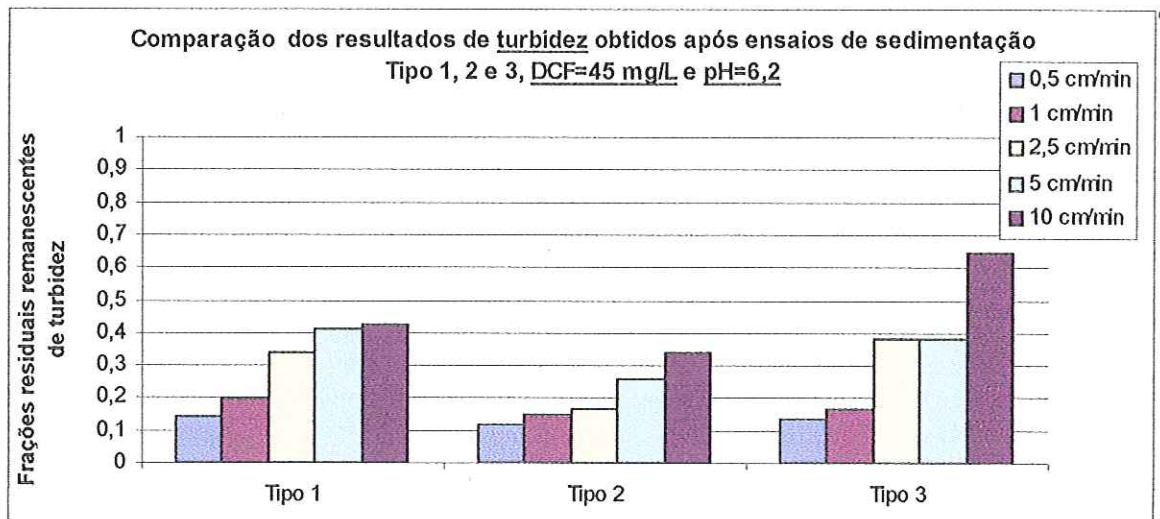


GRÁFICO 5.49 – Frações residuais remanescentes de turbidez obtidas após ensaios de sedimentação Tipos 1, 2 e 3. Condições de Ensaio: Tipos 1, 2 e 3,  $DCF=45\text{mg/L}$ ,  $DCI=2,7\text{mg/L}$ ,  $pH=6,2$ ,  $G_{MR}=800\text{s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20\text{s}$ ,  $G_F=40\text{s}^{-1}$ ,  $T_F=35\text{min}$ , temperatura= $25^\circ\text{C}$ .

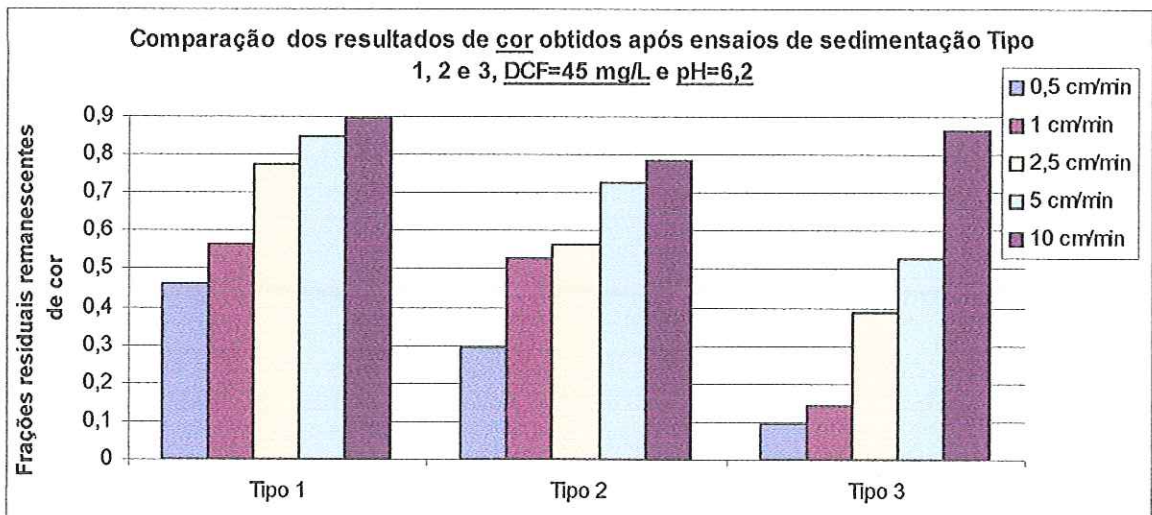


GRÁFICO 5.50 – Frações residuais remanescentes de cor obtidas após ensaios de sedimentação Tipos 1, 2 e 3. Condições de Ensaio: Tipos 1, 2 e 3,  $DCF=45\text{mg/L}$ ,  $DCI=2,7\text{mg/L}$ ,  $pH=6,2$ ,  $G_{MR}=800\text{s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20\text{s}$ ,  $G_F=40\text{s}^{-1}$ ,  $T_F=35\text{min}$ , temperatura= $25^\circ\text{C}$ .

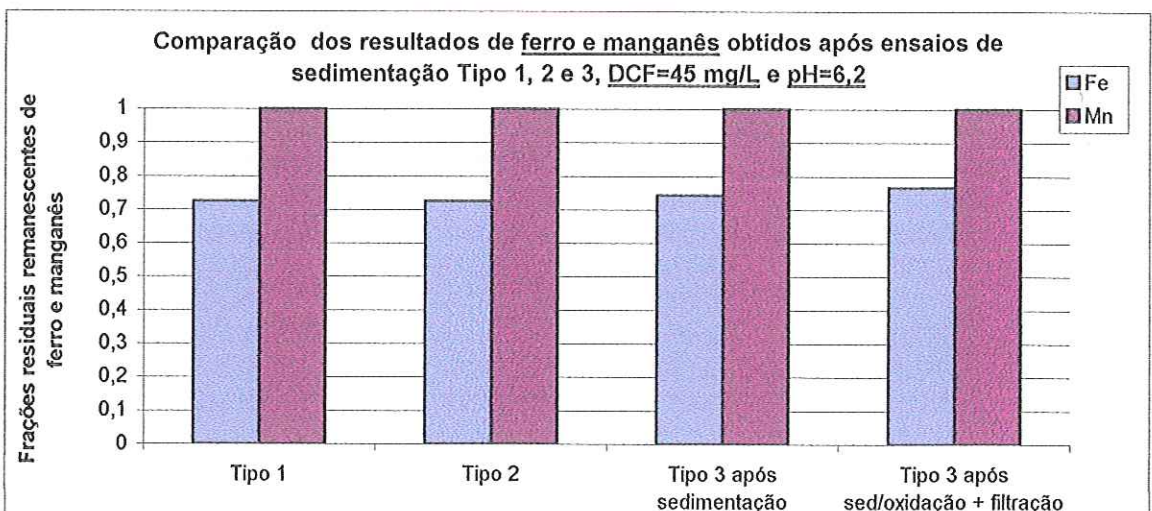


GRÁFICO 5.51 – Frações residuais remanescentes de ferro e manganês obtidas após ensaios de sedimentação Tipos 1, 2 e 3. Condições de Ensaio: Tipos 1, 2 e 3,  $DCF=45\text{mg/L}$ ,  $DCI=2,7\text{mg/L}$ ,  $pH=6,2$ ,  $G_{MR}=800\text{s}^{-1}$ ,  $T_{MR}=20\text{s}$ ,  $G_F=40\text{s}^{-1}$ ,  $T_F=35\text{min}$ , temperatura= $25^\circ\text{C}$ .

TABELA 5.20 - Resultados referentes aos ensaios de sedimentação conjugada à oxidação (ensaios Tipo 1, 2 e 3) no valor de pH de 8,1 e DCF de 45 mg/L. Condições de Ensaio: DCF=45mg/L, DCI=2,7mg/L,  $G_{MR}=800s^{-1}$ ,  $T_{MR}=20s$ ,  $G_F=40s^{-1}$ ,  $T_F=35min$ , temperatura=25°C.

Vel. Sed. cm/min	Tipo 1				Tipo 2				Tipo 3			
	Turbidez (uT)	Cor (uC)	Fe ND/D (mg/L)	Mn ND/D (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor (uC)	Fe ND/D (mg/L)	Mn ND/D (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor (uC)	Fe ND/D (mg/L)	Mn ND/D (mg/L)
0,5	7,0	16			2,3	19			1,5	<2		
1,0	7,7	20			4,2	44			2,5	6		
2,5	8,3	22	0,75/ 1,32	0,03/ 0,04	5,8	52	1,94/ 2,03	0,15/ 0,20	3,8/ 4,6*	12/ 26*	1,77/2,37 1,94/1,96*	0,26/0,27 0,19/0,28*
5,0	8,5	24			10,0	61			6,0	16		
10,0	10,2	32			14,1	79			8,8	32		

\* Após oxidação/filtração.

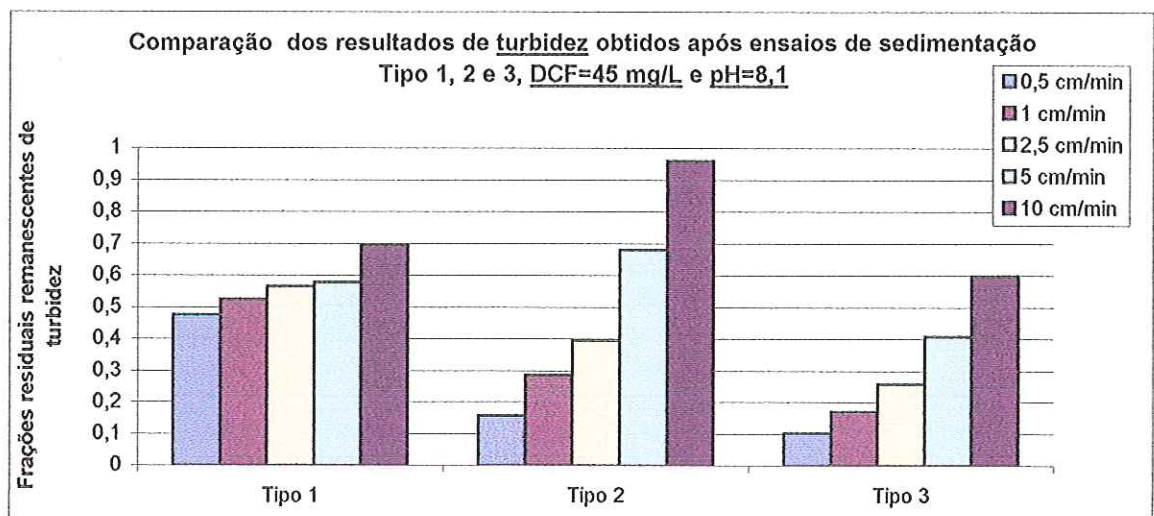


GRÁFICO 5.52 – Frações residuais remanescentes de turbidez obtidas após ensaios de sedimentação Tipos 1, 2 e 3. Condições de Ensaio: Tipos 1, 2 e 3, DCF=45mg/L, DCI=2,7mg/L, pH=8,1,  $G_{MR}=800s^{-1}$ ,  $T_{MR}=20s$ ,  $G_F=40s^{-1}$ ,  $T_F=35min$ , temperatura=25°C.

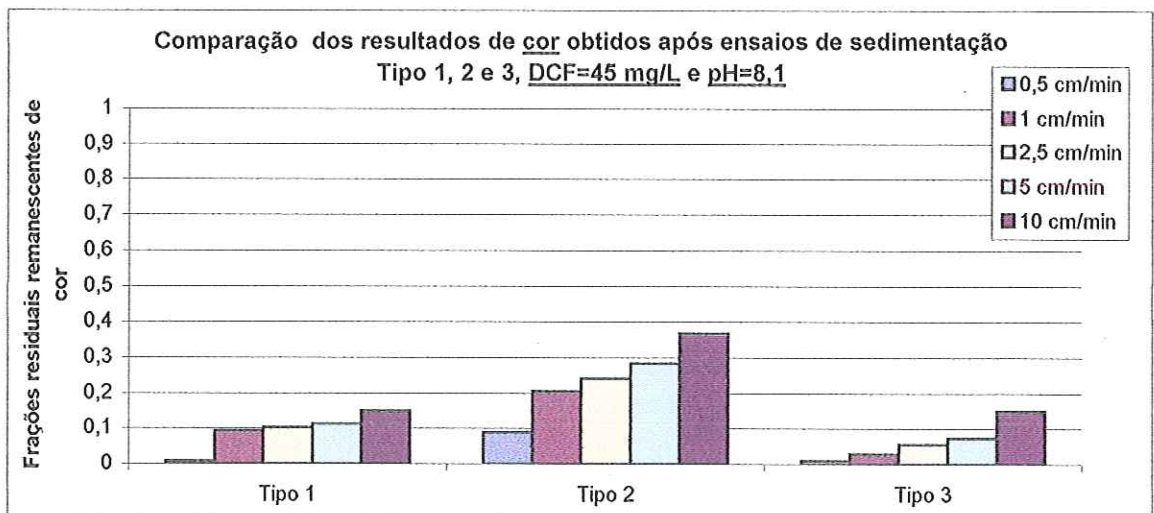


GRÁFICO 5.53 – Frações residuais remanescentes de cor obtidas após ensaios de sedimentação Tipos 1, 2 e 3. Condições de Ensaio: Tipos 1, 2 e 3, DCF=45mg/L, DCI=2,7mg/L, pH=8,1,  $G_{MR}=800s^{-1}$ ,  $T_{MR}=20s$ ,  $G_F=40s^{-1}$ ,  $T_F=35min$ , temperatura=25°C.



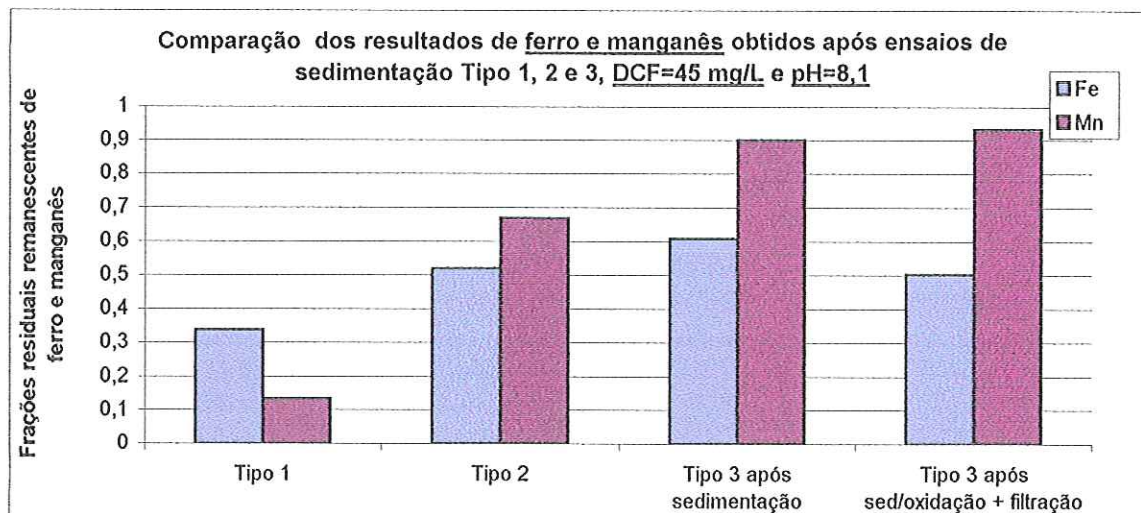


GRÁFICO 5.54 – Frações residuais remanescentes de ferro e manganês obtidas após ensaios de sedimentação Tipos 1, 2 e 3. Condições de Ensaio: Tipos 1, 2 e 3, DCF=45mg/L, DCI=2,7mg/L, pH=8,1,  $G_{MR}=800s^{-1}$ ,  $T_{MR}=20s$ ,  $G_F=40s^{-1}$ ,  $T_F=35min$ , temperatura=25°C.

TABELA 5.21 – Resumo dos melhores resultados obtidos nos ensaios de sedimentação conjugada à oxidação química. Condições de Ensaio: Tipos 1, 2 e 3, DCI=2,7mg/L,  $G_{MR}=800s^{-1}$ ,  $T_{MR}=20s$ ,  $G_F=40s^{-1}$ ,  $T_F=35min$ , temperatura=25°C.

Ensaio Tipo	pH = 6,2		pH = 8,5	
	1	2	1	1
Dosagem cloreto férrico (mg/L)	30	45	30	45
pH após coagulação	6,2	6,3	8,5	8,1
Potencial zeta (mV)	-3,0	-5,8	-16,9	-19,9
Turbidez oxidação/flotação (uT)	2,1	2,4	2,1	8,3
Cor oxidação/flotação (uC)	21	121	35	22
Fe oxidação/flotação D/ND (mg/L)	1,33/1,25	2,83/2,28	1,06/1,03	1,32/0,75
Mn oxidação/flotação D/ND (mg/L)	0,17/0,17	0,41/0,29	0,14/0,09	0,04/0,03

#### 5.4.2. Resumo e Comparação dos Melhores Resultados Obtidos nos Ensaio de Flotação (Fase 1) e de Sedimentação (Fase 2)

O Quadro 5.2 apresenta um fluxograma ilustrativo das diversas fases da ETAPA I de estudo, na qual foi utilizada instalação de flotação e de sedimentação, em colunas em escala de laboratório. Este fluxograma é auto-explicativo e demonstra, de forma clara, a estratégia metodológica e os melhores resultados de cada fase dessa primeira etapa de estudo.

Os melhores resultados obtidos após o estudo para adequação da coagulação e oxidação química para a flotação, referem-se à dosagem de 30 mg/L de cloreto férrico e dosagem de 2,7 mg/L de hipoclorito de sódio, nas seguintes condições de ensaio: pH de coagulação e oxidação entre 5,8 e 6,1,  $G_F$  igual a  $60 s^{-1}$ ,  $T_F$  igual a 20 minutos, 10% de recirculação e ensaios Tipo 1 (aplicação do oxidante juntamente com o coagulante no momento da mistura rápida). Nessas condições obteve-se turbidez residual entre 0,71 e 1,0 uT, cor aparente residual menor que 2 uC, concentração de ferro residual total entre 0,25 e 0,33 mg/L, concentração de ferro detectável sem digestão química de 0,04 mg/L, concentração de manganês residual total entre 0,08 e 0,11 mg/L e concentração de manganês detectável sem

digestão química entre 0,08 e 0,09 mg/L. Após filtração em papel de filtro Whatman 40, verificou-se que, estranhamente, a turbidez residual subiu para 1,20 uT, a cor aparente residual subiu para 7 uC, mas concentrações de ferro e manganês totais e as detectáveis sem digestão química, não foram detectadas, o que nos indica que a concentração restante de ferro e manganês foi retida na membrana.

Na seqüência foram estudadas as condições de floculação, ou seja, gradiente médio de velocidade na floculação e tempo de floculação e observou-se que a faixa de gradiente  $G_F$  entre 60 e 80  $s^{-1}$ , apresentou os melhores resultados com tempo de floculação de 20 minutos. Os resultados foram: turbidez residual entre 0,7 e 0,8 uT, cor aparente residual menor que 2 uC, ferro total com concentração entre 0,25 e 0,29 mg/L, ferro detectável sem digestão química com concentração entre 0,04 e 0,05 mg/L e manganês com concentração entre 0,09 e 0,15 mg/L, após digestão química e entre 0,07 e 0,10 mg/L, sem a digestão química.

Na segunda fase da ETAPA I, estudo da sedimentação aliada à oxidação química, os resultados foram inferiores aos obtidos quando se estudou a flotação aliada à oxidação química.

Os melhores resultados obtidos após o estudo para adequação dos parâmetros de floculação e pH de coagulação para sedimentação, referem-se a dosagem de 30 mg/L de cloreto férrico e dosagem de 2,7 mg/L de hipoclorito de sódio, pH de coagulação e oxidação de 8,5 ( $G_F$  igual a 60  $s^{-1}$ ,  $T_F$  igual a 35 minutos) para ensaios Tipo 1 (aplicação do oxidante juntamente com o coagulante no momento da mistura rápida). Nessas condições obteve-se turbidez residual de 2,1 uT, cor aparente residual de 35 uC, concentração de ferro total de 1,06 mg/L, concentração de ferro detectável sem digestão química de 1,03 mg/L, concentração de manganês total de 0,14 mg/L e concentração de manganês detectável sem digestão química de 0,09 mg/L.

Na seqüência, foram estudados os demais tipos de ensaios (Tipos 2 e 3) e verificou-se que os resultados obtidos nos ensaios Tipo 1, foram os melhores.

Analisando-se o pH de coagulação mais adequado para a dosagem de 45 mg/L de cloreto férrico, verifica-se novamente que, valores elevados de pH (em torno de 8,1) apresentaram os melhores resultados para ensaios Tipo 1. Nessas condições, a turbidez residual foi de 8,3 uT, a cor aparente residual foi de 22 uC, o ferro total residual apresentou-se com concentração de 1,32 mg/L, o ferro detectável sem digestão química foi de 0,75 mg/L, o manganês total residual apresentou-se com concentração de 0,03 mg/L e o manganês residual detectável sem digestão química foi de 0,02 mg/L.

Mesmo com os resultados claramente inferiores aos obtidos com a concentração de 30 mg/L, foi realizada a análise dos dois outros tipos de ensaios (Tipos 2 e 3). Verificou-se que, os ensaios Tipo 1 apresentaram os melhores resultados.

Os melhores resultados de remoção de cor, turbidez, ferro e manganês foram obtidos com uso da flotação aliada à oxidação química, nas seguintes condições: ensaios Tipo 1, 30 mg/L de cloreto férrico, 2,7 mg/L de hipoclorito de sódio, pH de coagulação e oxidação de 6,3,  $G_F$  entre 60 e 80  $s^{-1}$  e  $T_F$  igual a 20 minutos.

Após selecionados os melhores resultados obtidos através da flotação conjugada à oxidação química e os obtidos através da sedimentação conjugada à oxidação química, é possível verificar que a flotação associada à oxidação química foi mais eficiente que a sedimentação também associada à oxidação química. Considerando-se as melhores condições de ensaio para cada fase, nota-se que para os ensaios de flotação, a turbidez residual foi de 0,7 uT, a cor aparente residual menor que 2 uC, ferro total residual de 0,25 mg/L e o manganês total residual de 0,09 mg/L, enquanto nos ensaios de sedimentação, o valor mais elevado de pH (em torno de 8,5) apresentou os seguintes residuais (turbidez de 2,1 uT, cor aparente de 35 uC, ferro total de 1,06 mg/L e manganês total de 0,14 mg/L), conforme Gráfico 5.55.

É importante ressaltar que a flotação, mesmo realizada em valor de pH em torno de 6,2, apresentou maior remoção de cor aparente e ferro do que a sedimentação realizada em valores adequados para a oxidação do ferro. Isto indica que o ferro foi removido, preponderantemente, junto com a matéria orgânica através da coagulação/floculação/flotação.

Com base nos resultados apresentados até aqui, observa-se que as amostras de ferro quando submetidas à digestão ácida apresentaram resultados diferentes se comparadas à amostras não submetidas a essa mesma digestão, o que demonstrou parcelas significativas do ferro residual complexadas à matéria orgânica, ao contrário do íon manganês que se encontrava na maior parte, na forma livre.

Pode-se concluir que a flotação foi capaz de remover, com elevada eficiência, juntamente matéria orgânica (ácido húmico) e o ferro a ela complexado.

Através do Gráfico 5.56, que apresenta uma relação entre os valores de potencial zeta e pH, pode-se observar que, o potencial zeta se aproxima de 0,0 no valor de pH em torno de 6,2, valor este selecionado como o mais apropriado para a coagulação dessa água de estudo. O potencial zeta pode fornecer indicações do grau de estabilidade de um sistema coloidal. O Gráfico 5.56 mostra que, para dosagem de 30 mg/L de cloreto férrico, o potencial zeta esteve próximo de zero quando o valor de pH situou-se em torno de 6,2, exatamente o valor selecionado como o mais apropriado para a coagulação dessa água de estudo. Tais condições proporcionaram desestabilização eficiente de partículas primárias presentes na água de estudo.

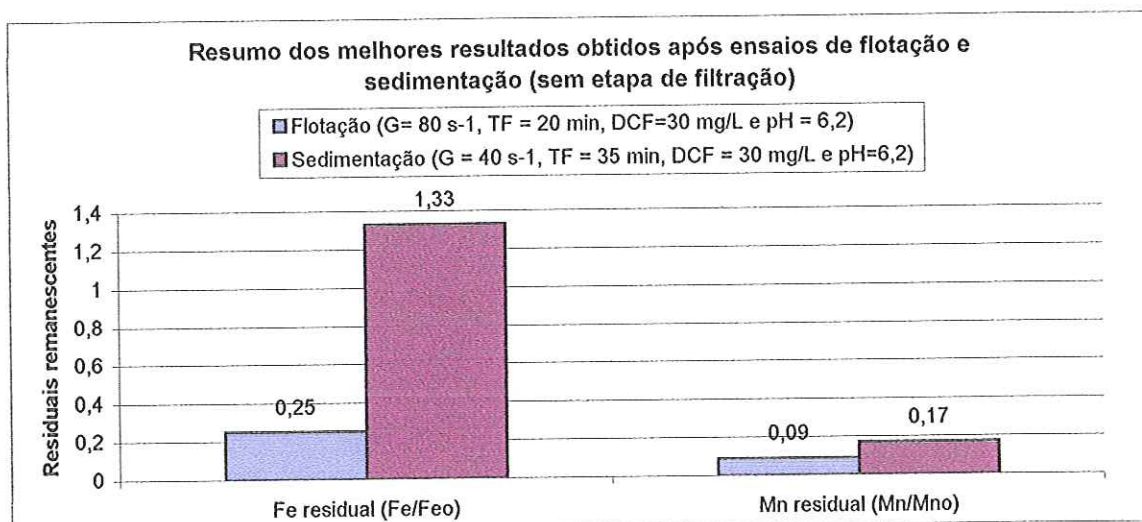
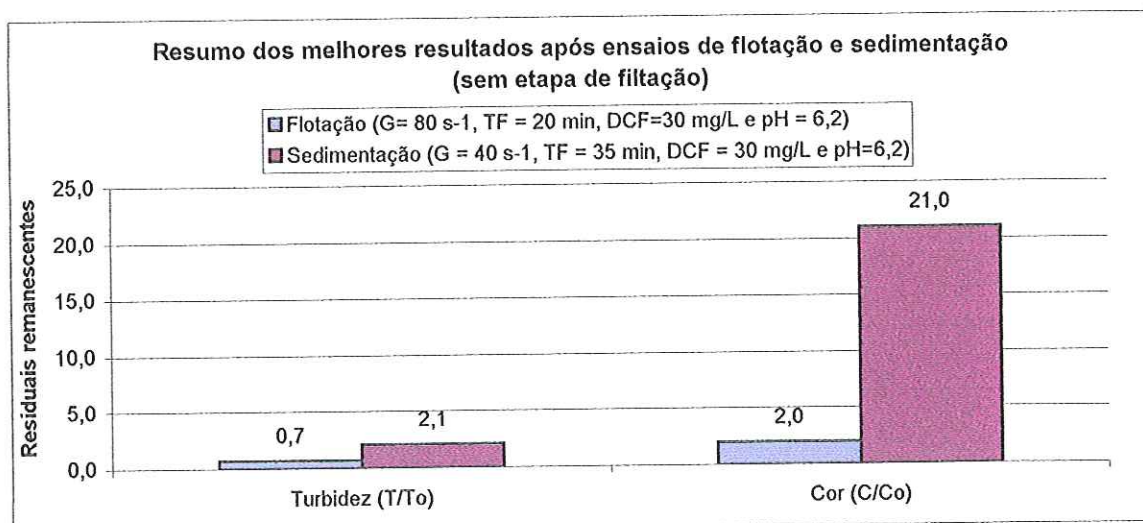


GRÁFICO 5.55 – Frações residuais remanescentes de flotação e sedimentação que representam ensaios com maior eficiência. Condições de Ensaio de Flotação: Tipo 1, pH =  $6,2 \pm 0,2$ , DCF= $30 \pm 1$  mg/L, DCI= $2,65 \pm 0,2$  mg/L,  $G_{MR}=800 \pm 10$  s<sup>-1</sup>,  $T_{MR}=20$ s,  $G_F=80 \pm 5$  s<sup>-1</sup>,  $T_F=20$  min, temperatura= $25 \pm 1$  °C, R = 10%, pressão de saturação =  $450 \pm 10$  kPa. Condições de Ensaio de Sedimentação: Tipo 1, pH =  $6,2 \pm 0,2$ , DCF= $30 \pm 1$  mg/L, DCI= $2,65 \pm 0,2$  mg/L,  $G_{MR}=800 \pm 10$  s<sup>-1</sup>,  $T_{MR}=20$ s,  $G_F=40 \pm 5$  s<sup>-1</sup>,  $T_F=20$  min, temperatura= $25 \pm 1$  °C.

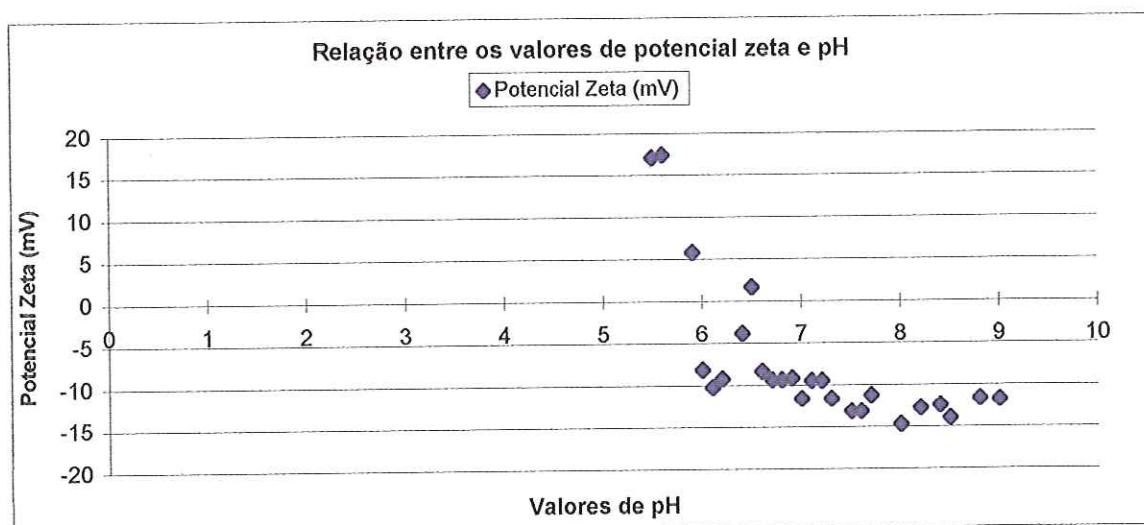
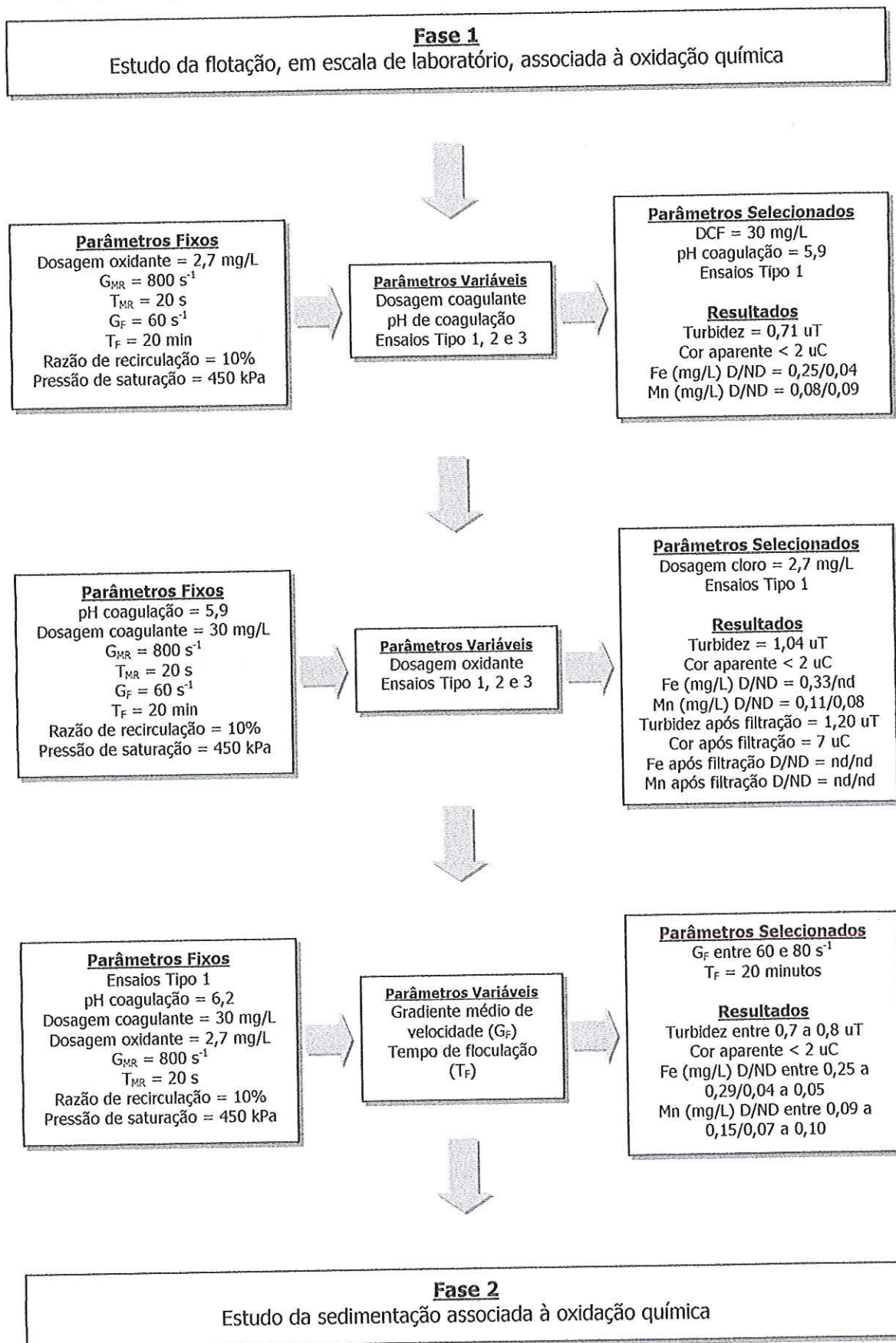
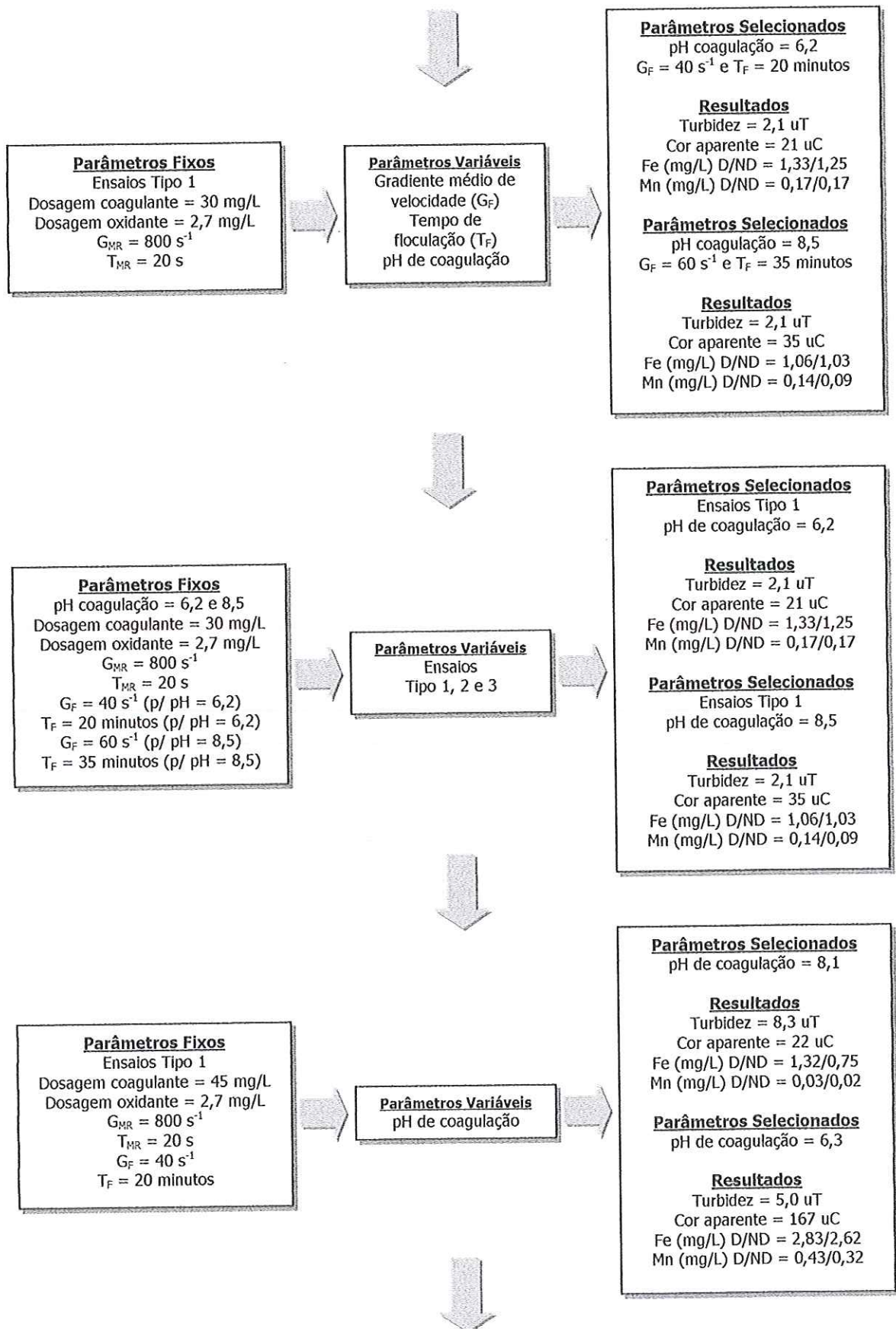


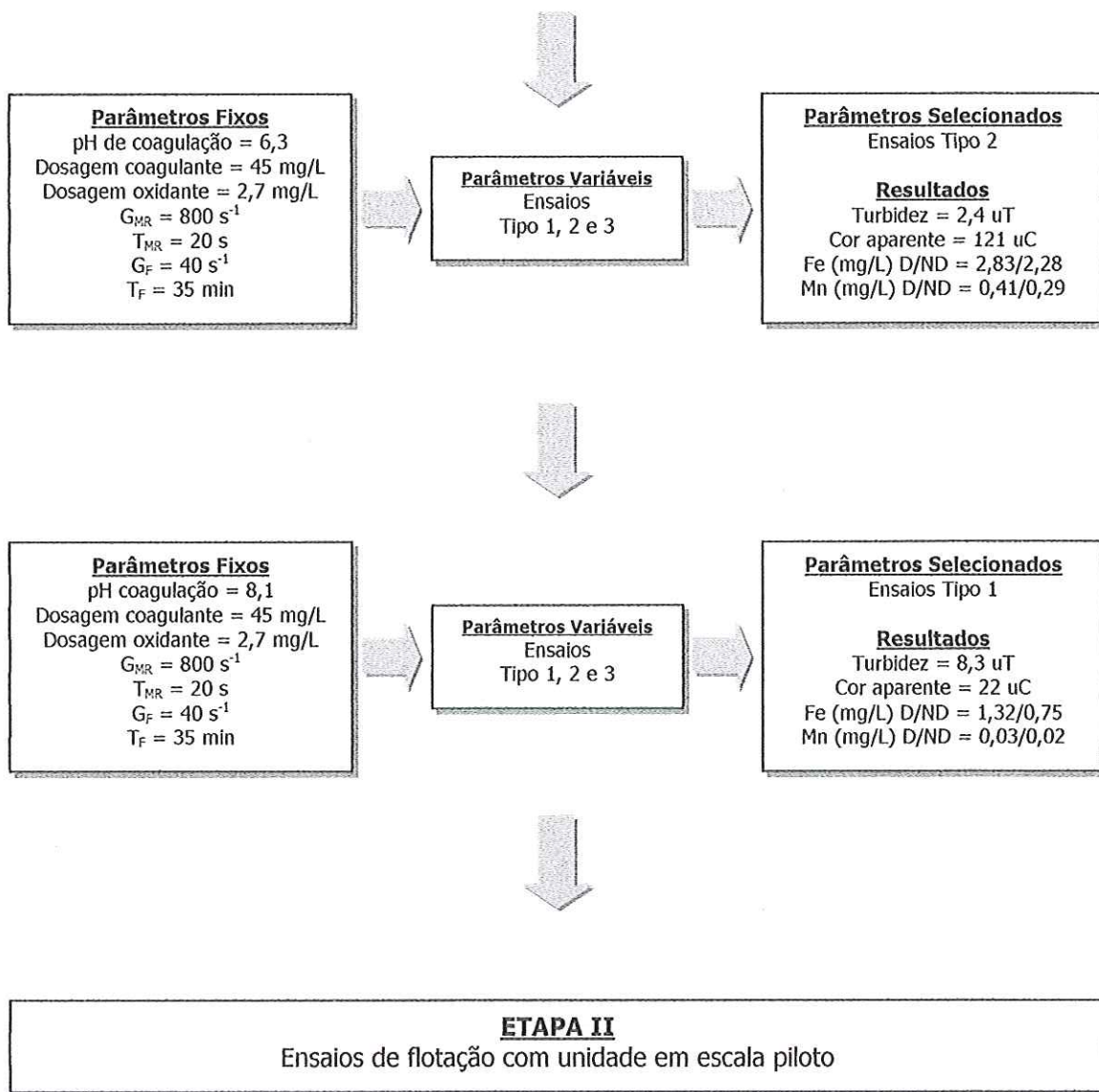
GRÁFICO 5.56 – Relação entre os valores de pH e de potencial zeta. Condições de Ensaio de Flotação: Tipo 1, pH =  $6,2 \pm 0,2$ , DCF= $30 \pm 1$  mg/L, DCI= $2,65 \pm 0,2$  mg/L,  $G_{MR}=800 \pm 10$  s<sup>-1</sup>,  $T_{MR}=20$ s,  $G_F=80 \pm 5$  s<sup>-1</sup>,  $T_F=20$  min, temperatura= $25 \pm 1$  °C, R = 10%, pressão de saturação =  $450 \pm 10$  kPa.

QUADRO 5.2 – Resumo dos melhores resultados referentes aos ensaios de FAD conjugada à oxidação química (Fase 1) e de sedimentação associada à oxidação química (Fase 2).



**Fase 2**  
Estudo da sedimentação associada à oxidação química





## 5.5. ESTUDO DA REMOÇÃO DE FERRO E MANGANÊS UTILIZANDO A OXIDAÇÃO QUÍMICA ASSOCIADA A FAD EM ESCALA PILOTO

A ETAPA II, dividida em 6 fases, compreendeu os ensaios realizados em unidade piloto de FAD de alta taxa.

A Fase 1 (estudo da eficiência da câmara de saturação) é apresentada antes da apresentação dos resultados das demais fases por consistir um dos principais parâmetros da flotação.

Na Fase 2, estudou-se a influência do gradiente médio de velocidade na floculação ( $G_F$ ) para verificação do desempenho da unidade FAD de alta taxa. Os valores de  $G_F$  usados foram:  $G_F = 30/30/25 \text{ s}^{-1}$ ,  $G_F = 60/60/60 \text{ s}^{-1}$  e  $G_F = 80/80/80 \text{ s}^{-1}$ .

Na Fase 3, foram estudados três valores de tempo de floculação (10, 15 e 20 minutos) e, para cada um deles, variou-se a taxa de aplicação superficial na unidade de FAD de alta taxa (13 – Fase 3a, 26 – Fase 3b, 39 – Fase 3c e 51 – Fase 3d m/h) e a quantidade de ar fornecida ( $5,7 \pm 0,1$ ,  $4,3 \pm 0,1$ ,  $2,9 \pm 0,1$  g de ar/m<sup>3</sup> de água).

Na Fase 4 verificou-se a eficiência da FAD sem oxidação química (sem uso de hipoclorito de sódio) e analisou-se a eficiência da FAD com redução da dosagem de coagulante (25 e 20 mg/L).

A Fase 5 envolveu a filtração do efluente da FAD com unidade de filtração em areia.

Na Fase 6 foi estimado o grau de supersaturação de ar presente na água em vários pontos da unidade piloto de FAD de alta taxa.

### 5.5.1. Resultados Obtidos no Estudo da Eficiência da Câmara de Saturação (Fase 1 da ETAPA II)

Um dos principais parâmetros do processo de flotação por ar dissolvido é a quantidade de ar fornecida para a flotação ( $S_{FLO}$ ). Para definição desse parâmetro, foi necessário estabelecerem-se curvas de quantidade de ar dissolvido (liberável) em função da pressão (função da temperatura da água). De acordo com REALI (1991), nesse processo, para uma dada pressão e temperatura, a quantidade de ar fornecida ( $S_{CS}$ ) é determinada através do ajuste da vazão de recirculação ( $r$ ) fornecida pela câmara de saturação. Portanto, a quantidade de ar fornecida já ajustada no flotor é chamada  $S_{FLO}$ .

Para determinação da capacidade de saturação ( $S_{CS}$ ) da câmara de saturação em estudo, utilizou-se a metodologia desenvolvida por REALI (1991). Tal metodologia preconiza que, com a câmara de saturação, sejam realizados ensaios específicos para se obter a capacidade de saturação em função da pressão na câmara e da temperatura da água.



A Tabela 5.22 e o Gráfico 5.57 abaixo mostram os valores de  $S_{CS}$  obtidos na câmara de saturação utilizada através do método de REALI. A capacidade média de saturação da câmara utilizada foi 75,26 g de ar/m<sup>3</sup> de água recirculada.

TABELA 5.22 – Quantidade de ar na câmara de saturação para pressão de saturação de 450 kPa e temperatura de 25 °C.

Ensaio	Temp. água (°C)	Temp. ar (°C)	Pressão de vapor (mmHg)	Taxa na câmara saturação (m/h)	Pressão na câmara saturação (Kpa)	Pressão atmosférica (mmHg)	Volume de ar liberado (mL)	Volume de água utilizado (mL)	Saturação condições ambientais (mL/L)	Saturação em massa $S_{CS}$ (mg/L)
1	25,0	24,0	22,4	9,2 ± 1	450	677,6	9,0	122,6	73,41	76,35
2	25,0	24,0	22,4	13,3 ± 1	450	677,6	9,0	122,6	73,41	76,35
3	25,0	24,0	22,4	17,1 ± 1	450	677,6	9,0	122,6	73,41	76,35
4	25,0	24,0	22,4	21,3 ± 1	450	677,5	8,8	122,8	71,66	74,53
5	25,0	24,0	22,4	22,0 ± 1	450	677,5	8,9	122,9	72,42	75,31
8	25,0	24,0	22,4	9,2 ± 1	400	677,5	8,5	123,5	68,83	71,58
9	25,0	24,0	22,4	9,2 ± 1	450	677,6	9,0	122,6	73,41	76,35
									Média	75,26

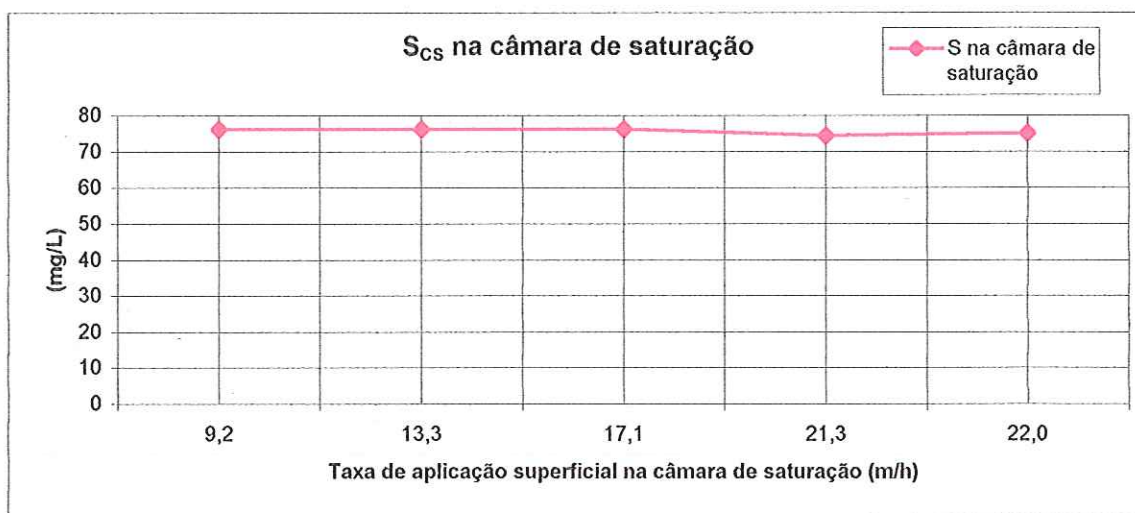
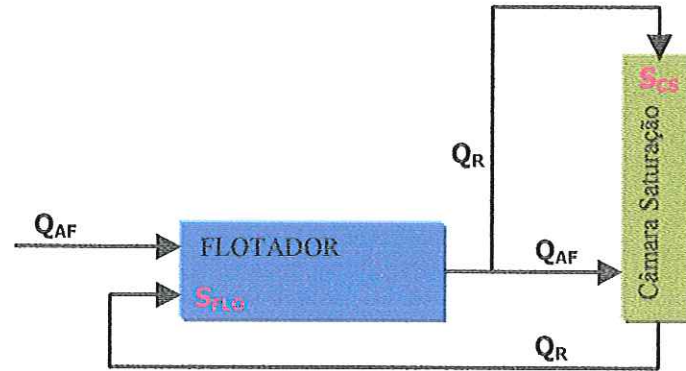


GRÁFICO 5.57 – Quantidade de ar na câmara de saturação ( $S_{CS}$ ) em função da taxa de aplicação superficial (m/h) para pressão de saturação de 450 kPa e temperatura de 25 °C.

As taxas usualmente usadas em câmaras de saturação encontram-se na faixa de 40 a 100 m/h. Nos ensaios realizados com a câmara de saturação da instalação piloto deste trabalho, foram aplicadas somente taxas de até 22 m/h, tendo em vista limitações no medidor magnético de vazão responsável pela medição da vazão de recirculação.

Para o cálculo da quantidade de ar fornecida para a flotação ( $S_{FLO}$ ) em função da vazão de recirculação, deve-se ajustar a quantidade de ar presente na câmara de saturação ( $S$ ) através do valor de recirculação, da seguinte forma:



$$(Q_{AF} + Q_R)S_{FLO} = S_{CS}Q_R \quad (17)$$

$$S_{FLO} = \frac{S_{CS}Q_R}{Q_{AF} + Q_R} \quad (18)$$

$$Q_R = rQ_{AF} \quad (19)$$

$$S_{FLO} = \frac{S_{CS}rQ_{AF}}{Q_{AF} + rQ_{AF}} \quad (20)$$

$$S_{FLO} = \frac{S_{CS}rQ_{AF}}{Q_{AF}(1+r)} \quad (21)$$

$$S_{FLO} = \frac{S_{CS}r}{(1+r)} \quad (22)$$

$$S_{FLO} = S \left( \frac{r}{1+r} \right) \quad (23)$$

A Tabela 5.23 mostra os valores de  $S_{FLO}$  obtidos em função das recirculações utilizadas para três valores de taxas aplicadas na câmara de saturação.

TABELA 5.23 – Quantidade de ar fornecida para o flutuador e taxas utilizadas na câmara de saturação para pressão de saturação de 450 kPa e temperatura de 25 °C.

	4% recirculação	6% recirculação	8% recirculação
$S_{FLO}$ (g de ar/m <sup>3</sup> de água)	2,9 ± 0,1	4,3 ± 0,1	5,7 ± 0,1
TAS na câmara de saturação (m/h)	9,9 ± 1,0	11,5 ± 1,0	13,0 ± 1,0

É importante ressaltar que, durante os ensaios com a instalação piloto, todas as taxas utilizadas na câmara de saturação estiveram dentro da faixa de taxas testadas durante os ensaios específicos com a câmara (Gráfico 5.57), ou seja, foram utilizadas taxas de 9,9 a 13,0 m/h, e a faixa de taxas testadas foi de 9,2 a 22,0 m/h.

### 5.5.2. Resultados dos Ensaios da Fase 2 da ETAPA II

Nesta fase foi avaliada a flotação por ar dissolvido com aplicação de três valores de gradiente médio de velocidade na floculação ( $G_F$ ). Para tanto, fixaram-se: aplicação do oxidante no momento da mistura rápida (procedimento Tipo 1 adotado nos ensaios da ETAPA I, com o Flotatest), dosagem de oxidante (DCI=2,7 mg/L), dosagem de coagulante (DCF=30 mg/L) e pH de coagulação (pH=6,3). Variaram-se três vezes o valor do  $G_F$ : 30/30/25 s<sup>-1</sup>, 60/60/60 s<sup>-1</sup>, 80/80/80 s<sup>-1</sup> e para os dois primeiros valores, variou-se a quantidade de ar fornecida para a flotação  $S_{FLO}$ =5,7, 4,3 e 2,9 g de ar/m<sup>3</sup> de água e manteve-se TAS=13 m/h. Para os ensaios com  $G=80$  s<sup>-1</sup>, variou-se a TAS (13, 26 e 39 m/h).

As Tabelas 5.24 e 5.25 apresentam as principais características da água de estudo e da água coagulada. Para cada ensaio, foram coletadas amostras pontuais a cada 15 minutos. A junção dessas quatro amostras pontuais foram denominadas amostras compostas. Os Gráficos relacionados à cor e turbidez, apresentam os resultados das amostras pontuais e os Gráficos relacionados a ferro e manganês, apresentam os resultados das amostras compostas, (Gráficos 5.58 a 5.84).

A Tabela 5.26 apresenta um resumo dos resultados das amostras compostas da Fase 1 da ETAPA II de estudo.

A análise dos resultados dos referidos Gráficos e Tabelas, no que concerne aos ensaios 1, 2 e 3, quando utilizou-se  $G_F$  de 30/30/25 s<sup>-1</sup> e quantidade de ar de 2,9 g de ar/m<sup>3</sup> de água, demonstra resultados muito bons referentes à turbidez (residual de 0,55 uT e remoção de 96,8%) e cor aparente (residual de 6 uC e remoção de 96,9%). Com relação à concentração de ferro total, obteve-se residual de 0,70 (remoção de 78,6%) e de 0,16 mg/L de manganês total (remoção de 20%). Para 4,3 g de ar/m<sup>3</sup> de água, verifica-se aumento na eficiência de remoção de cor aparente obtendo-se valor residual de 3 uC (remoção de 98,5%), de turbidez residual, obtendo-se valor de 0,52 uT (remoção de 97,0%), de ferro total, obtendo-se concentração de 0,70 mg/L (78,5% de remoção) e de manganês total, obtendo-se concentração de 0,16 mg/L (20% de remoção). Para 5,7 g de ar/m<sup>3</sup> de água, verifica-se resultados ainda melhores, com turbidez residual de 0,48 uT (remoção de 97,2%), cor aparente residual menor que 2 uC (remoção de 98,9%), ferro total residual com concentração de 0,46 mg/L (remoção de 85,8%) e manganês total residual com concentração de 0,09 mg/L (remoção de 55,0%). Todos esses valores referem-se apenas ao pré-tratamento por flotação, ou seja, antes da etapa final de filtração da água de estudo.

Através da análise dos resultados referentes ao uso do gradiente médio de velocidade de floculação de 60/60/60 s<sup>-1</sup>, verifica-se, da mesma forma que na série anterior ( $G_F$ =30/30/25 s<sup>-1</sup>), que a maior quantidade de ar aplicada (5,7 g de ar/m<sup>3</sup> de água) forneceu os melhores resultados: turbidez residual de 0,38 uT (97,9% de remoção), cor aparente residual 2 uC (98,9% de remoção), ferro total residual com concentração de 0,2 mg/L (94,0% de remoção) e manganês total residual com concentração de 0,07 mg/L (65,0% de remoção). Porém, estes

foram muito semelhantes aos resultados obtidos quando foi utilizada a quantidade de ar de 4,3 g de ar/m<sup>3</sup> de água, que forneceu turbidez no efluente de 0,4 uT (97,8% de remoção), cor aparente residual menor que 2 uC (98,9% de remoção), ferro total residual com concentração de 0,23 mg/L (93,2% de remoção) e concentração de manganês total de 0,07 mg/L (65,0% de remoção). Como os resultados mantiveram-se quase inalterados, pode-se inferir que o aumento da quantidade de ar fornecida (de 4,3 para 5,7 g de ar/m<sup>3</sup> de água) não gerou melhoria significativa na eficiência do processo. Porém, a redução do valor da quantidade de ar para 2,9 g de ar/m<sup>3</sup> de água, ocasionou ligeira queda na eficiência da flotação, pois a turbidez residual foi de 0,49 uT (97,3% de remoção), a cor aparente residual foi de 6 uC (96,8% de remoção), o ferro total residual foi obtido com concentração de 0,27 mg/L (92,1% de remoção) e o manganês total residual com concentração de 0,08 mg/L (60,0% de remoção).

É importante notar que, com uso de gradiente médio de velocidade na floculação de 60/60/60 s<sup>-1</sup>, os resultados foram melhores que aqueles obtidos com gradiente de 30/30/25 s<sup>-1</sup>, pois a remoção de turbidez residual e cor aparente residual esteve acima de 97,0% e as concentrações de ferro e manganês, para todas as quantidades de ar estudadas, estiveram abaixo dos limites fixados pelos padrões de potabilidade, mesmo antes de filtração.

Nos ensaios com utilização do gradiente médio de velocidade de 80/80/80 s<sup>-1</sup>, fixou-se a quantidade de ar em 5,7 g de ar/m<sup>3</sup> de água e variou-se a taxa de aplicação superficial (13, 26 e 39 m/h). Quando foi utilizado 13 m/h, verificou-se turbidez residual de 0,95 uT (93,4% de remoção), cor aparente residual de 15 uC (90,7% de remoção), ferro total residual com concentração de 0,59 mg/L (82,6% de remoção) e manganês total residual com concentração de 0,08 mg/L (60,0% de remoção) e para 26 m/h, os resultados foram: 0,85 uT de turbidez residual, 11 uC de cor aparente residual, 0,57 mg/L de ferro total residual e 0,16 mg/L de manganês total residual.

Comparando-se os ensaios que utilizaram taxa de 13 m/h e 5,7 g de ar/m<sup>3</sup> de água, ensaios 3, 4 e 7 destacados na Tabela 5.26, observa-se ligeira queda na eficiência do sistema no ensaio 7, que se refere à aplicação de  $G_F = 80/80/80$  s<sup>-1</sup>.

É interessante observar que, justamente nesse ensaio, em que foi empregado  $G_F = 80/80/80$  s<sup>-1</sup>, a água bruta utilizada apresentou características diferentes (turbidez residual de 14,4 uT, cor verdadeira residual de 39 uC e cor aparente residual de 162 uC) daquelas apresentadas nos ensaios anteriores (turbidez residual em torno de 18 uT, cor verdadeira residual em torno de 46 uC e cor aparente residual em torno de 190 uC), resultando em coagulação distinta das obtidas nos ensaios anteriores, dificultando a comparação entre os resultados dos ensaios.

Essa diferença nas condições de coagulação pode ser observada através dos valores de potencial zeta e de distribuição do tamanho das partículas que, para  $G_F = 80/80/80$  s<sup>-1</sup>, apresentou potencial zeta de  $-3,7 \pm 0,9$  mV e diâmetro médio de partículas de 7,42  $\mu$ m. Sendo que, para os demais ensaios, o potencial zeta foi de  $-12,0 \pm 1,9$  mV e o diâmetro médio de partículas foi de 6,45  $\mu$ m (ver Tabelas 5.24 e 5.25).

Assim, essa ligeira queda na eficiência da flotação pode ser atribuída ou à não adequada coagulação ou à inadequada formação de flocos na floculação com  $G_F$  de 80/80/80  $s^{-1}$ , o que impossibilita concluir-se, com segurança, se o aumento do valor de  $G_F$  de 60/60/60  $s^{-1}$  para  $G_F$  de 80/80/80  $s^{-1}$  teria sido prejudicial ao processo de flotação. Verifica-se que essa queda não foi observada por ocasião dos ensaios em escala de laboratório, nos quais o aumento do gradiente contribuiu para maior eficiência do sistema (ver Gráficos 5.15 a 5.26 no item 5.3).

Observa-se ainda que a utilização do gradiente de 60  $s^{-1}$ , nas três câmaras de floculação, associado a taxa de 13 m/h e 5,7 g de ar/ $m^3$  de água na floculação, após clarificação por flotação, produziu diâmetro médio de partículas de 4,05  $\mu m$ . Por outro lado, no ensaio com  $G_F$  de 80/80/80  $s^{-1}$ , taxa de 13 m/h e  $S_{FLO}$  igual a 5,7 g de ar/ $m^3$  de água, o diâmetro médio de partículas foi 3,40  $\mu m$ , valor este ligeiramente menor que o anterior.

De qualquer forma, verifica-se que, nas três câmaras de floculação, a aplicação de valores de  $G_F$  de 60  $s^{-1}$  associado a tempos de floculação de 20 minutos, produziram resultados muito bons, que permitem concluir-se que, nessas condições, foram produzidos flocos com condições de hidrofobicidade e distribuição de tamanhos de partículas adequados ao subsequente processo de flotação por ar dissolvido.

A respeito da importância desses fatores, ou seja, da hidrofobicidade e distribuição de tamanhos dos flocos, vale lembrar que a eficiência da flotação depende da probabilidade de colisão flocos/bolhas, da probabilidade de aderência e da manutenção de ligação estável entre bolhas e partículas. Quanto à probabilidade de aderência, ou seja, ligação estável entre bolhas e partículas, HAHN (1984) afirma que a estabilidade depende das forças resultantes na interface gás/líquido/sólido, derivadas das forças físicas de atração e das forças físico-químicas de repulsão. Assim, esta etapa é predominantemente controlada por parâmetros físico-químicos, e o ângulo de contato reflete as propriedades do sistema ar/líquido/sólido, que são decisivas para agregação permanente entre os flocos e as bolhas de gás. Portanto, partículas eficientes para flotação, isto é, com grau de hidrofobicidade suficiente, possuem ângulos de contato grande o bastante para garantir boa aderência floco/bolha.

Ressalta-se, também, a importância da coagulação (desestabilização das partículas, isto é, redução da carga negativa) e da floculação adequadas para formação de flocos com elevado grau de hidrofobicidade com vistas a eficiente flotação.

Conclui-se, portanto, que dentre os valores de  $G_F$  investigados nos ensaios realizados com instalação piloto de alta taxa, aquele que forneceu os melhores resultados foi o de 60/60/60  $s^{-1}$ , gradiente este fixado para realização dos ensaios subsequentes (Fase 3, 4, 5, e 6).

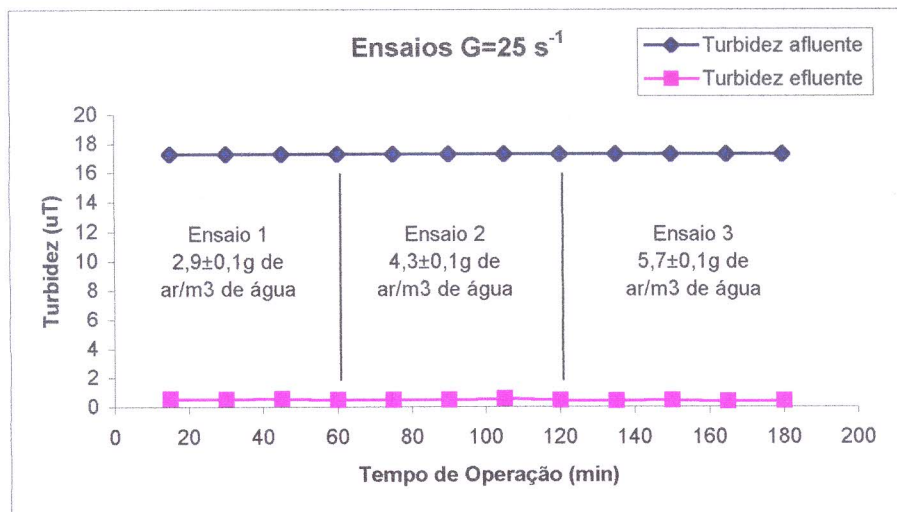


GRÁFICO 5.58 – Turbidez afluyente e efluente nos ensaios de flotação 1, 2 e 3 da Fase 2 da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=13 m/h,  $T_r=20$  minutos,  $G_f=30/30/25$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

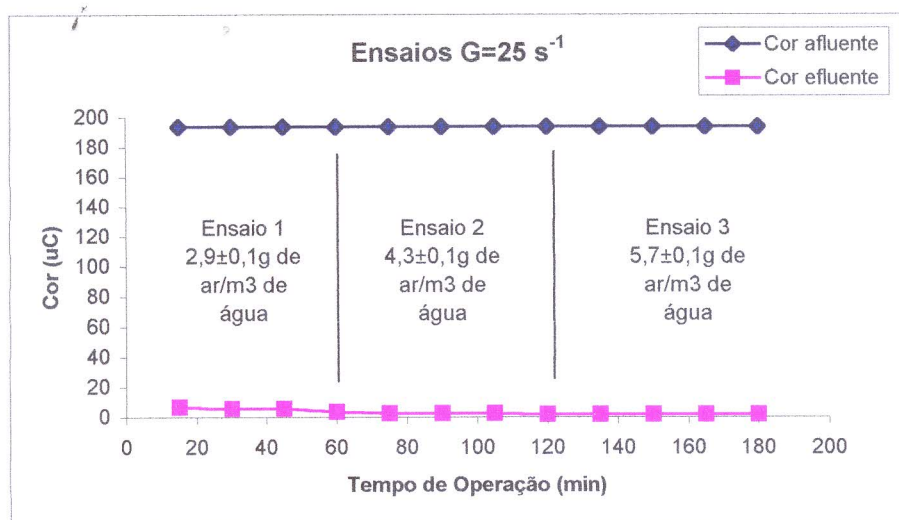


GRÁFICO 5.59– Cor afluyente e efluente nos ensaios de flotação 1, 2 e 3 da Fase 2 da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=13 m/h,  $T_r=20$  minutos,  $G_f=30/30/25$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=45 kPa

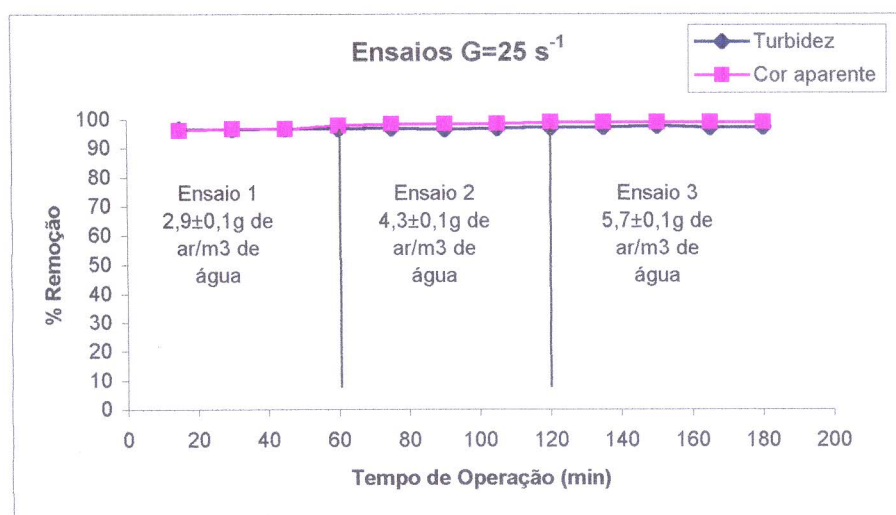


GRÁFICO 5.60 – Remoção (%) de turbidez e cor efluente nos ensaios de flotação 1, 2 e 3 da Fase 2 da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=13 m/h,  $T_r=20$  minutos,  $G_f=30/30/25$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450±10 kPa

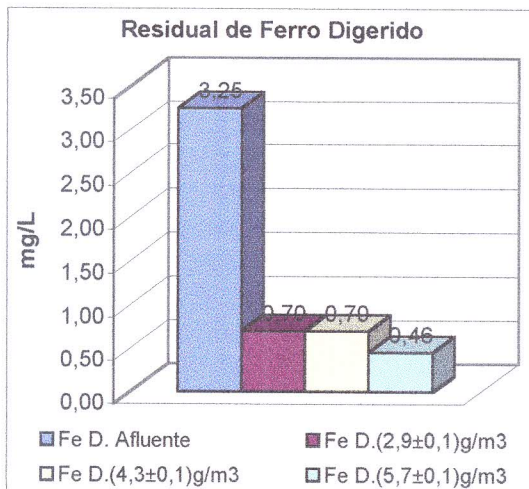


GRÁFICO 5.61 – Ferro digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 1, 2 e 3. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=13 m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_r=30/30/25$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

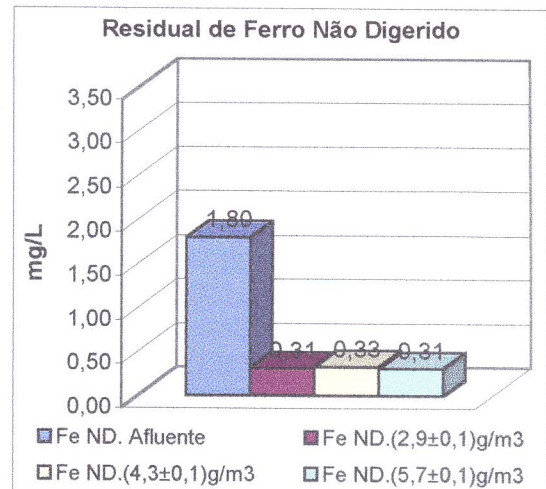


GRÁFICO 5.62 – Ferro não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 1, 2 e 3. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=13 m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_r=30/30/25$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450±10 kPa

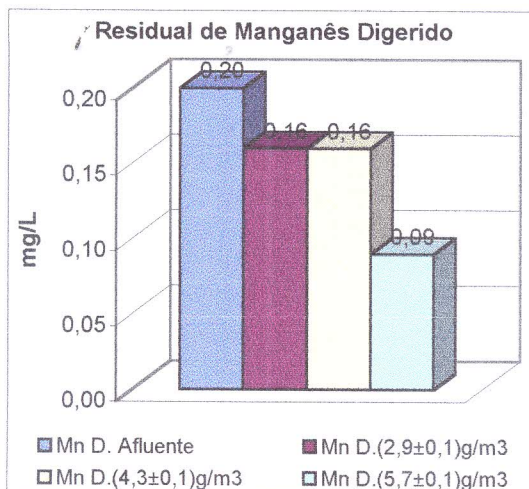


GRÁFICO 5.63 – Manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 1, 2 e 3. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=13 m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_r=30/30/25$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

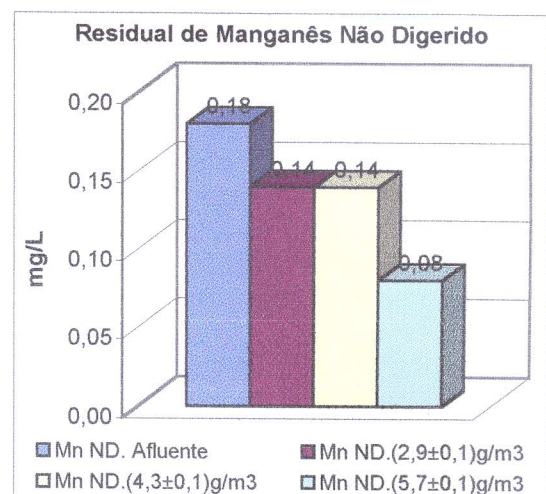


GRÁFICO 5.64 – Manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 1, 2 e 3. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=13 m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_r=30/30/25$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

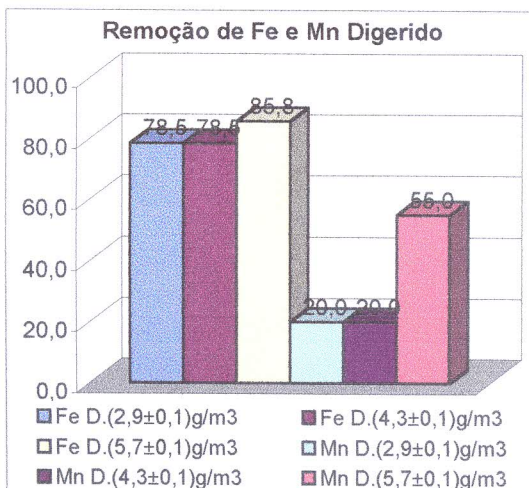


GRÁFICO 5.65 – Remoção (%) de ferro e manganês digeridos nos ensaios de flotação 1, 2 e 3. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=13 m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_r=30/30/25$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

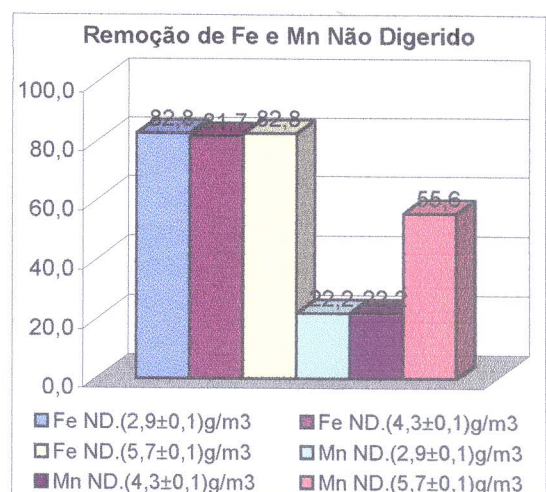


GRÁFICO 5.66 – Remoção (%) de ferro e manganês não digeridos nos ensaios de flotação 1, 2 e 3. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=13 m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_r=30/30/25$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

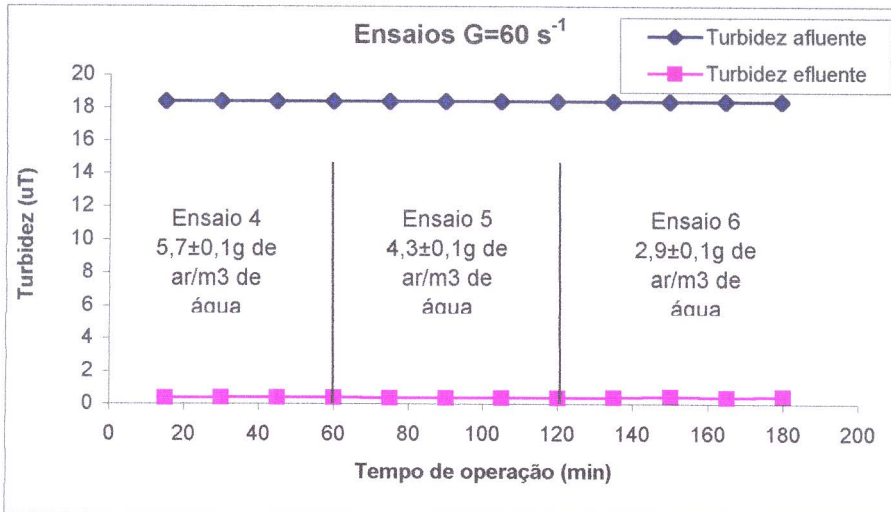


GRÁFICO 5.67 – Turbidez afluente e efluente nos ensaios de flotação 4, 5 e 6 da Fase 2 da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=13 m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

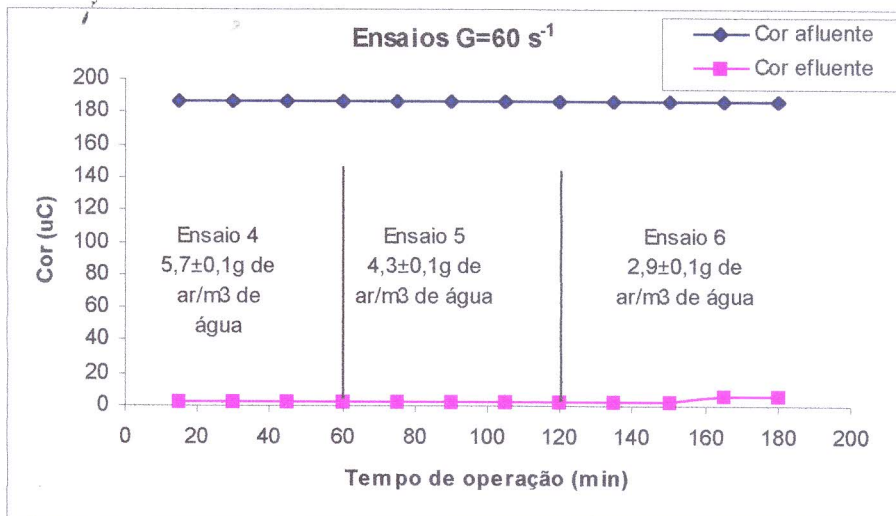


GRÁFICO 5.68 – Cor afluente e efluente nos ensaios de flotação 4, 5 e 6 da Fase 2 da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=13 m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

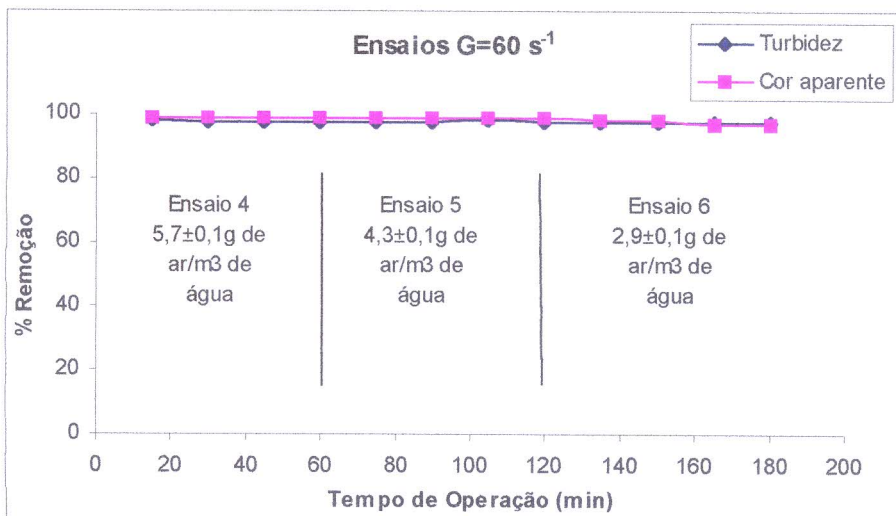


GRÁFICO 5.69 – Remoção (%) de cor e turbidez efluente nos ensaios de flotação 4, 5 e 6 da Fase 2 da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=13 m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa



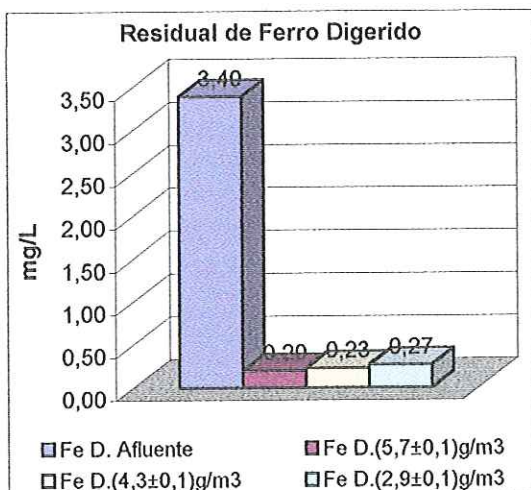


GRÁFICO 5.70 – Ferro digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 4, 5 e 6. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=13 m/h, Tf=20minutos, Gf=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

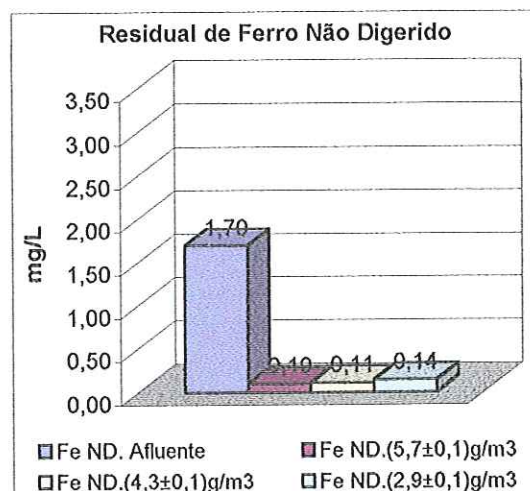


GRÁFICO 5.71 – Ferro não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 4, 5 e 6. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=13 m/h, Tf=20minutos, Gf=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

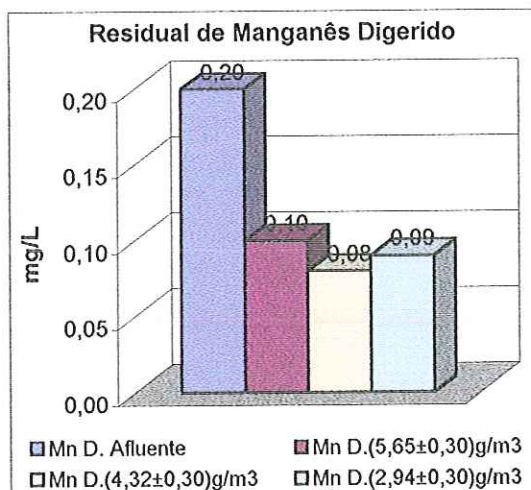


GRÁFICO 5.72 – Manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 4, 5 e 6. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=13 m/h, Tf=20minutos, Gf=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

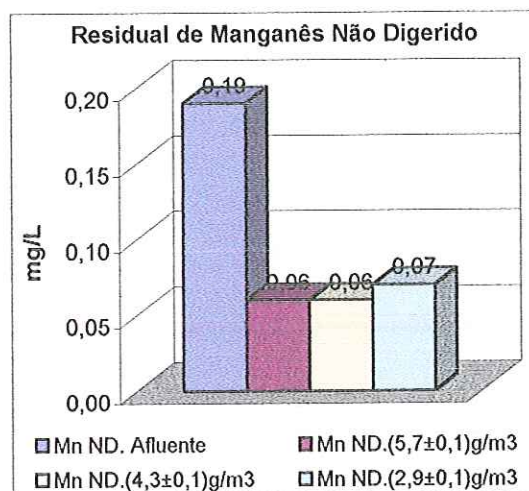


GRÁFICO 5.73 – Manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 4, 5 e 6. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=13 m/h, Tf=20minutos, Gf=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

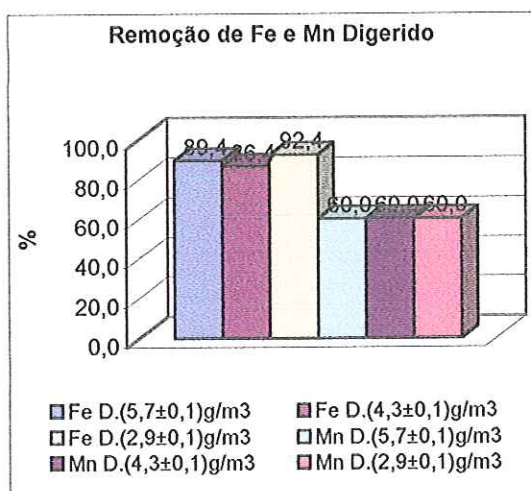


GRÁFICO 5.74 – Remoção (%) de ferro e manganês digeridos nos ensaios de flotação 4, 5 e 6. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=13 m/h, Tf=20minutos, Gf=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

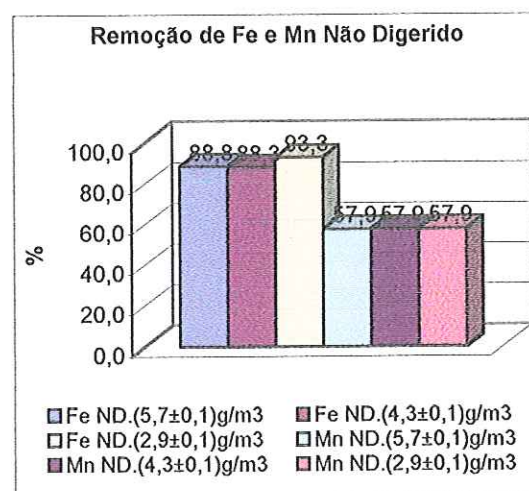


GRÁFICO 5.75 – Remoção (%) de ferro e manganês não digeridos nos ensaios de flotação 4, 5 e 6. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=13 m/h, Tf=20minutos, Gf=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

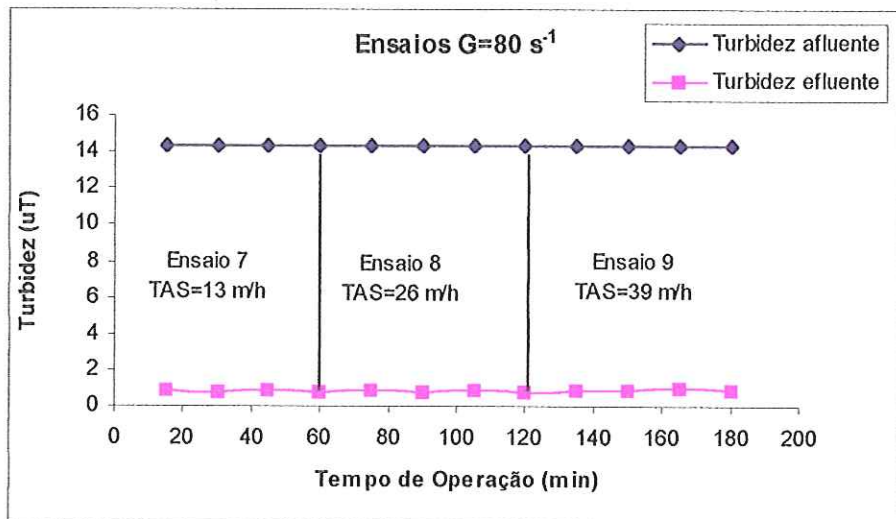


GRÁFICO 5.76 – Turbidez afluente e efluente nos ensaios de flotação 7, 8 e 9 da Fase 2 da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=80/80/80 \text{ s}^{-1}$ , pressão de saturação=450 kPa,  $S_{FLO}=5,7 \text{ g de ar/m}^3$  de água

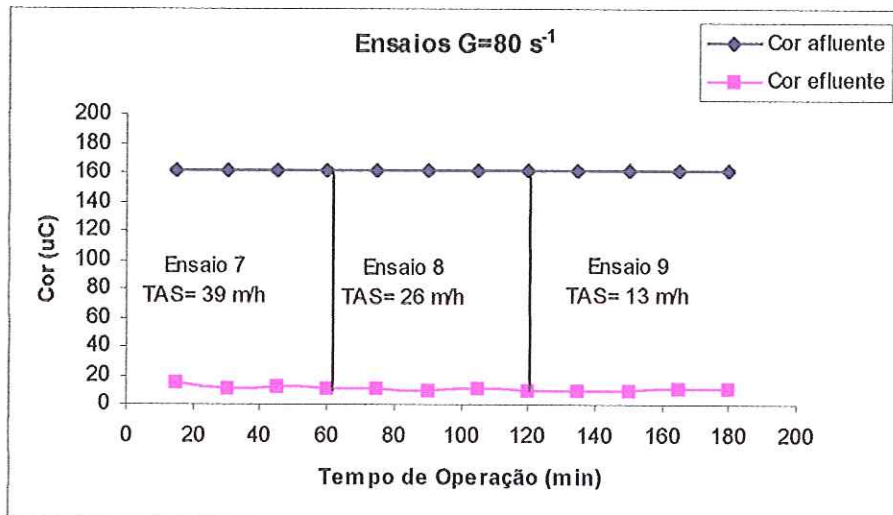


GRÁFICO 5.77 – Cor afluente e efluente nos ensaios de flotação 7, 8 e 9 da Fase 2 da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=80/80/80 \text{ s}^{-1}$ , pressão de saturação=450 kPa,  $S_{FLO}=5,7 \text{ g de ar/m}^3$  de água

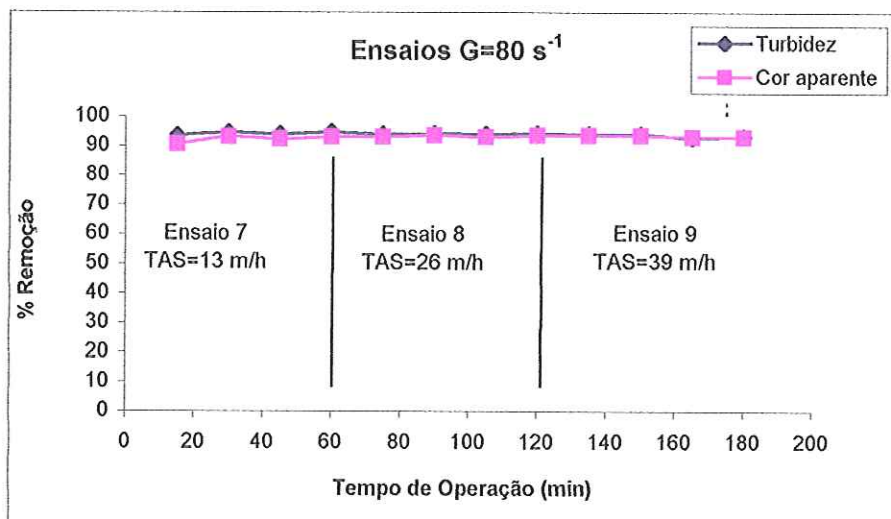


GRÁFICO 5.78 – Remoção (%) de turbidez e cor efluente nos ensaios de flotação 7, 8 e 9 da Fase 2 da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=80/80/80 \text{ s}^{-1}$ , pressão de saturação=450 kPa,  $S_{FLO}=5,7 \text{ g de ar/m}^3$  de água

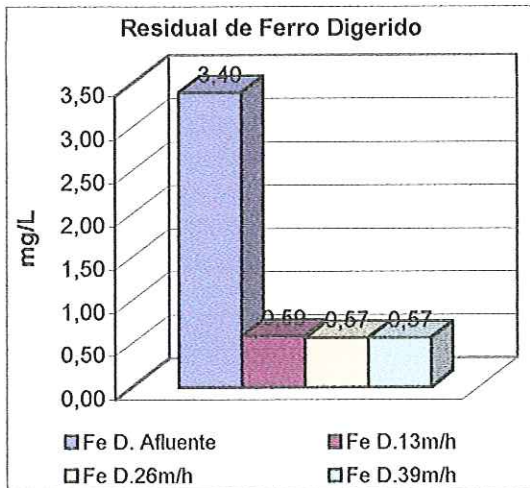


GRÁFICO 5.79 – Fe digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 7, 8 e 9. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=80/80/80$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa,  $S_{R,0}=5,7$  g de ar/m<sup>3</sup> de água

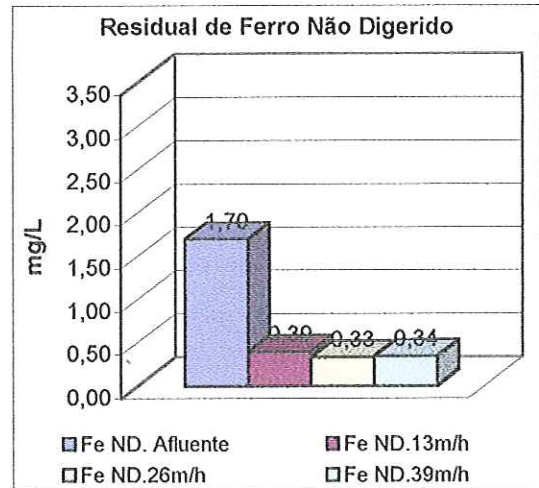


GRÁFICO 5.80 – Fe não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 7, 8 e 9. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=80/80/80$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa,  $S_{R,0}=5,7$  g de ar/m<sup>3</sup> de água

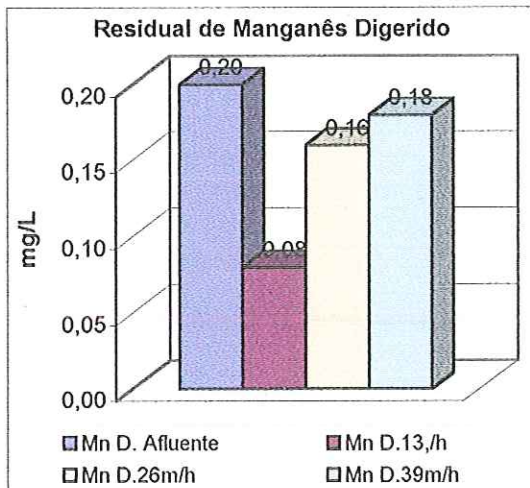


GRÁFICO 5.81 – Mn digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 7, 8 e 9. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=80/80/80$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa,  $S_{R,0}=5,7$  g de ar/m<sup>3</sup> de água

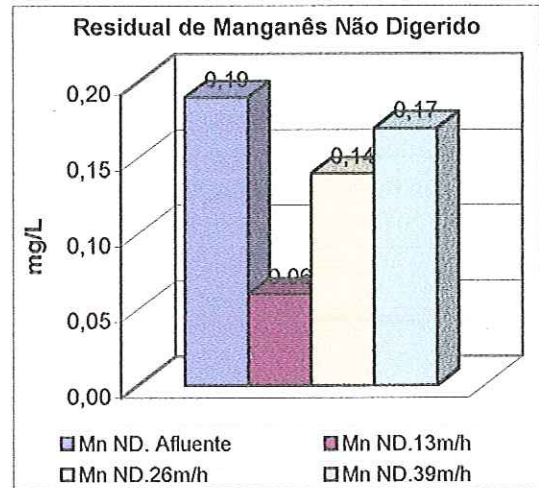


GRÁFICO 5.82 – Mn não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 7, 8 e 9. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=80/80/80$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa,  $S_{R,0}=5,7$  g de ar/m<sup>3</sup> de água

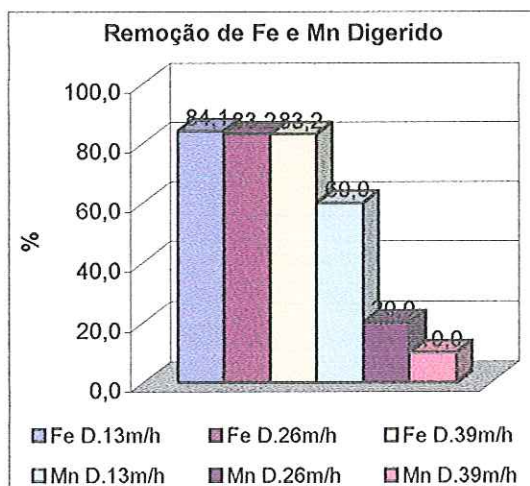


GRÁFICO 5.83 – Remoção (%) de ferro e manganês digeridos nos ensaios de flotação 7, 8 e 9. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=80/80/80$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa,  $S_{R,0}=5,7$  g de ar/m<sup>3</sup> de água

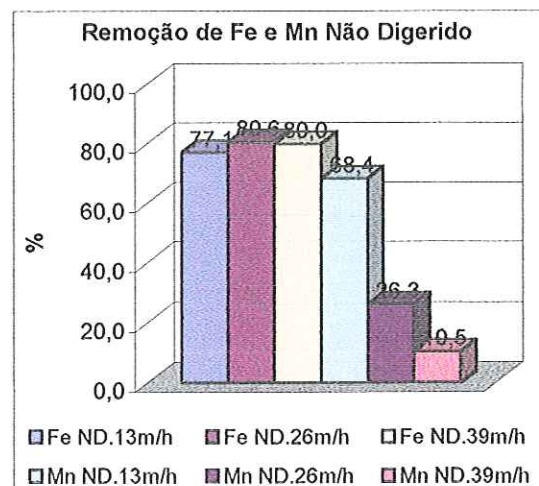


GRÁFICO 5.84 – Remoção (%) de ferro e manganês não digeridos nos ensaios de flotação 7, 8 e 9. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=80/80/80$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa,  $S_{R,0}=5,7$  g de ar/m<sup>3</sup> de água

TABELA 5.24 – Características principais da água bruta de estudo para os ensaios de 1 a 9 da Fase 2 da ETAPA II.  
Condições dos ensaios: Temperatura = 25 °C

ENSAIO	pH	Cor Aparente (uC)	Cor Verdadeira (uC)	Turbidez (uT)	Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Condutiv Vidade (µS/cm)	ST (mg/L)	SST (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Distr. de tamanho partículas (2 a 24 µm)	
												Média*	Desvio
												1	7,5
2	7,5	194	47	17,3	22,0	14,8	51,6	10,9	2,8	3,3	0,2	-	-
3	7,5	194	47	17,3	22,0	14,8	51,6	10,9	2,8	3,3	0,2	-	-
4	7,1	186	45	18,4	21,0	17,3	50,3	11,3	2,4	3,4	0,2	6,04	3,62
5	7,1	186	45	18,4	21,0	17,3	50,3	11,3	2,4	3,4	0,2	-	-
6	7,1	186	45	18,4	21,0	17,3	50,3	11,3	2,4	3,4	0,2	-	-
7	7,1	162	39	14,4	22,0	16,3	60,3	10,9	2,3	3,4	0,2	6,09	3,72
8	7,1	162	39	14,4	22,0	16,3	60,3	10,9	2,3	3,4	0,2	-	-
9	7,1	162	39	14,4	22,0	16,3	60,3	10,9	2,3	3,4	0,2	-	-

\*Média ponderada

TABELA 5.25 – Características principais da água coagulada para os ensaios de 1 a 9 da Fase 2 da ETAPA II.

ENSAIO	pH	Cor Aparente (uC)	Potencial Zeta (mV)	Turbidez (uT)	ST (mg/L)	SST (mg/L)	Distribuição de tamanho partículas (de 2 a 24 µm)	
							Média*	Desvio
							1	6,4
2	6,4	271	-12,0±1,9	20,2	17,0	4,9	-	-
3	6,4	271	-12,0±1,9	20,2	17,0	4,9	-	-
4	6,4	295	-12,0±1,9	20,0	17,3	4,6	6,45	3,90
5	6,4	295	-12,0±1,9	20,0	17,3	4,6	-	-
6	6,4	295	-12,0±1,9	20,0	17,3	4,6	-	-
7	6,3	223	-3,7±0,9	16,5	17,3	4,6	7,42	4,98
8	6,3	223	-3,7±0,9	16,5	17,3	4,6	-	-
9	6,3	223	-3,7±0,9	16,5	17,3	4,6	-	-

TABELA 5.26 – Tabela resumo dos resultados das amostras compostas obtidas nos ensaios de flotação de 1 a 9 (Fase 2 da ETAPA II)  
 Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF = 30 mg/L, DCI = 2,7 mg/L, pH = 6,3, Pressão de saturação = 450 kPa, Temperatura = 25 °C

T <sub>F</sub> (min)	G <sub>F1</sub> /G <sub>F2</sub> /G <sub>F3</sub> (s <sup>-1</sup> )	Ensaio	TAS (m/h)	S <sub>FLO</sub> (g de ar/m <sup>3</sup> água)	Turbidez (uT)		Cor (uC)		SST (mg/L)		Fe total (digerido mg/L)		Mn total (digerido mg/L)		Distribuição de Tamanho partículas ( 2 a 24 µm)	
					AFL	EFL	AFL	EFL	AFL	EFL	AFL	EFL	AFL	EFL	Média*	Desvio
20	30/30/25	1	13	2,9±0,1	17,3	0,55	194	6	2,80	-	3,25	0,70	0,20	0,16	-	-
		2	13	4,3±0,1	17,3	0,52	194	3	2,80	-	3,25	0,70	0,20	0,16	-	-
		3	13	5,7±0,1	17,3	0,48	194	< 2	2,80	-	3,25	0,46	0,20	0,09	-	-
	60/60/60	4	13	5,7±0,1	18,4	0,38	186	< 2	2,44	< 0,01	3,40	0,20	0,20	0,07	4,05	3,37
		5	13	4,3±0,1	18,4	0,40	186	< 2	2,44	< 0,01	3,40	0,23	0,20	0,07	3,95	3,42
		6	13	2,9±0,1	18,4	0,49	186	6	2,44	< 0,01	3,40	0,27	0,20	0,08	3,80	3,03
	80/80/80	7	13	5,7±0,1	14,4	0,95	162	15	2,30	-	3,40	0,59	0,20	0,08	3,40	2,43
		8	26	5,7±0,1	14,4	0,85	162	11	2,30	-	3,40	0,57	0,20	0,16	-	-
		9	39	5,7±0,1	14,4	1,10	162	11	2,30	-	3,40	0,57	0,20	0,18	4,42	3,01

\*Média ponderada

### 5.5.3. Resultados dos ensaios da Fase 3 da ETAPA II

Para realização dos ensaios da Fase 3 foram mantidas fixas as seguintes condições: ponto de aplicação do oxidante no momento da mistura rápida (procedimento Tipo 1), dosagem de oxidante (DCI=2,7 mg/L), dosagem de coagulante (DCF=30 mg/L) e pH de coagulação (pH=6,3). Variaram-se os valores de taxa de aplicação superficial (TAS), tempo de floculação ( $T_F$ ) e quantidade de ar fornecida para a flotação ( $S_{FLO}$ ). Nesta fase, foram estudados três valores de tempo de floculação (10, 15 e 20 minutos) e, para cada um deles, variaram-se os valores de taxa de aplicação superficial na unidade FAD de alta taxa (13 m/h – Fase 3a, 26 m/h – Fase 3b, 39 m/h – Fase 3c e 51 m/h – Fase 3d) e a quantidade de ar fornecida (5,7, 4,3 e 2,9 g de ar/m<sup>3</sup> de água).

#### 5.5.3.1. Resultados dos ensaios da Fase 3a

A Fase 3a apresenta os resultados obtidos com emprego da taxa de 13 m/h, na unidade piloto de FAD de alta taxa.

As Tabelas 5.27 e 5.28 apresentam as principais características da água de estudo e da água coagulada. Para cada ensaio, foram coletadas quatro amostras, uma a cada 15 minutos, amostras pontuais e a junção dessas amostras pontuais formaram as amostras compostas. Os gráficos relacionados à cor e turbidez apresentam os resultados das amostras pontuais e os gráficos relacionados a ferro e manganês, apresentam os resultados das amostras compostas. Finalmente, a Tabela 5.29 apresenta um resumo dos resultados das amostras compostas, (Gráficos 5.85 a 5.111).

A análise da taxa de aplicação superficial de 13 m/h com tempo de floculação de 20 minutos mostra que, fornecido 5,7 g de ar/m<sup>3</sup> de água os resultados foram: turbidez residual de 0,38 uT (remoção de 97,9%), cor residual menor que 2 (remoção maior que 98,9%), ferro total residual na concentração de 0,2 mg/L (remoção de 94,0%), manganês total residual na concentração de 0,07 mg/L (remoção de 65,0%) e remoção de sólidos maior que 99,6%. Com fornecimento 4,3 g de ar/m<sup>3</sup> de água, os resultados mantiveram-se quase inalterados: remoção de turbidez foi de 97,8%, a remoção de cor foi maior que 98,9%, a remoção de ferro foi 93,2% e a remoção de manganês ficou em 65,0%. Verifica-se que o aumento da quantidade de ar fornecida não provocou acréscimo significativo da eficiência do processo. Com emprego de 2,9 g de ar/m<sup>3</sup> de água, houve ligeira queda, mas as eficiências de remoção continuaram boas, pois foram obtidos 97,3% de remoção de turbidez, 96,8% de remoção de cor, 92,1% de remoção de ferro e 60,0% de remoção de manganês.

Portanto, para a TAS de 13 m/h e 20 minutos de floculação, as três quantidades de ar utilizadas forneceram resultados muito bons, com valores de remoção de turbidez, cor e ferro acima de 92,0%. Para concentrações residuais de manganês, mesmo com remoção de 60,0 a

65,0%, as concentrações se encontram dentro dos limites fixados pelos padrões de potabilidade, mesmo antes da filtração.

Ainda com taxa de aplicação superficial de 13 m/h e com tempo de floculação de 15 minutos, observam-se resultados muito semelhantes aos obtidos com a utilização de 20 minutos de floculação, o que indica que a redução do tempo de floculação não prejudicou a eficiência do processo. Quando se utilizou 5,7 g de ar/m<sup>3</sup> de água, os resultados obtidos foram: 97,7% de remoção de turbidez, 98,5% de remoção de cor, 92,4% de remoção de ferro e 60,0% de remoção de manganês. Quando 4,3 g de ar/m<sup>3</sup> de água foram fornecidos, os resultados mantiveram-se quase que inalterados indicando que o aumento da quantidade de ar fornecida não provocou acréscimo significativo na eficiência do sistema. Quando se utilizou 2,9 g de ar/m<sup>3</sup> de água, verificou-se ligeira queda na eficiência do sistema, mas, mesmo assim os percentuais de remoção continuam elevados, 96,8% de remoção de turbidez, 97,4% de remoção de cor, 92,4% de remoção de ferro e 60,0% de remoção de manganês.

Observa-se que, para as três quantidades de ar fornecidas, os resultados foram excelentes mesmo reduzindo-se o tempo de floculação para 15 minutos. Observa-se remoção acima de 92,0% para turbidez, cor, sólidos suspensos totais e ferro. As concentrações de ferro e de manganês, para todas as quantidades de ar fornecidas, estiveram abaixo dos limites fixados pelos padrões de potabilidade. Esses resultados e aqueles referentes a T<sub>F</sub> igual a 20 minutos demonstram, claramente, que desde que fornecidas condições adequadas de coagulação e floculação, a unidade de FAD de alta taxa com escoamento horizontal foi capaz de operar com quantidades de ar (entre 4,3 e 5,7 g de ar/m<sup>3</sup> de água) menores que aquelas requeridas em unidades de FAD convencionais (usualmente 6,0 a 10,0 g de ar/m<sup>3</sup> de água).

Continuando com taxa de 13 m/h e tempo de floculação de 10 minutos, observou-se pequena queda, principalmente na remoção de cor aparente, ferro e manganês. Os percentuais de remoção foram: 72,1% de remoção de ferro e 95,4% de remoção de cor para 5,7 g de ar/m<sup>3</sup> de água, 80,3% de remoção de ferro e 96,4% de remoção de cor para 4,3 g de ar/m<sup>3</sup> de água e 76,7% de remoção de ferro e 97,4% de remoção de cor para 2,9 g de ar/m<sup>3</sup> de água. Nota-se que maior quantidade de ar não forneceu aumento significativo na eficiência do processo, demonstrando que a ligeira queda na eficiência esteve relacionada à diminuição do tempo de floculação de 15 para 10 minutos.

Nota-se que, nas melhores condições operacionais para tempo de floculação de 20 minutos (ensaio 10 da Tabela 5.29), após clarificação por flotação, o diâmetro médio das partículas residuais foi 4,05 µm. Para T<sub>F</sub> de 15 minutos nas melhores condições operacionais (ensaio 13 da Tabela 5.29), o diâmetro médio das partículas foi 4,47 µm e para T<sub>F</sub> de 10 minutos, o diâmetro médio das partículas esteve entre 4,59 e 4,65 µm. Verificou-se tendência de predominância de partículas menores no efluente à medida que se aumentou o tempo de floculação de 10 para 15 e 20 minutos com aumento associado da eficiência geral do processo de flotação.

---

Portanto, conclui-se que, para todas as quantidades de ar estudadas, e taxa de 13 m/h, os valores de tempo de floculação de 15 e 20 minutos apresentaram resultados muito bons com remoção de turbidez maior que 96%, de cor menor que 97%, de concentração de ferro total maior que 92% e de concentração de manganês total igual a 60%. As concentrações de ferro e manganês estiveram dentro dos limites fixados pelos padrões de potabilidade, mesmo antes da filtração.

O tempo de floculação de 20 minutos aliado a 5,7 g de ar/m<sup>3</sup> de água apresentou resultados ligeiramente superiores, com eficiência de remoção de turbidez maior que 97%, de cor maior que 98%, de concentração de ferro maior que 94% e de concentração de manganês igual a 65%.

Para todas as quantidades de ar fornecidas, o tempo de floculação de 10 minutos apresentou queda na eficiência do sistema, principalmente na remoção das concentrações de ferro e manganês.



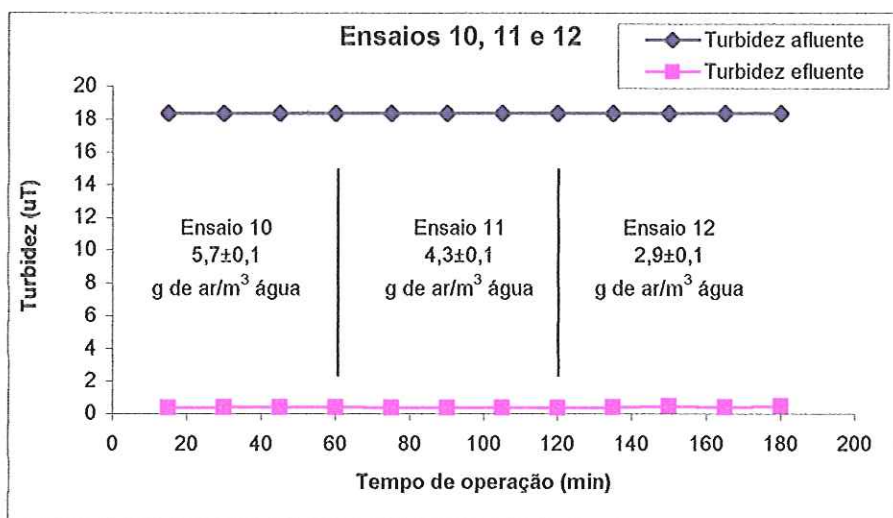


GRÁFICO 5.85 – Turbidez afluyente e efluente nos ensaios de flotação 10, 11 e 12 da Fase 3a da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=13 m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

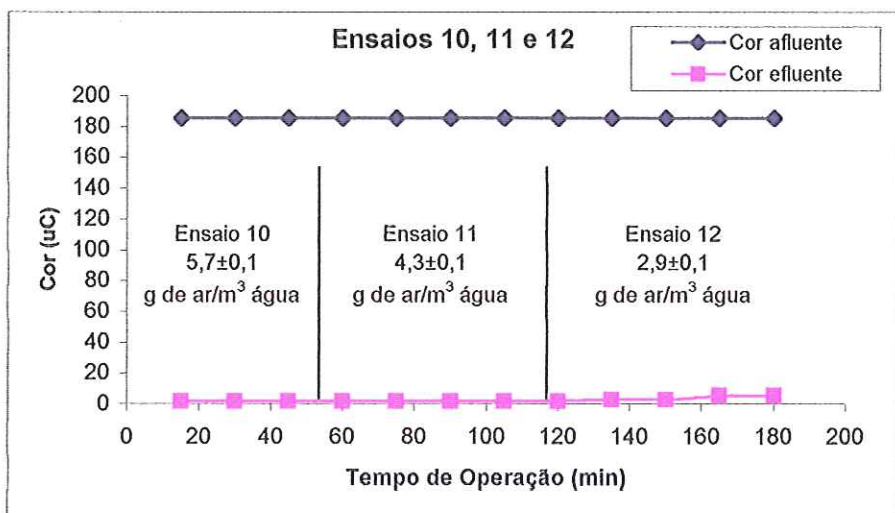


GRÁFICO 5.86 – Cor afluyente e efluente nos ensaios de flotação 10, 11 e 12 da Fase 3a da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=13 m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

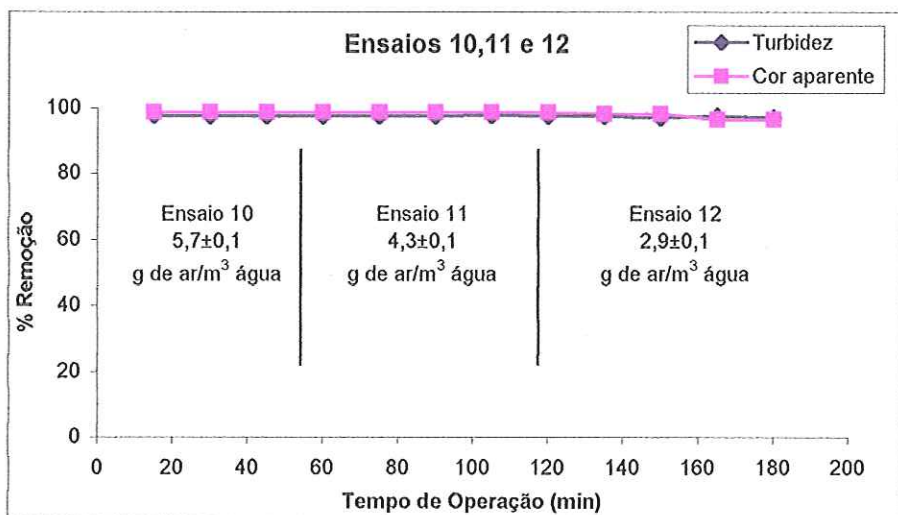


GRÁFICO 5.87 – Remoção (%) de turbidez e cor nos ensaios de flotação 10, 11 e 12 da Fase 3a da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=13 m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão saturação=450 kPa

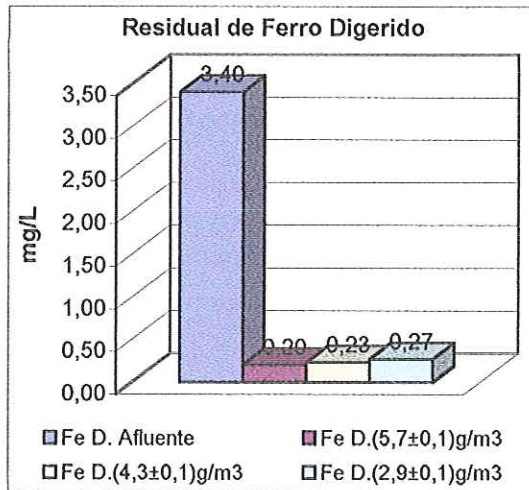


GRÁFICO 5.88 – Ferro digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 10, 11 e 12. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=13 m/h, T<sub>r</sub>=20 minutos, G<sub>r</sub>=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

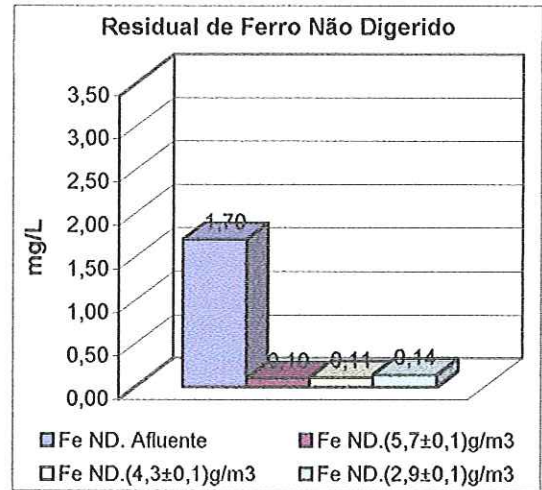


GRÁFICO 5.89 – Ferro não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 10, 11 e 12. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=13 m/h, T<sub>r</sub>=20 minutos, G<sub>r</sub>=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

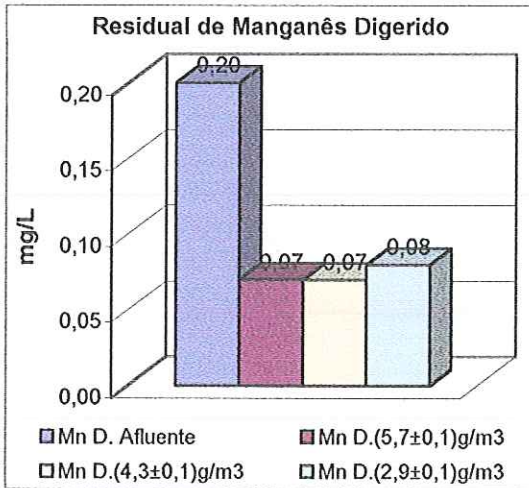


GRÁFICO 5.90 – Manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 10, 11 e 12. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=13 m/h, T<sub>r</sub>=20 minutos, G<sub>r</sub>=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

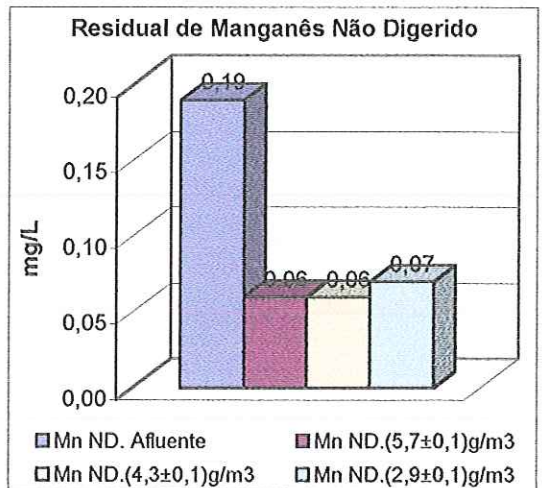


GRÁFICO 5.91 – Manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 10, 11 e 12. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=13 m/h, T<sub>r</sub>=20 minutos, G<sub>r</sub>=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

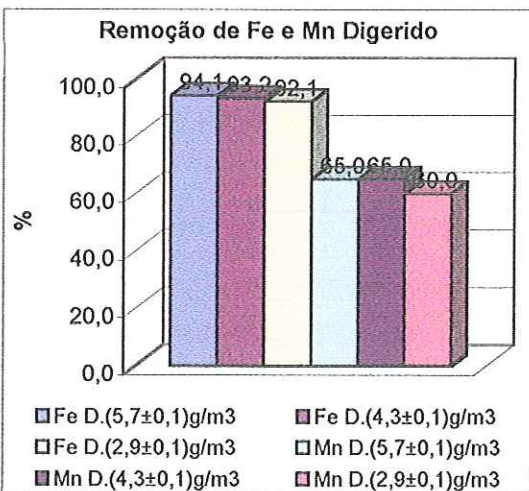


GRÁFICO 5.92 – Remoção (%) de ferro e manganês digeridos nos ensaios de flotação 10, 11 e 12. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=13 m/h, T<sub>r</sub>=20 minutos, G<sub>r</sub>=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

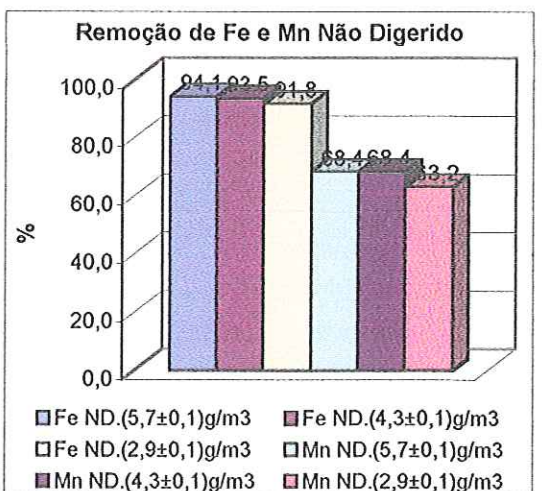


GRÁFICO 5.93 – Remoção (%) de ferro e manganês não digeridos nos ensaios de flotação 10, 11 e 12. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=13 m/h, T<sub>r</sub>=20 minutos, G<sub>r</sub>=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

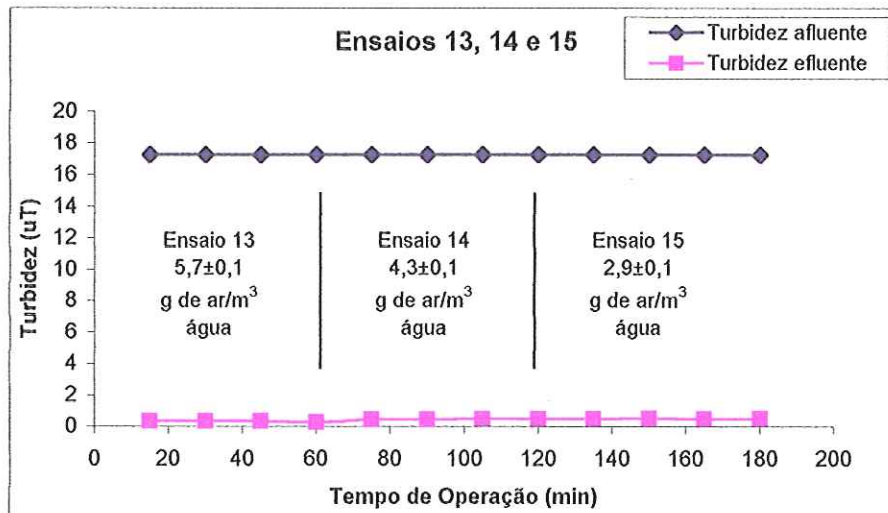


GRÁFICO 5.94 – Turbidez afluente e efluente nos ensaios de flotação 13, 14 e 15 da Fase 3a da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $TAS=13$  m/h,  $T_f=15$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

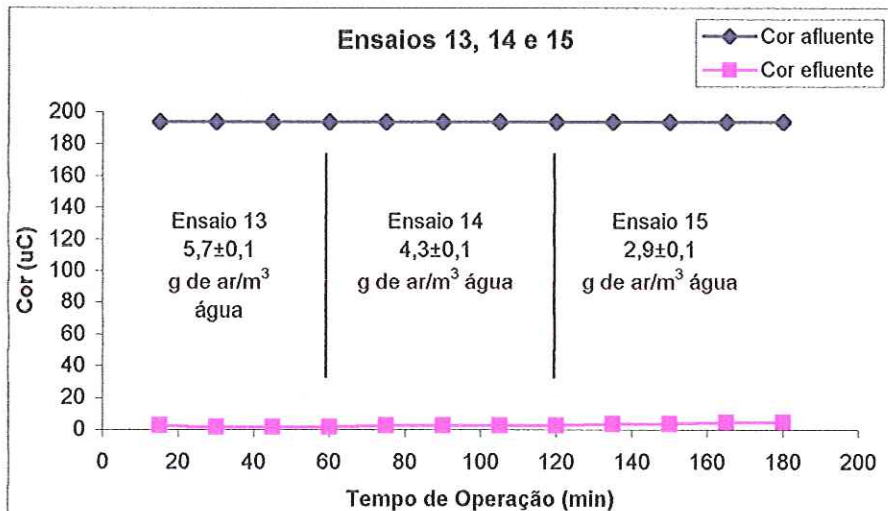


GRÁFICO 5.95 – Cor afluente e efluente nos ensaios de flotação 13, 14 e 15 da Fase 3a da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $TAS=13$  m/h,  $T_f=15$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

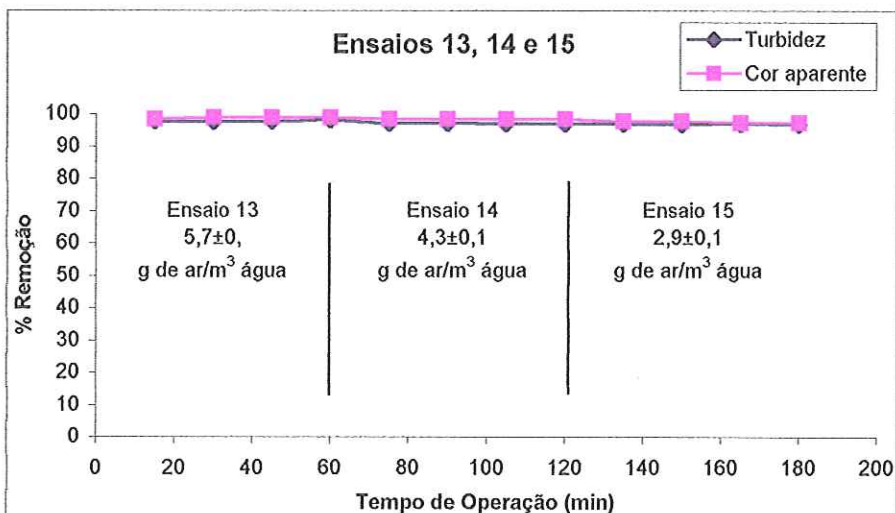


GRÁFICO 5.96 – Remoção (%) de turbidez e cor nos ensaios de flotação 13, 14 e 15 da Fase 3a da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $TAS=13$  m/h,  $T_f=15$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

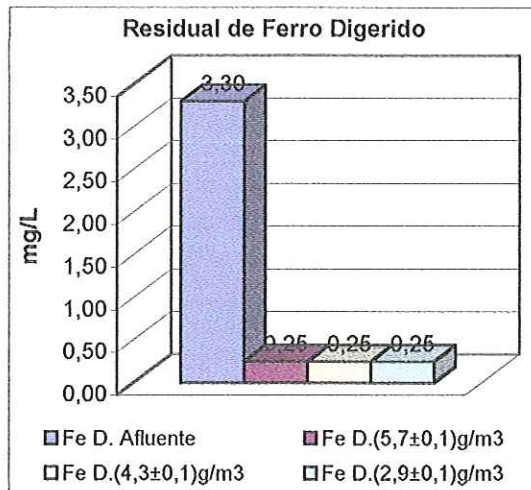


GRÁFICO 5.97 – Ferro digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 13, 14 e 15. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCl=2,7 mg/L, IAS=13 m/h, T<sub>r</sub>=15 minutos, G<sub>f</sub>=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

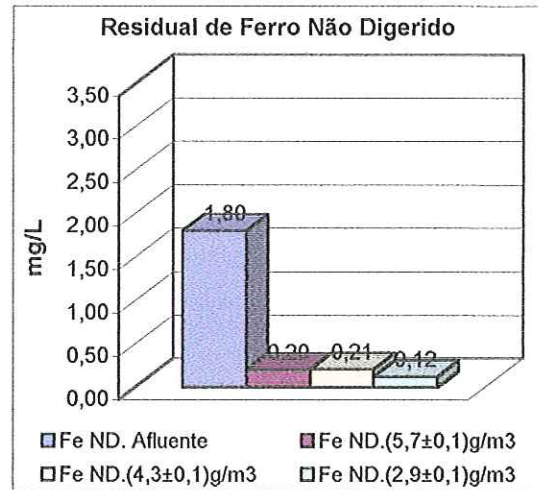


GRÁFICO 5.98 – Ferro não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 13, 14 e 15. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCl=2,7 mg/L, IAS=13 m/h, T<sub>r</sub>=15 minutos, G<sub>f</sub>=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

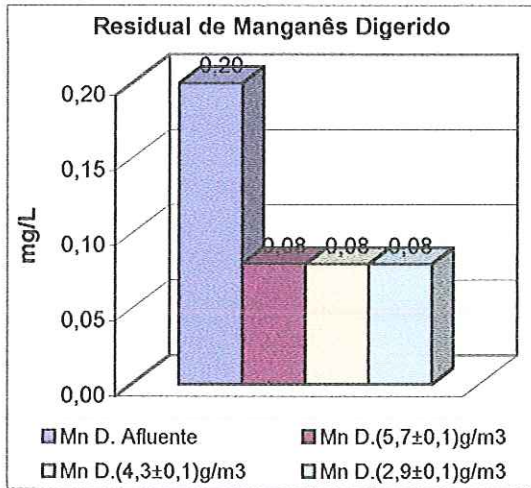


GRÁFICO 5.99 – Manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 13, 14 e 15. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCl=2,7 mg/L, IAS=13 m/h, T<sub>r</sub>=15 minutos, G<sub>f</sub>=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

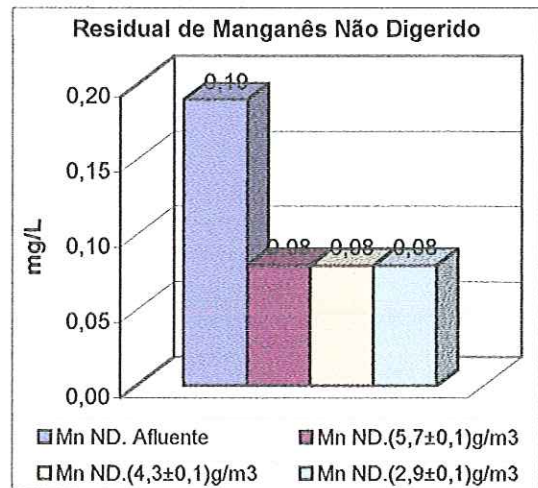


GRÁFICO 5.100 – Manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 13, 14 e 15. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCl=2,7 mg/L, IAS=13 m/h, T<sub>r</sub>=15 minutos, G<sub>f</sub>=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

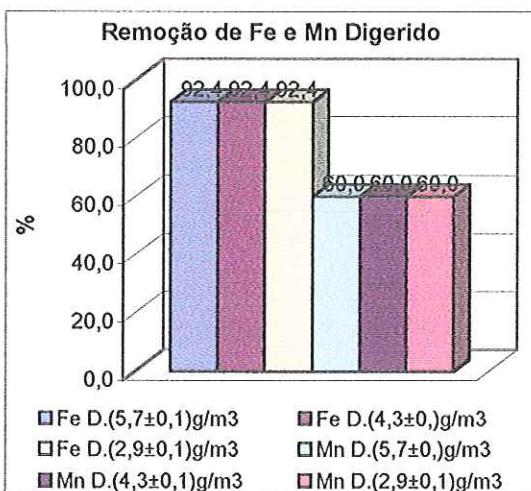


GRÁFICO 5.101 – Remoção (%) de ferro e manganês digeridos nos ensaios de flotação 13, 14 e 15. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCl=2,7 mg/L, IAS=13 m/h, T<sub>r</sub>=15 minutos, G<sub>f</sub>=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

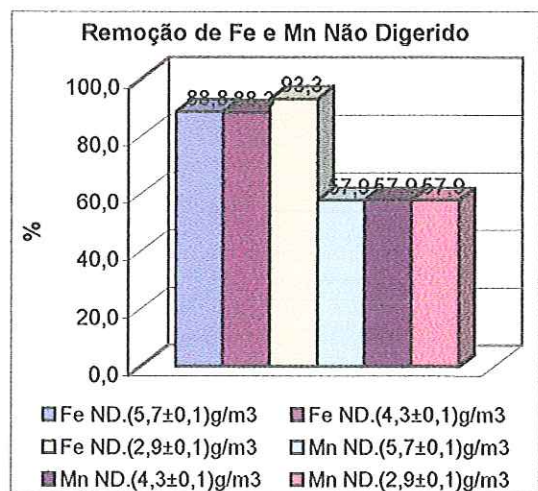


GRÁFICO 5.102 – Remoção (%) de ferro e manganês não digeridos nos ensaios de flotação 13, 14 e 15. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCl=2,7 mg/L, IAS=13 m/h, T<sub>r</sub>=15 minutos, G<sub>f</sub>=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

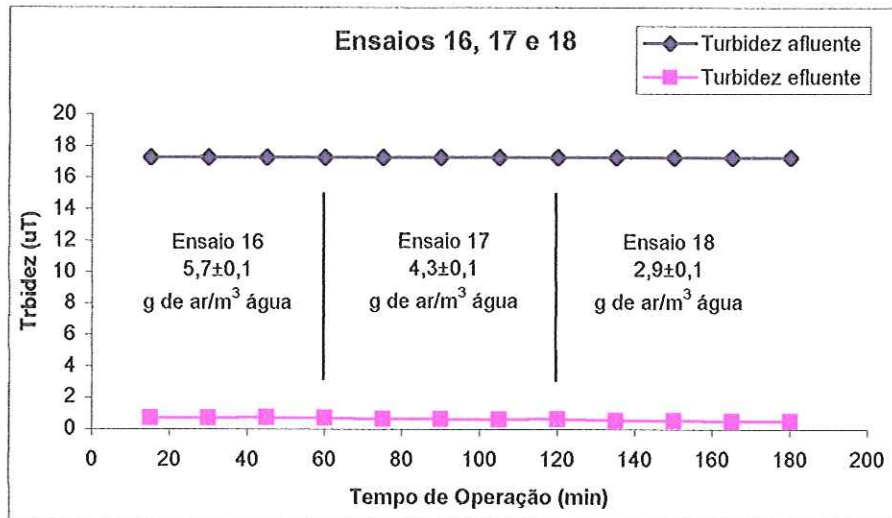


GRÁFICO 5.103 – Turbidez afluyente e efluente nos ensaios de flotação 16, 17 e 18 da Fase 3a da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=13 m/h,  $T_f=10$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

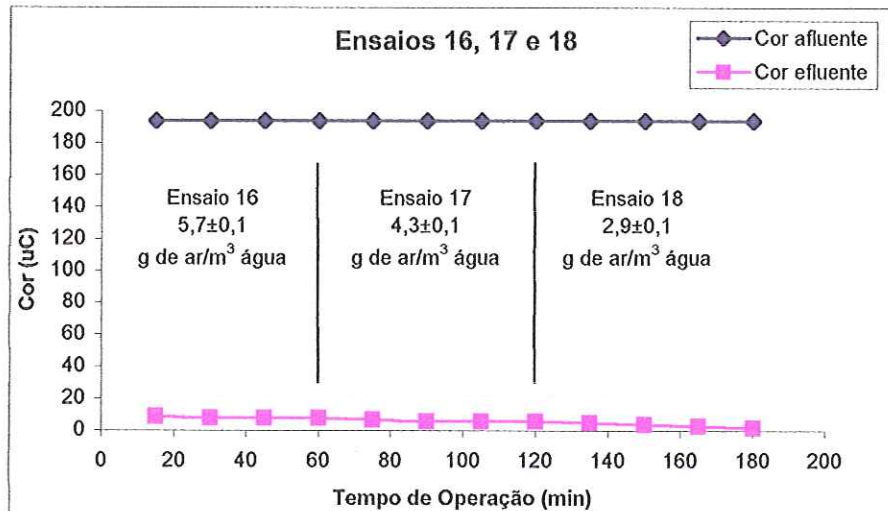


GRÁFICO 5.104 – Cor afluyente e efluente nos ensaios de flotação 16, 17 e 18 da Fase 3a da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=13 m/h,  $T_f=10$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

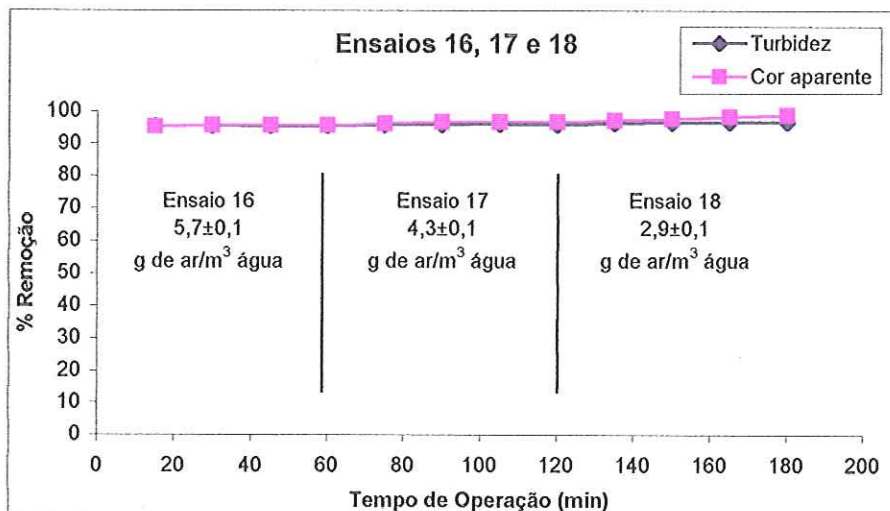


GRÁFICO 5.105 – Remoção (%) de turbidez e cor nos ensaios de flotação 16, 17 e 18 da Fase 3a da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=13 m/h,  $T_f=10$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

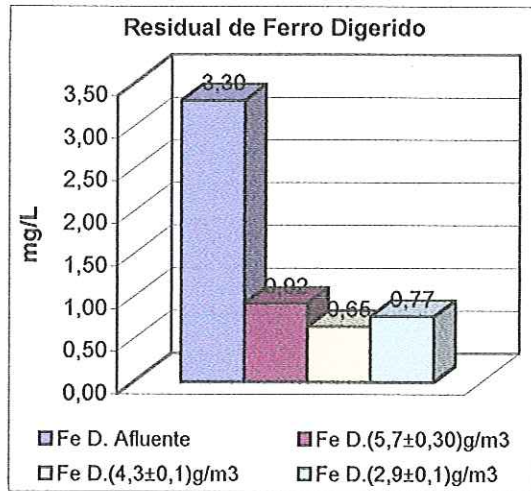


GRÁFICO 5.106 – Ferro digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 16, 17 e 18. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=13 m/h,  $T_r=10$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

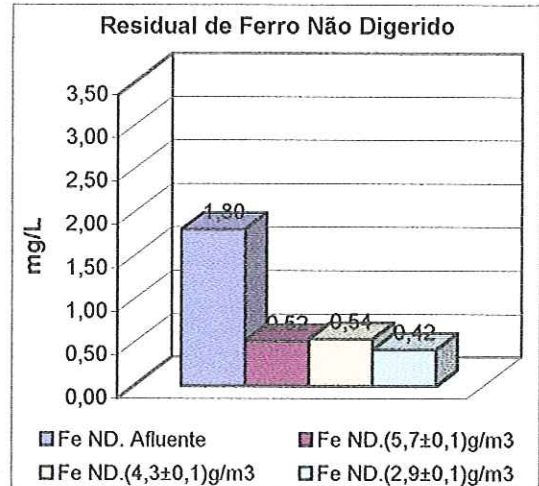


GRÁFICO 5.107 – Ferro não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 16, 17 e 18. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=13 m/h,  $T_r=10$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

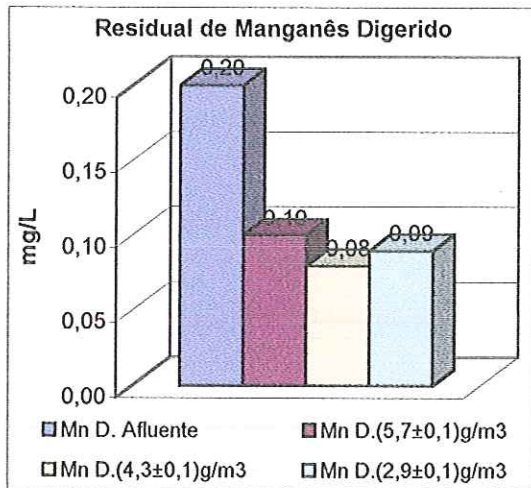


GRÁFICO 5.108 – Manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 16, 17 e 18. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=13 m/h,  $T_r=10$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

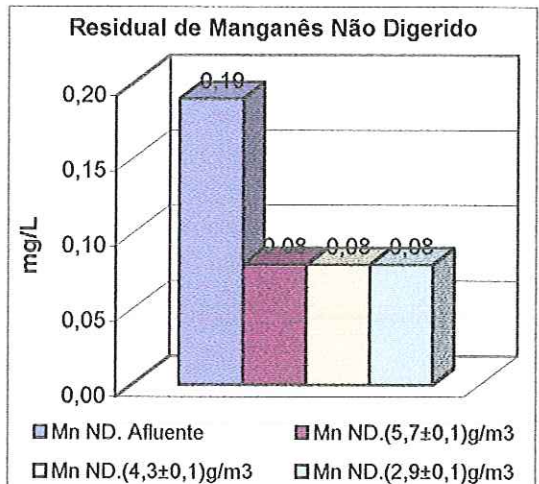


GRÁFICO 5.109 – Manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 16, 17 e 18. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=13 m/h,  $T_r=10$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

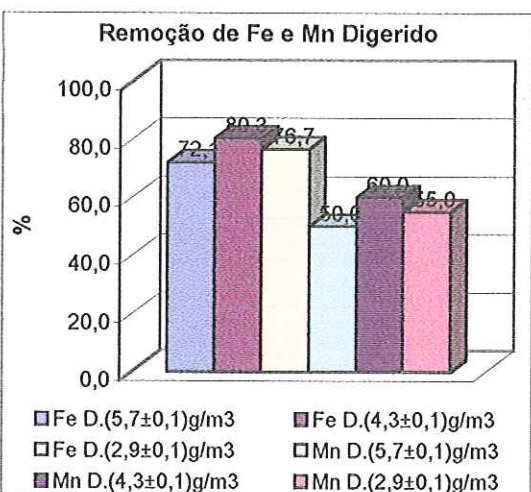


GRÁFICO 5.110 – Remoção de ferro e manganês digeridos nos ensaios de flotação 16, 17 e 18. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=13 m/h,  $T_r=10$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

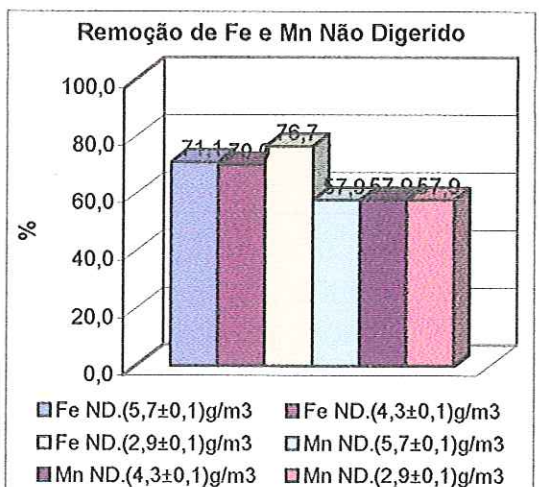


GRÁFICO 5.111 – Remoção de ferro e manganês não digeridos nos ensaios de flotação 16, 17 e 18. Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=13 m/h,  $T_r=10$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

TABELA 5.27 – Características principais da água bruta de estudo para os ensaios de 10 a 18 da Fase 3a da ETAPA II.

Condições dos ensaios: Temperatura = 25 °C

ÁGUA DE ESTUDO													
ENSAIO	pH	Cor Aparente (uC)	Cor Verdadeira (uC)	Turbidez (uT)	Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Conduti vidade (µS/cm)	ST (mg/L)	SST (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Distr. de tamanho partículas (de 2 a 24 µm)	
												Média*	Desvio
10	7,1	186	45	18,4	21,0	17,3	50,3	11,3	1,6	3,4	0,2	6,04	3,62
11	7,1	186	45	18,4	21,0	17,3	50,3	11,3	1,6	3,4	0,2		
12	7,1	186	45	18,4	21,0	17,3	50,3	11,3	1,6	3,4	0,2		
13	7,5	194	47	17,3	22,0	16,8	51,5	10,9	2,8	3,3	0,2	6,07	3,64
14	7,5	194	47	17,3	22,0	16,8	51,5	10,9	2,8	3,3	0,2		
15	7,5	194	47	17,3	22,0	16,8	51,5	10,9	2,8	3,3	0,2		
16	7,5	194	47	17,3	22,0	16,8	51,5	10,9	2,8	3,3	0,2	6,07	3,64
17	7,5	194	47	17,3	22,0	16,8	51,5	10,9	2,8	3,3	0,2		
18	7,5	194	47	17,3	22,0	16,8	51,5	10,9	2,8	3,3	0,2		

\*Média ponderada

TABELA 5.28 – Características principais da água coagulada para os ensaios de 10 a 18 da Fase 3a da ETAPA II.

Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI = 2,7 mg/L, Temperatura = 25 °C

ENSAIO	pH	Cor Aparente (uC)	Potencial Zeta (mV)	Turbidez (uT)	ST (mg/L)	SST (mg/L)	Distribuição de tamanho partículas (de 2 a 24 µm)	
							Média*	Desvio
10	6,4	295	-12,0±1,9	20,0	17,3	4,6	6,45	3,90
11	6,4	295	-12,0±1,9	20,0	17,3	4,6		
12	6,4	295	-12,0±1,9	20,0	17,3	4,6		
13	6,4	271	-12,0±1,9	20,2	17,0	4,9	6,56	3,99
14	6,4	271	-12,0±1,9	20,2	17,0	4,9		
15	6,4	271	-12,0±1,9	20,2	17,0	4,9		
16	6,4	271	-12,0±1,9	20,2	17,0	4,9	6,56	3,99
17	6,4	271	-12,0±1,9	20,2	17,0	4,9		
18	6,4	271	-12,0±1,9	20,2	17,0	4,9		

TABELA 5.29 – Tabela resumo dos resultados das amostras compostas obtidas nos ensaios de flotação de 10 a 18 (Fase 3a da ETAPA II)  
 Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF = 30 mg/L, DCI = 2,7 mg/L, pH = 6,3, Pressão de saturação = 450 kPa, Temperatura = 25 °C

TAS (m/h)	Tempo De Floculação (min)	Ensaio	S <sub>FLO</sub> (g de ar/m <sup>3</sup> água)	Turbidez (uT)		Cor (uC)		SST (mg/L)		Fe total (digerido mg/L)		Mn total (digerido mg/L)		Distribuição de Tamanho partículas ( 2 a 24 µm)	
				AFL	EFL	AFL	EFL	AFL	EFL	AFL	EFL	AFL	EFL	Média*	Desvio
13	20	10	5,7±0,1	18,4	0,38	186	< 2	2,44	< 0,01	3,40	0,20	0,20	0,07	4,05	3,37
		11	4,3±0,1	18,4	0,40	186	< 2	2,44	< 0,01	3,40	0,23	0,20	0,07	3,95	3,42
		12	2,9±0,1	18,4	0,49	186	6	2,44	< 0,01	3,40	0,27	0,20	0,08	3,80	3,03
	15	13	5,7±0,1	17,3	0,40	194	3	2,80	0,05	3,30	0,35	0,20	0,08	4,47	2,96
		14	4,3±0,1	17,3	0,50	194	3	2,80	0,10	3,30	0,45	0,20	0,08	3,45	1,84
		15	2,9±0,1	17,3	0,55	194	5	2,80	0,20	3,30	0,25	0,20	0,08	4,58	3,31
	10	16	5,7±0,1	17,3	0,78	194	9	2,80	0,20	3,30	0,92	0,20	0,10	4,65	3,73
		17	4,3±0,1	17,3	0,70	194	7	2,80	0,15	3,30	0,65	0,20	0,08	4,59	3,76
		18	2,9±0,1	17,3	0,58	194	5	2,80	0,10	3,30	0,77	0,20	0,09	4,60	3,78

\*Média ponderada



### 5.5.3.2. Resultados dos ensaios da Fase 3b

A Fase 3b apresenta os resultados obtidos na série de ensaios com a instalação piloto em que foi aumentado o valor da taxa de flotação para 26 m/h, variando-se o tempo de floculação e a quantidade de ar fornecida ao processo de flotação.

As Tabelas 5.30 e 5.31 apresentam as características principais da água de estudo e da água coagulada. Para cada ensaio, foram coletadas amostras a cada 15 minutos, amostras pontuais e a junção dessas quatro amostras pontuais constituem as amostras compostas. Os gráficos relacionados à cor e turbidez apresentam os resultados das amostras pontuais e os gráficos relacionados a ferro e manganês, apresentam os resultados das amostras compostas. Finalmente, a Tabela 5.32 apresenta um resumo dos resultados das amostras compostas (Gráficos 5.112 a 5.138).

Utilizando-se a taxa de aplicação superficial para 26 m/h, tempo de floculação de 20 minutos e 5,7 g de ar/m<sup>3</sup> de água, nota-se que a remoção de turbidez foi de 94,0%, a remoção de cor foi de 94,1%, a remoção da concentração de ferro total foi de 79,0% e remoção da concentração de manganês total foi de 25,0%. Quando foram utilizados 4,3 g de ar/m<sup>3</sup> de água, os resultados foram ligeiramente melhores com remoção de turbidez de 96,2%, cor de 94,1%, concentração de ferro de 85,3% e remoção de concentração de manganês de 20,0%. Quando 2,9 g de ar/m<sup>3</sup> de água foram utilizados, houve queda na eficiência do sistema, pois o ferro foi obtido com concentração de 1,0 mg/L (70,6% de remoção) e o manganês ficou igual a 0,19 mg/L (5,0% de remoção), resultados não satisfatórios.

Para 20 minutos de floculação e TAS igual a 26 m/h, verifica-se que a quantidade de ar de 2,9 g de ar/m<sup>3</sup> de água não foi suficiente e os resultados apresentados com 4,3 g de ar/m<sup>3</sup> de água foram os melhores, indicando que, dentre as quantidades de ar estudadas, esta é a mais adequada para TAS igual a 26 m/h e T<sub>F</sub> igual a 20 minutos, pois quando se aumentou a quantidade de ar, não houve acréscimo na eficiência do sistema.

Reduzindo-se o tempo de floculação para 15 minutos, os resultados foram ligeiramente superiores, indicando que a redução do tempo de floculação não prejudicou a eficiência do sistema, pois, para as três quantidades de ar fornecidas, a turbidez residual permaneceu em valores inferiores a 1,0 uT, a cor aparente permaneceu em valores entre 5 a 9 uC, a remoção da concentração de ferro total entre 82,9% e 85,1% e a remoção da concentração de manganês total ficou entre 25,0 e 50,0%. É interessante analisar aqui que, para esses ensaios, a coagulação apresentou-se ligeiramente diferente das demais, com potencial zeta (-22,0±1,6 mV) mais negativo que os demais (-12,0±1,9 mV) e diâmetro médio de partículas após a coagulação (6,09 µm) também ligeiramente menor que os demais (entre 6,45 e 6,56 µm). Esses resultados sugerem, curiosamente, que a produção de partículas coaguladas com potencial zeta mais negativo, favoreceram o processo de flotação.

Analisando-se agora tempo de floculação de 10 minutos, observa-se ligeira queda na remoção de turbidez, cor aparente, ferro e manganês. A remoção de ferro ficou entre 66,5% e

75,4% e a remoção de manganês ficou entre 20,0 e 30,0% quando se utilizou 4,3 e 5,7 g de ar/m<sup>3</sup> de água. Utilizando-se 2,9 g de ar/m<sup>3</sup> de água verificou-se queda na eficiência do sistema, indicando que essa quantidade de ar não foi suficiente.

Nota-se que, para o tempo de floculação de 20 minutos, após clarificação por flotação, o diâmetro médio das partículas apresentou-se entre 4,38 e 4,78 µm, para T<sub>F</sub> de 15 minutos, o diâmetro médio das partículas encontrou-se entre 4,07 e 4,32 µm e para T<sub>F</sub> de 10 minutos, o diâmetro médio das partículas esteve entre 3,59 e 4,35 µm. Repetiu-se, portanto o mesmo padrão de comportamento verificado na Fase 2a (taxa de 13 m/h), aumento na retenção de partículas menores no flotador à medida que se aumentou o tempo de floculação de 10 para 15 e 20 minutos, com aumento também da eficiência global do processo de flotação.

Portanto, para TAS igual a 26 m/h, conclui-se que os melhores resultados foram obtidos com valores de tempo de floculação de 15 a 20 minutos, sendo que, para 20 minutos, a quantidade de ar mais adequada foi a de 4,3 g de ar/m<sup>3</sup> de água resultando em 0,7 uT de turbidez, 11 uC de cor aparente, 0,50 mg/L de ferro total, 0,16 mg/L de manganês total e para 15 minutos, a quantidade mais adequada foi a de 5,7 g de ar/m<sup>3</sup> de água resultando 0,79 uT de turbidez, 5 uC de cor aparente, 0,52 mg/L de ferro total e 0,10 mg/L de manganês total.

O tempo de floculação de 10 minutos não foi satisfatório, principalmente para a remoção de ferro na unidade de flotação.

Os resultados dessa fase e também da anterior, no que se refere às determinações de ferro e manganês totais após digestão química e as concentrações detectáveis sem a digestão química, indicam que parcelas significativas do ferro residual encontravam-se complexadas à matéria orgânica, ao contrário do íon manganês que se encontrava na maior parte, na forma livre.

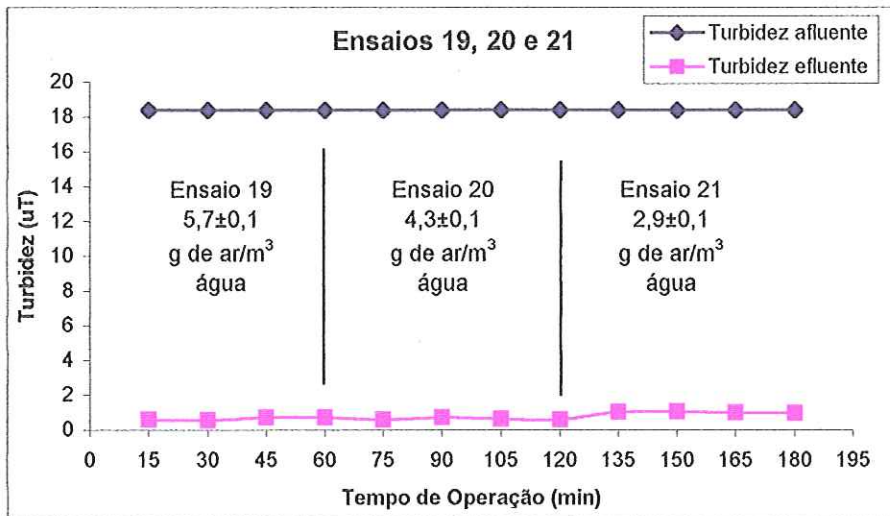


GRÁFICO 5.112 – Turbidez afluente e efluente nos ensaios de flotação 19, 20 e 21 da Fase 3b da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $TAS=26$  m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

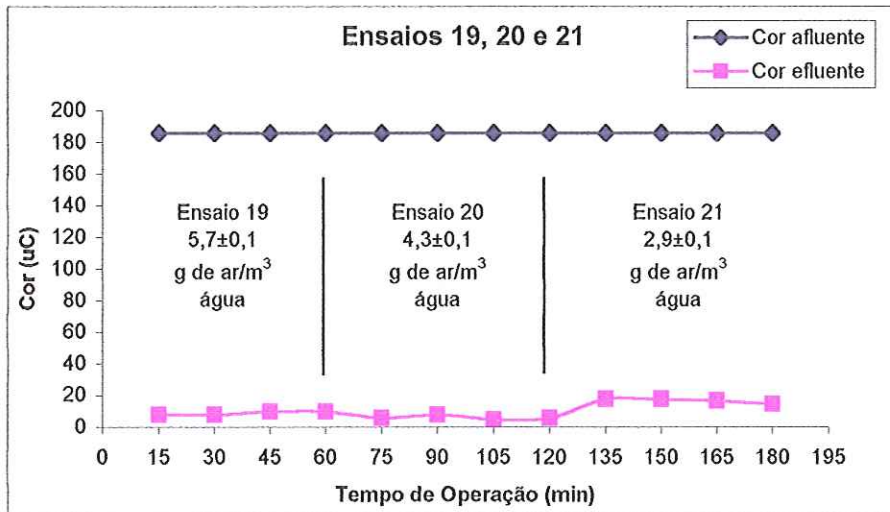


GRÁFICO 5.113 – Cor afluente e efluente nos ensaios de flotação 19, 20 e 21 da Fase 3b da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $TAS=26$  m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

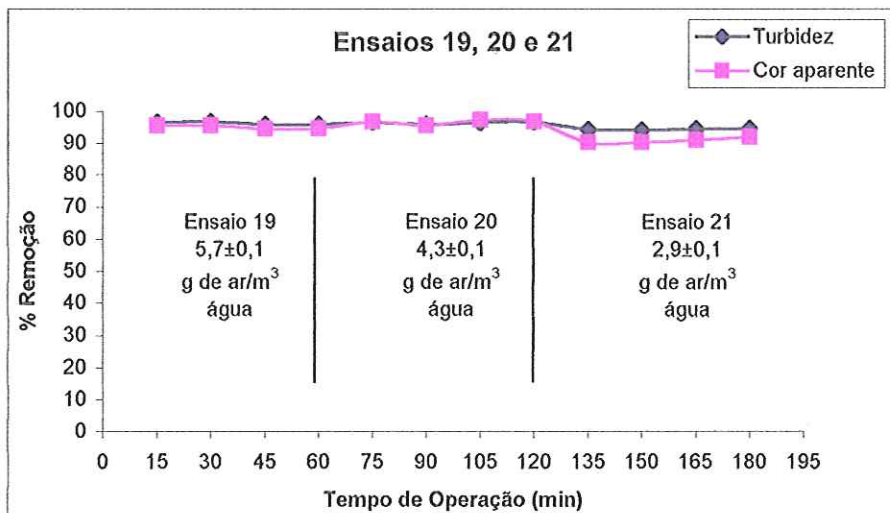


GRÁFICO 5.114 – Remoção (%) de cor e turbidez nos ensaios de flotação 19, 20 e 21 da Fase 3b da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $TAS=26$  m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

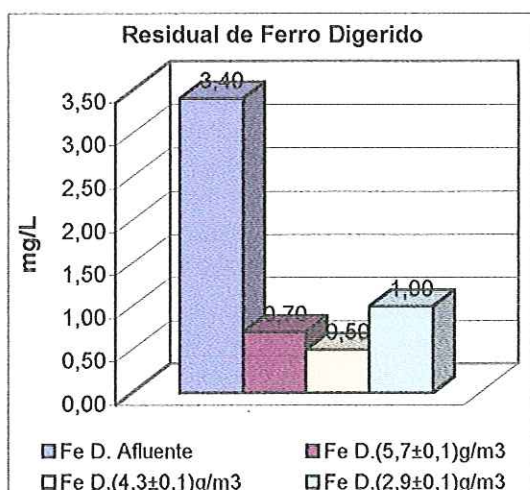


GRÁFICO 5.115 – Ferro digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 19, 20 e 21. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=26 m/h,  $T_r=20$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

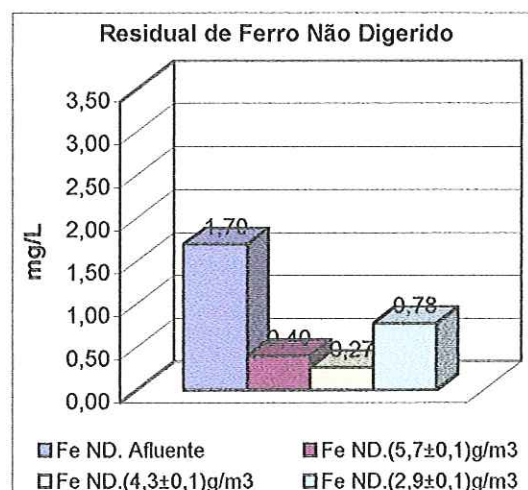


GRÁFICO 5.116 – Ferro não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 19, 20 e 21. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=26 m/h,  $T_r=20$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

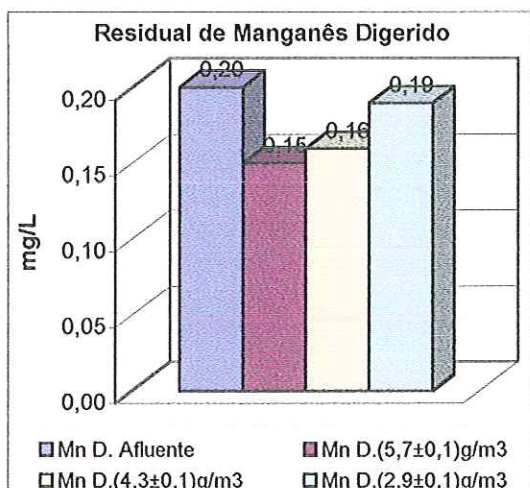


GRÁFICO 5.117 – Manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 19, 20 e 21. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=26 m/h,  $T_r=20$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

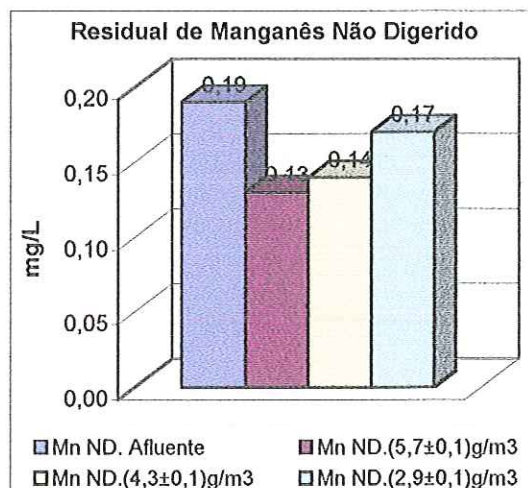


GRÁFICO 5.118 – Manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 19, 20 e 21. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=26 m/h,  $T_r=20$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

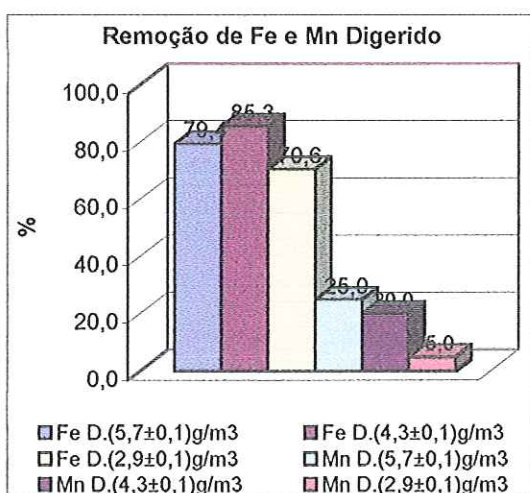


GRÁFICO 5.119 – Remoção de ferro e manganês digeridos nos ensaios de flotação 19, 20 e 21. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=26 m/h,  $T_r=20$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

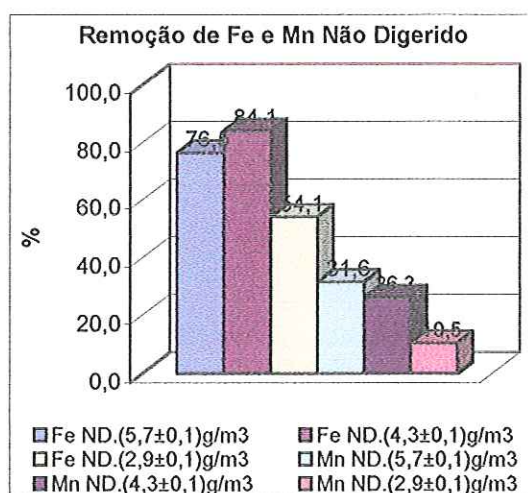


GRÁFICO 5.120 – Remoção de ferro e manganês não digeridos nos ensaios de flotação 19, 20 e 21. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=26 m/h,  $T_r=20$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

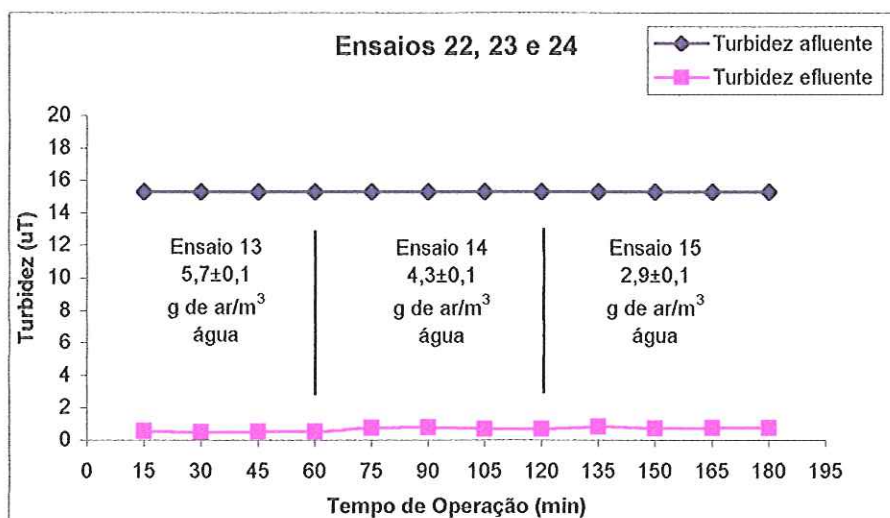


GRÁFICO 5.121 – Turbidez afluyente e efluente nos ensaios de flotação 22, 23 e 24 da Fase 3b da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $TAS=26$  m/h,  $T_r=15$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

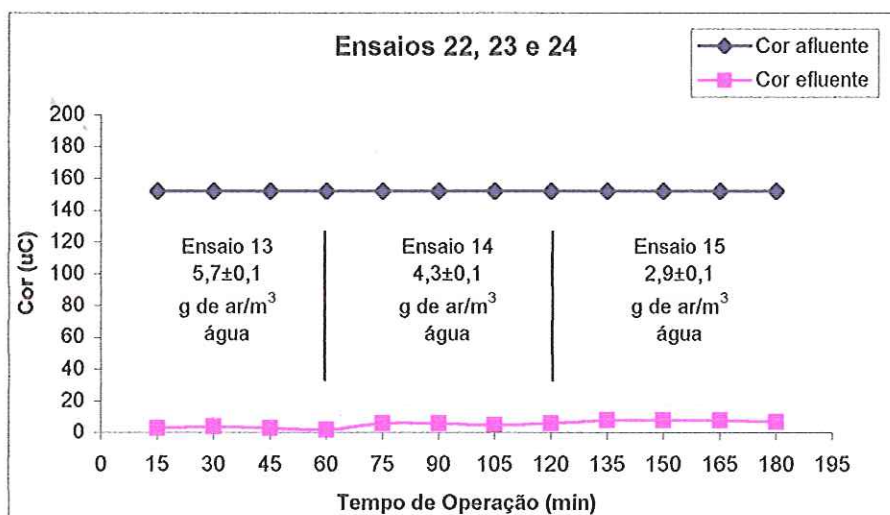


GRÁFICO 5.122 – Cor afluyente e efluente nos ensaios de flotação 22, 23 e 24 da Fase 3b da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $TAS=26$  m/h,  $T_r=15$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

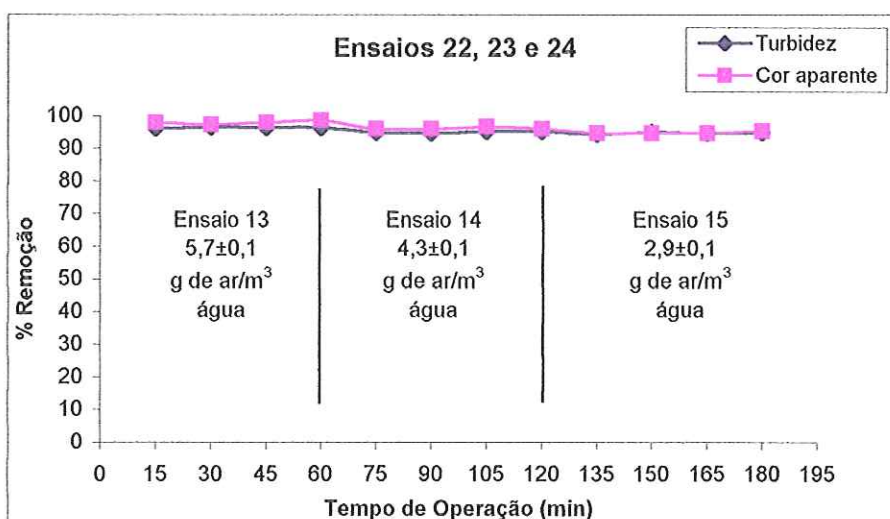


GRÁFICO 5.123 – Remoção (%) de cor e turbidez nos ensaios de flotação 22, 23 e 24 da Fase 3b da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $TAS=26$  m/h,  $T_r=15$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

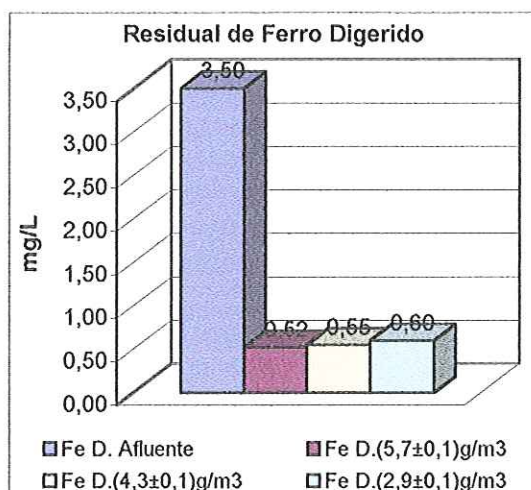


GRÁFICO 5.124 – Ferro digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 22, 23 e 24. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=26 m/h,  $T_r=15$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

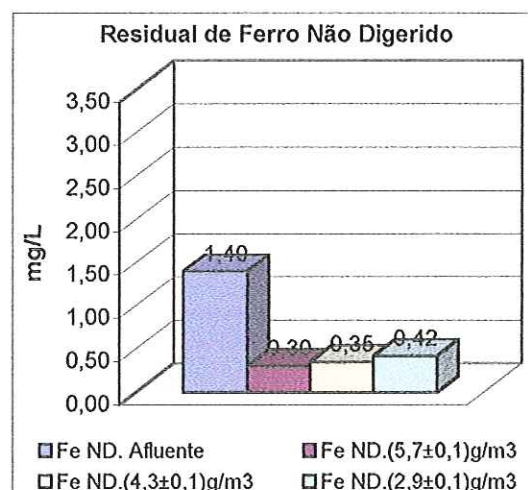


GRÁFICO 5.125 – Ferro não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 22, 23 e 24. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=26 m/h,  $T_r=15$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

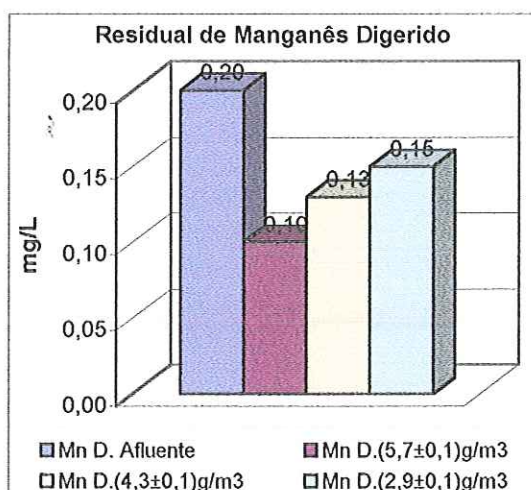


GRÁFICO 5.126 – Manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 22, 23 e 24. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=26 m/h,  $T_r=15$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

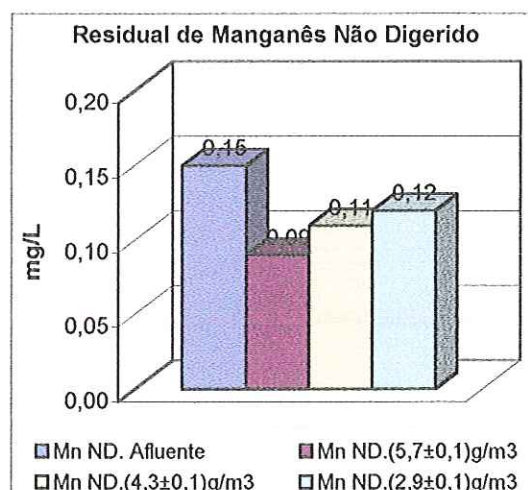


GRÁFICO 5.127 – Manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 22, 23 e 24. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=26 m/h,  $T_r=15$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

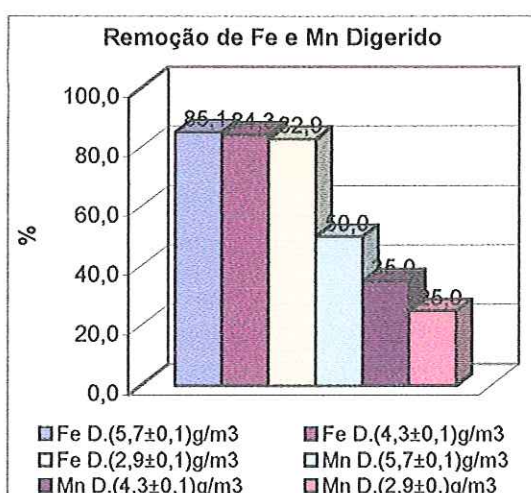


GRÁFICO 5.128 – Remoção de ferro e manganês digeridos nos ensaios de flotação 22, 23 e 24. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=26 m/h,  $T_r=15$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

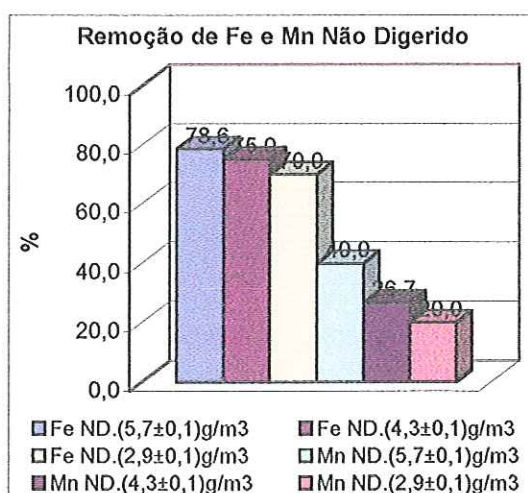


GRÁFICO 5.129 – Remoção de ferro e manganês digeridos nos ensaios de flotação 22, 23 e 24. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=26 m/h,  $T_r=15$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

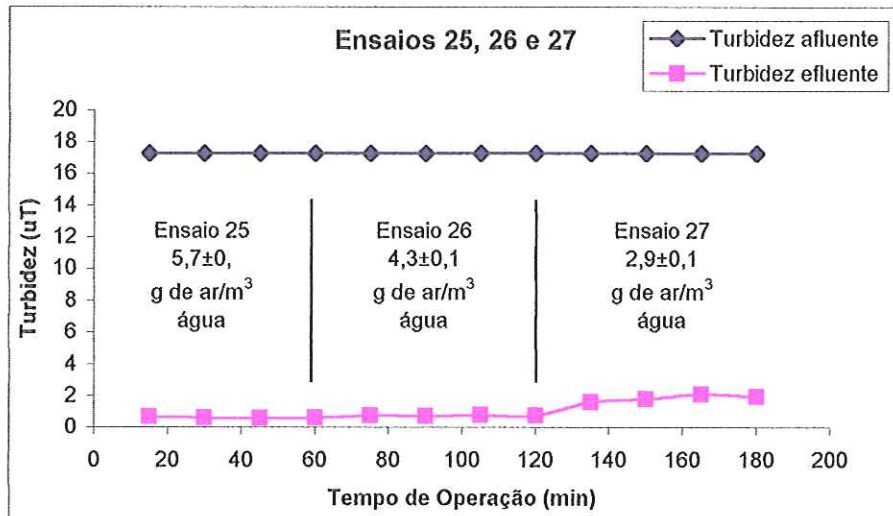


GRÁFICO 5.130 – Turbidez afluyente e efluente nos ensaios de flotação 25, 26 e 27 da Fase 3b da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $TAS=26$  m/h,  $T_f=10$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

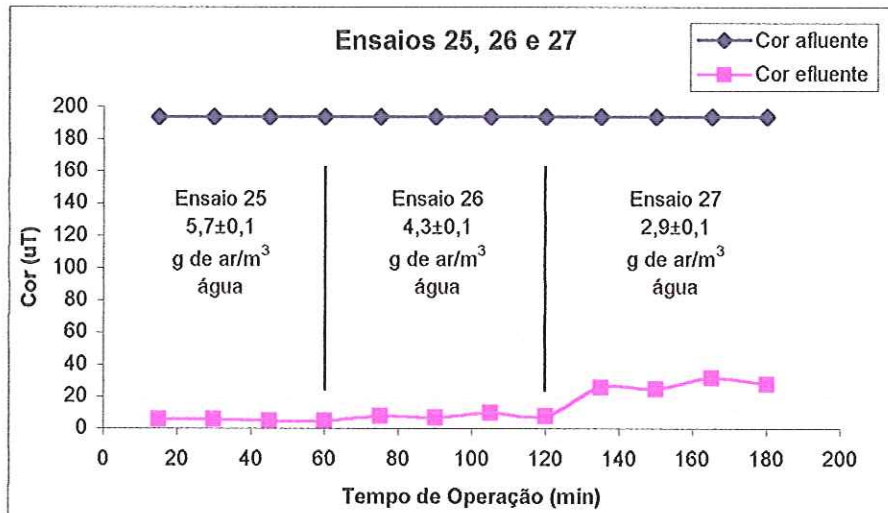


GRÁFICO 5.131 – Cor afluyente e efluente nos ensaios de flotação 25, 26 e 27 da Fase 3b da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $TAS=26$  m/h,  $T_f=10$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

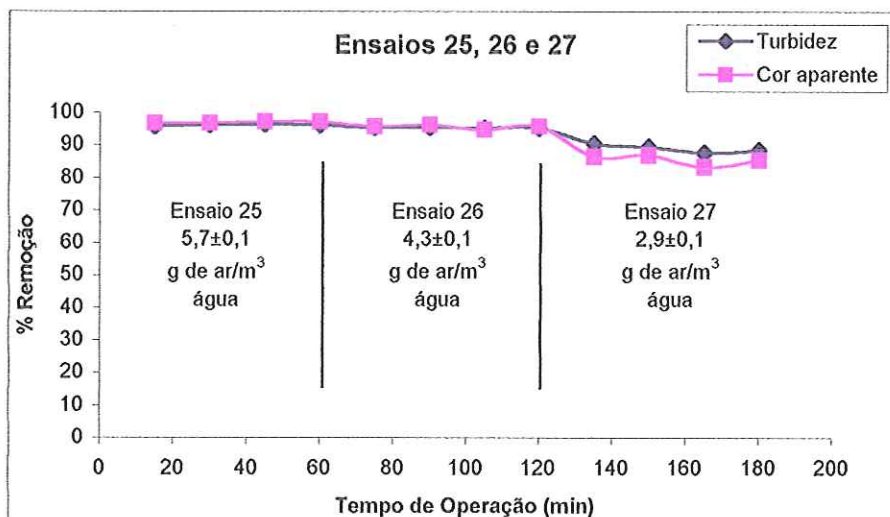


GRÁFICO 5.132 – Remoção (%) de cor e turbidez nos ensaios de flotação 25, 26 e 27 da Fase 3b da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $TAS=26$  m/h,  $T_f=10$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

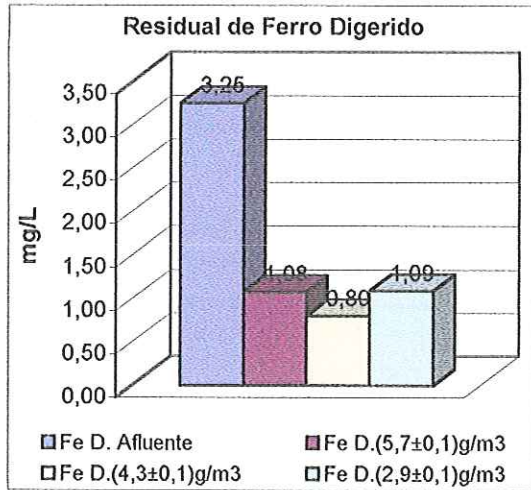


GRÁFICO 5.133 – Ferro digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 25, 26 e 27. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=26 m/h, Tr=10minutos, Gr=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

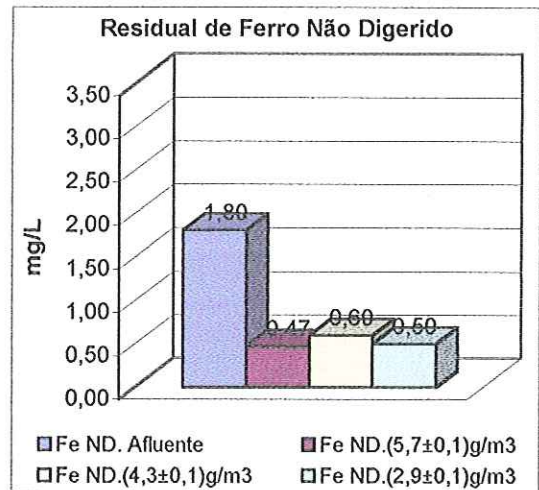


GRÁFICO 5.134 – Ferro não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 25, 26 e 27. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=26 m/h, Tr=10minutos, Gr=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

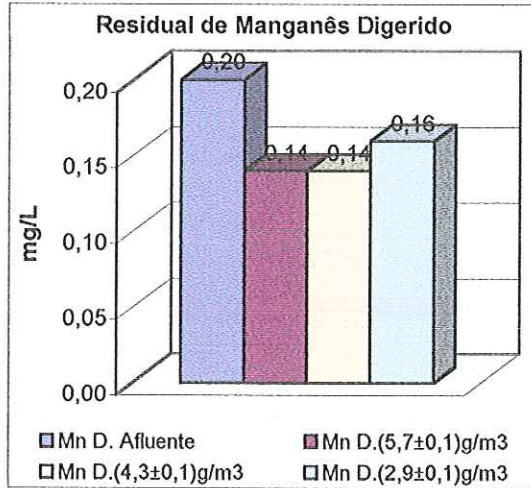


GRÁFICO 5.135 – Manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 25, 26 e 27. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=26 m/h, Tr=10minutos, Gr=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

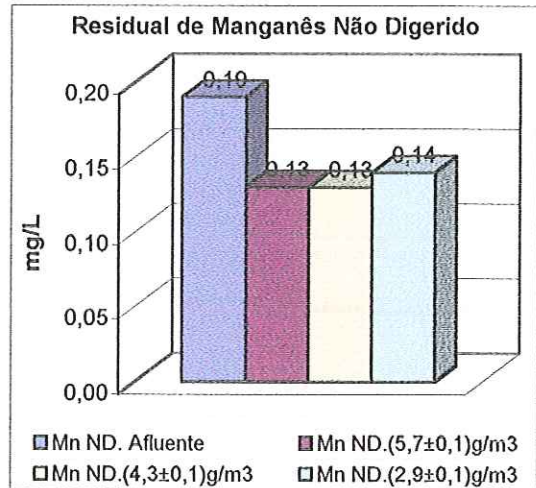


GRÁFICO 5.136 – Manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 25, 26 e 27. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=26 m/h, Tr=10minutos, Gr=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

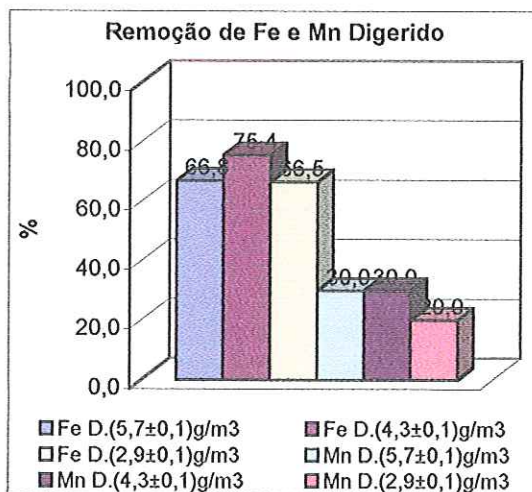


GRÁFICO 5.137 – Remoção de ferro e manganês digeridos nos ensaios de flotação 25, 26 e 27. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=26 m/h, Tr=10minutos, Gr=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

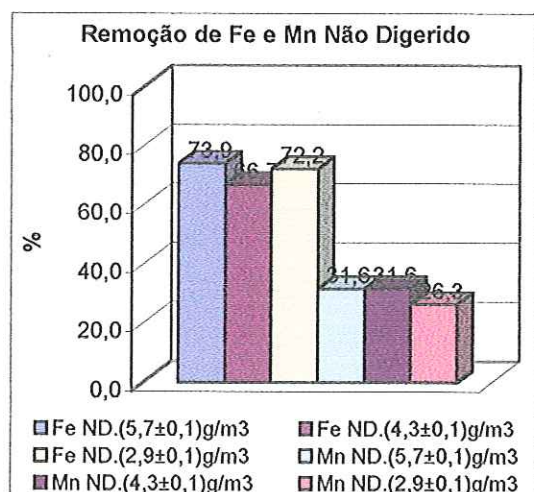


GRÁFICO 5.138 – Remoção de ferro e manganês não digeridos nos ensaios de flotação 25, 26 e 27. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=26 m/h, Tr=10minutos, Gr=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa



TABELA 5.30 – Características principais da água bruta de estudo para os ensaios de 19 a 27 da Fase 3b da ETAPA II.

Condições dos ensaios: Temperatura = 25 °C

ÁGUA DE ESTUDO													
ENSAIO	pH	Cor Aparente (uC)	Cor Verdadeira (uC)	Turbidez (uT)	Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Conduti- vidade (µS/cm)	ST (mg/L)	SST (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Distr. de tamanho partículas (de 2 a 24 µm)	
												Média*	Desvio
19	7,1	186	45	18,4	21,0	17,3	50,3	11,3	2,4	3,4	0,2	6,04	3,62
20	7,1	186	45	18,4	21,0	17,3	50,3	11,3	2,4	3,4	0,2		
21	7,1	186	45	18,4	21,0	17,3	50,3	11,3	2,4	3,4	0,2		
22	7,7	152	37	15,3	25,0	16,8	49,5	10,4	2,1	3,5	0,2	5,62	3,39
23	7,7	152	37	15,3	25,0	16,8	49,5	10,4	2,1	3,5	0,2		
24	7,7	152	37	15,3	25,0	16,8	49,5	10,4	2,1	3,5	0,2		
25	7,5	194	47	17,3	22,0	16,8	51,5	10,9	2,8	3,3	0,2	6,07	3,64
26	7,5	194	47	17,3	22,0	16,8	51,5	10,9	2,8	3,3	0,2		
27	7,5	194	47	17,3	22,0	16,8	51,5	10,9	2,8	3,3	0,2		

\*Média ponderada

TABELA 5.31 – Características principais da água coagulada para os ensaios de 19 a 27 da Fase 3b da ETAPA II.

Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI = 2,7 mg/L, Temperatura = 25 °C

ENSAIO	pH	Cor Aparente (uC)	Potencial Zeta (mV)	Turbidez (uT)	ST (mg/L)	SST (mg/L)	Distribuição de tamanho partículas (de 2 a 24 µm)	
							Média*	Desvio
19	6,4	295	-12,0±1,9	20,0	17,3	4,6	6,45	3,90
20	6,4	295	-12,0±1,9	20,0	17,3	4,6		
21	6,4	295	-12,0±1,9	20,0	17,3	4,6		
22	6,7	245	-22,0±1,6	18,3	15,7	4,7	6,09	3,65
23	6,7	245	-22,0±1,6	18,3	15,7	4,7		
24	6,7	245	-22,0±1,6	18,3	15,7	4,7		
25	6,4	271	-12,0±1,9	20,2	17,0	4,9	6,56	3,99
26	6,4	271	-12,0±1,9	20,2	17,0	4,9		
27	6,4	271	-12,0±1,9	20,2	17,0	4,9		

TABELA 5.32 – Tabela resumo dos resultados das amostras compostas obtidas nos ensaios de flotação de 19 a 27 (Fase 3b da ETAPA II)  
 Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF = 30 mg/L, DCI = 2,7 mg/L, pH = 6,3, Pressão de saturação = 450 kPa, Temperatura = 25 °C

TAS (m/h)	Tempo De Floculação (min)	Ensaio	S <sub>FLO</sub> (g de ar/m <sup>3</sup> água)	Turbidez (uT)		Cor (uC)		SST (mg/L)		Fe total (digerido mg/L)		Mn total (digerido mg/L)		Distribuição de Tamanho partículas (de 2 a 24 µm)	
				AFL	EFL	AFL	EFL	AFL	EFL	AFL	EFL	AFL	EFL	Média*	Desvio
26	20	19	5,7±0,1	18,4	1,1	186	11	2,44	0,15	3,40	0,70	0,20	0,15	4,77	3,94
		20	4,3±0,1	18,4	0,7	186	11	2,44	0,20	3,40	0,50	0,20	0,16	4,38	3,73
		21	2,9±0,1	18,4	1,1	186	18	2,44	0,35	3,40	1,0	0,20	0,19	4,78	3,93
	15	22	5,7±0,1	15,3	0,79	152	5	2,14	0,10	3,50	0,52	0,20	0,10	4,32	3,26
		23	4,3±0,1	15,3	0,97	152	7	2,14	0,12	3,50	0,55	0,20	0,13	4,07	3,02
		24	2,9±0,1	15,3	0,99	152	9	2,14	0,23	3,50	0,60	0,20	0,15	4,09	2,98
	10	25	5,7±0,1	17,3	0,70	194	6	2,80	0,20	3,25	1,08	0,20	0,14	4,35	3,38
		26	4,3±0,1	17,3	0,83	194	10	2,80	0,30	3,25	0,80	0,20	0,14	3,59	2,09
		27	2,9±0,1	17,3	2,3	194	33	2,80	0,40	3,25	1,09	0,20	0,16	4,14	2,86

\*Média ponderada

### 5.5.3.3. Resultados dos Ensaios da Fase 3c

A Fase 3c apresenta os resultados obtidos na série de ensaios com a instalação piloto em que o valor da TAS no flotador foi aumentado para 39 m/h.

As Tabelas 5.33 e 5.34 apresentam as principais características da água de estudo e da água coagulada. Para cada ensaio, foram coletadas amostras a cada 15 minutos, amostras pontuais e a junção dessas 4 amostras pontuais são as amostras compostas. Os gráficos relacionados à cor e turbidez apresentam os resultados das amostras pontuais e os gráficos relacionados a ferro e manganês, apresentam os resultados das amostras compostas. A Tabela 5.35 apresenta um resumo dos resultados das amostras compostas (Gráficos 5.139 a 5.165).

Na avaliação de tempo de floculação de 20 minutos, observa-se queda na eficiência em comparação com a taxa de 26 m/h. Os melhores resultados foram obtidos com 4,3 g de ar/m<sup>3</sup> de água, pois a turbidez residual foi de 2,0 uT, a cor aparente residual foi de 25 uC, a concentração de ferro total residual foi de 0,82 mg/L e a de manganês total residual foi de 0,16 mg/L. Aumentando-se a quantidade de ar não houve acréscimo na eficiência do sistema. Quando se utilizou 2,9 g de ar/m<sup>3</sup> de água, observou-se queda na eficiência do sistema, pois se verificou que a cor aparente residual foi de 42 uC, a concentração de ferro total residual foi de 1,35 mg/L e a concentração de manganês total residual foi de 0,18 mg/L. Portanto, esta quantidade de ar não foi suficiente.

Quando se analisa tempo de floculação de 15 minutos comparado ao tempo de 20 minutos, observa-se queda na eficiência do sistema, pois a remoção foi de 78,8% para turbidez e de 62,5% para a cor quando se utilizou 5,7 g de ar/m<sup>3</sup> de água, remoção de 71,6% para a turbidez e de 57,2% para a cor quando se utilizou 4,3 g de ar/m<sup>3</sup> de água e remoção de 68,4% para a turbidez e de 46,7% para a cor quando se utilizou 2,9 g de ar/m<sup>3</sup> de água. Pode-se observar que a quantidade de ar de 2,9 g de ar/m<sup>3</sup> de água não foi adequada para esse valor de taxa (39 m/h), pois a queda na eficiência de remoção acentuou-se com redução do tempo de floculação. Para a quantidade de ar de 2,9 g de ar/m<sup>3</sup> de água, o ferro total residual apresentou-se com concentração de 2,35 mg/L, ou seja, remoção de 32,5%, e o manganês total residual apresentou-se com concentração de 0,20 mg/L, ou seja, não houve remoção deste metal. Portanto, para 15 minutos, a quantidade de ar que forneceu os melhores resultados foi 5,7 g de ar/m<sup>3</sup> de água. É importante ressaltar que para esses ensaios a coagulação apresentou-se ligeiramente diferente das outras, com potencial zeta (-22,0±1,8 mV) mais negativo que os demais (-12,0±1,9 mV) e diâmetro médio de partículas (6,09 µm) também ligeiramente menor (entre 6,23 e 6,34 µm).

Analisando-se agora o tempo de floculação de 10 minutos, observa-se que houve ligeira melhora em relação aos resultados obtidos com tempo de floculação de 15 minutos, pois a turbidez residual apresentou-se entre 2,8 e 3,3 uT a cor aparente residual entre 39 e 57 uC, o ferro total residual entre 1,6 e 1,7 mg/L e o manganês total residual entre 0,18 e 0,19 mg/L.

---

É interessante observar que para a taxa de 39 m/h, houve queda na eficiência, principalmente para remoção de ferro, quando houve redução do tempo de floculação para 15 minutos. Na redução de 15 para 10 minutos de floculação, os resultados obtidos foram ligeiramente superiores, porém bem inferiores aos obtidos para 20 minutos de floculação.

Nota-se que, para o tempo de floculação de 20 minutos, após clarificação por flotação, o diâmetro médio das partículas apresentou-se entre 4,47 e 4,81  $\mu\text{m}$ , para  $T_F$  de 15 minutos, o diâmetro médio das partículas encontrou-se entre 4,30 e 4,47  $\mu\text{m}$  e para  $T_F$  de 10 minutos, o diâmetro médio das partículas esteve entre 4,32 e 4,49  $\mu\text{m}$ . Manteve-se, portanto a mesma tendência comentada na discussão dos resultados das fases anteriores, no que se refere à distribuição de tamanho de partículas no efluente do flotador.

Conclui-se, portanto, que para 39 m/h, os melhores resultados foram obtidos com 20 minutos de floculação e 4,3 g de ar/ $\text{m}^3$  de água, e que a redução do tempo de floculação para 15 e 10 minutos acarretou queda na eficiência do sistema.

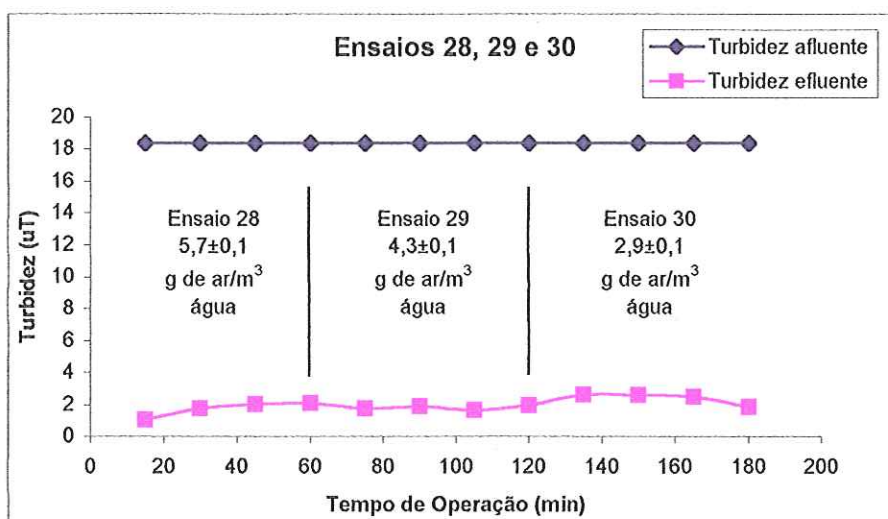


GRÁFICO 5.139 – Turbidez afluente e efluente nos ensaios de flotação 28, 29 e 30 da Fase 3c da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $TAS=39$  m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

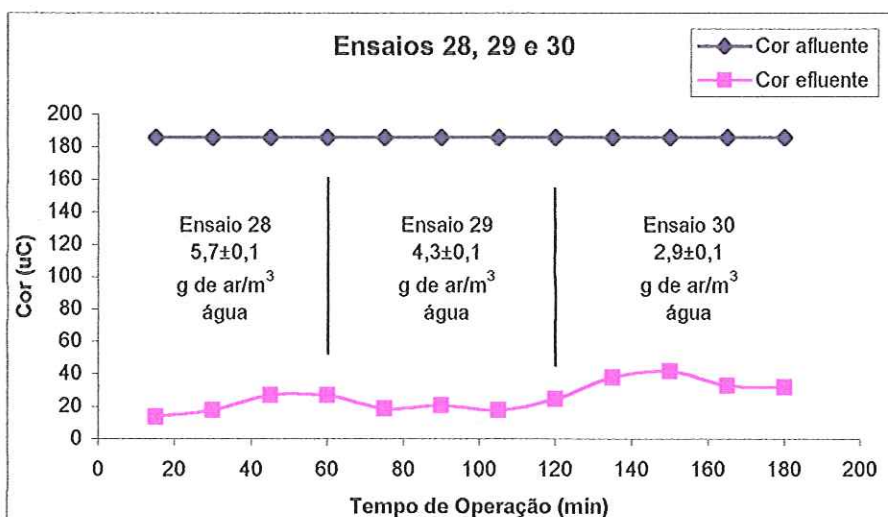


GRÁFICO 5.140 – Cor afluente e efluente nos ensaios de flotação 28, 29 e 30 da Fase 3c da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $TAS=39$  m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

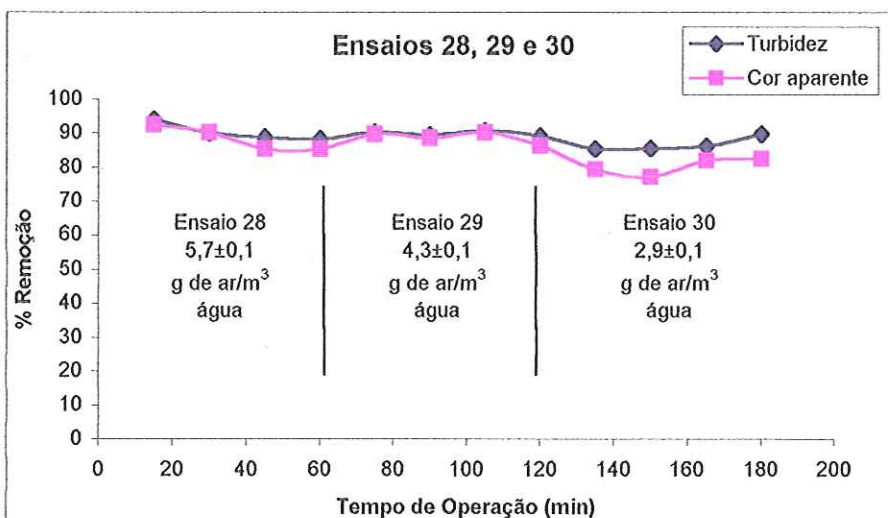


GRÁFICO 5.141 – Remoção (%) de cor e turbidez nos ensaios de flotação 28, 29 e 30 da Fase 3c da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $TAS=39$  m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

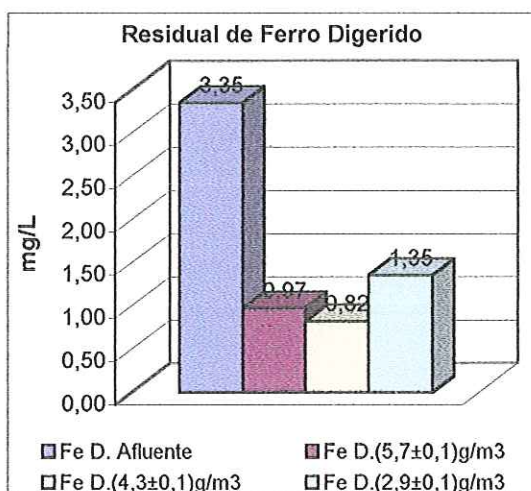


GRÁFICO 5.142 – Ferro digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 28, 29 e 30. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=39 m/h, T<sub>r</sub>=20 minutos, G<sub>r</sub>=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

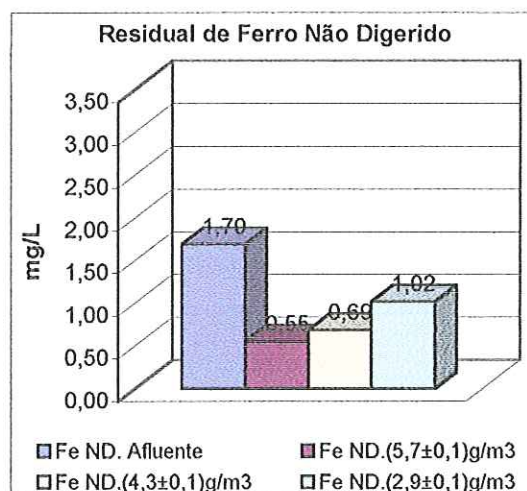


GRÁFICO 5.143 – Ferro não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 28, 29 e 30. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=39 m/h, T<sub>r</sub>=20 minutos, G<sub>r</sub>=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

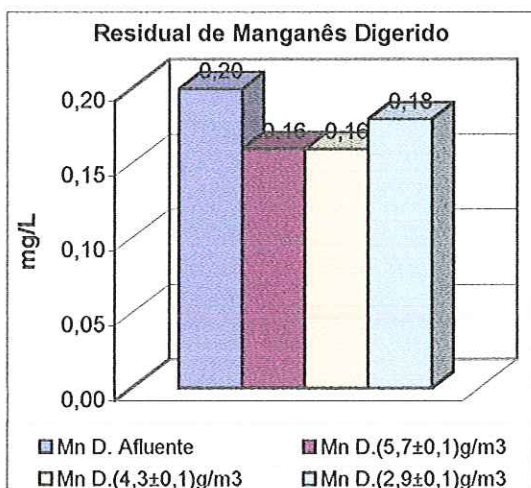


GRÁFICO 5.144 – Manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 28, 29 e 30. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=39 m/h, T<sub>r</sub>=20 minutos, G<sub>r</sub>=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

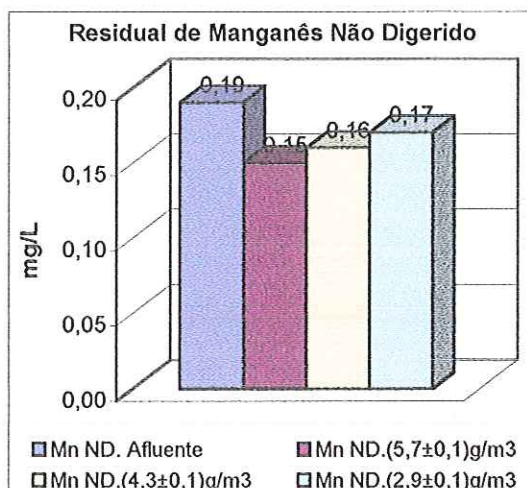


GRÁFICO 5.145 – Manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 28, 29 e 30. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=39 m/h, T<sub>r</sub>=20 minutos, G<sub>r</sub>=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

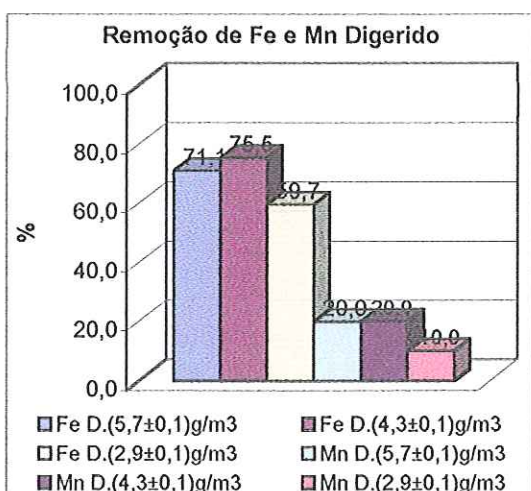


GRÁFICO 5.146 – Remoção de ferro e manganês digeridos nos ensaios de flotação 28, 29 e 30. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=39 m/h, T<sub>r</sub>=20 minutos, G<sub>r</sub>=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

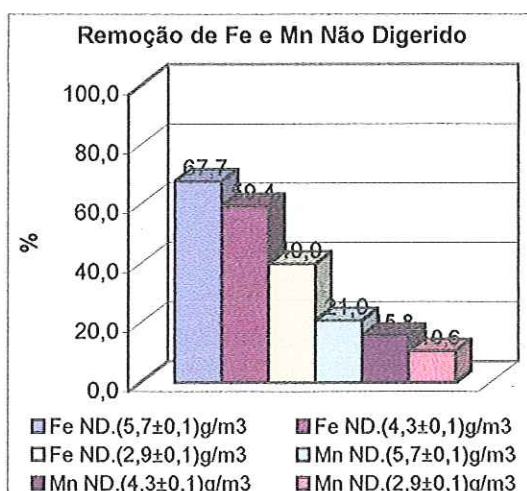


GRÁFICO 5.147 – Remoção de ferro e manganês não digeridos nos ensaios de flotação 28, 29 e 30. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=39 m/h, T<sub>r</sub>=20 minutos, G<sub>r</sub>=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

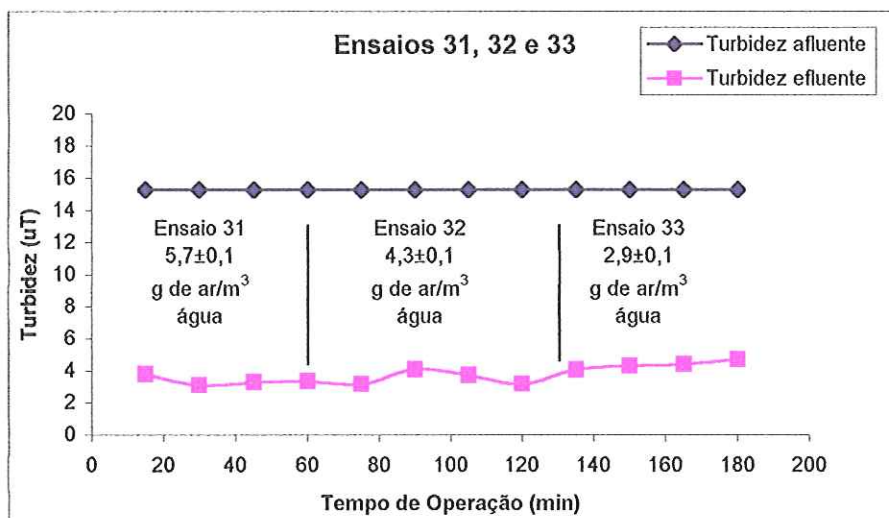


GRÁFICO 5.148 – Turbidez afluente e efluente nos ensaios de flotação 31, 32 e 33 da Fase 3c da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $TAS=39$  m/h,  $T_f=15$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

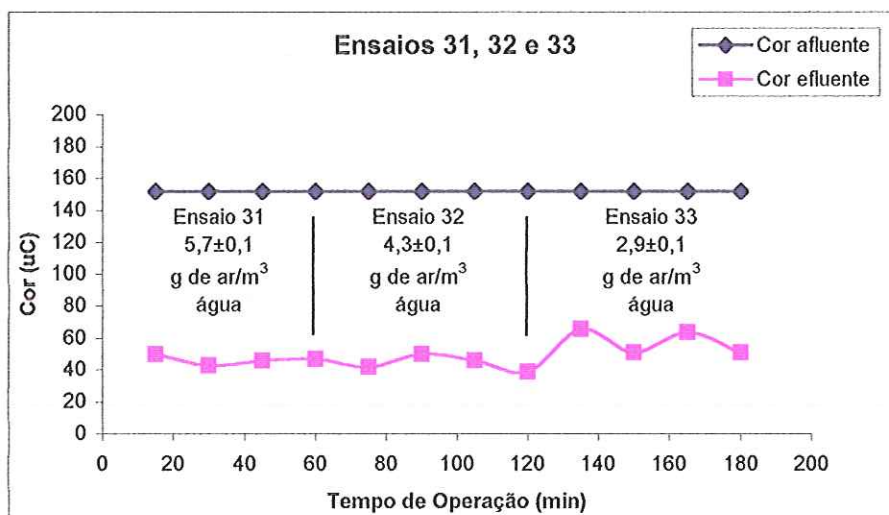


GRÁFICO 5.149 – Cor afluente e efluente nos ensaios de flotação 31, 32 e 33 da Fase 3c da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $TAS=39$  m/h,  $T_f=15$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

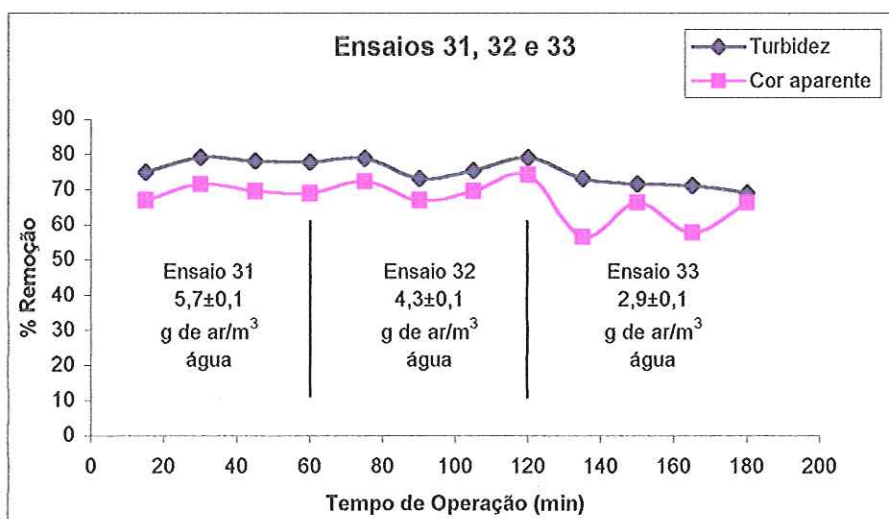


GRÁFICO 5.150 – Remoção (%) de cor e turbidez nos ensaios de flotação 31, 32 e 33 da Fase 3c da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $TAS=39$  m/h,  $T_f=15$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

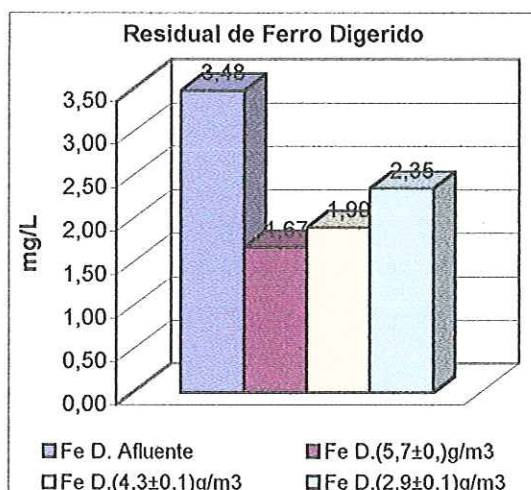


GRÁFICO 5.151 – Ferro digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 31, 32 e 33. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=39 m/h, T<sub>r</sub>=15 minutos, G<sub>r</sub>=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

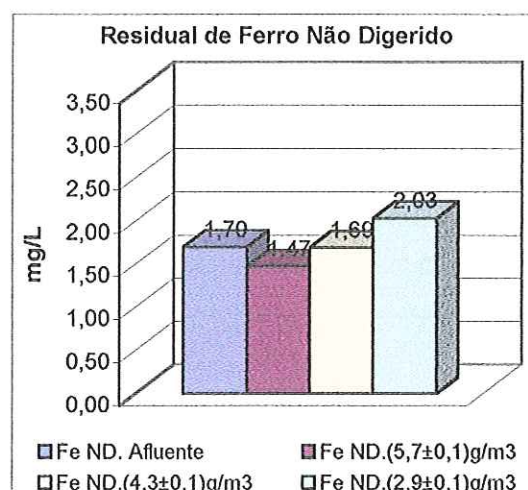


GRÁFICO 5.152 – Ferro não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 31, 32 e 33. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=39 m/h, T<sub>r</sub>=15 minutos, G<sub>r</sub>=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

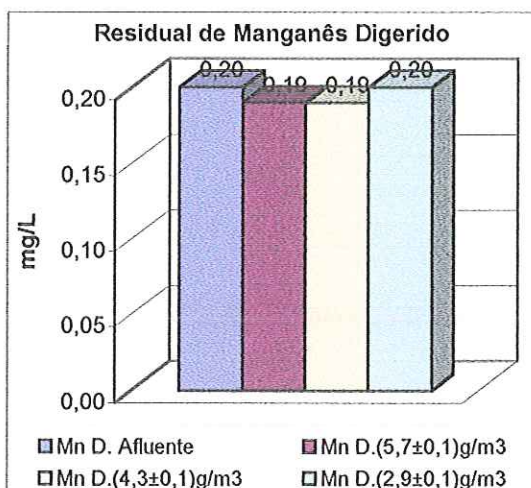


GRÁFICO 5.153 – Manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 31, 32 e 33. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=39 m/h, T<sub>r</sub>=15 minutos, G<sub>r</sub>=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

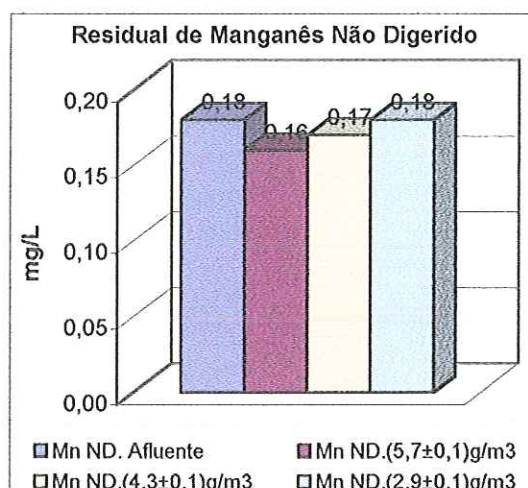


GRÁFICO 5.154 – Manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 31, 32 e 33. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=39 m/h, T<sub>r</sub>=15 minutos, G<sub>r</sub>=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

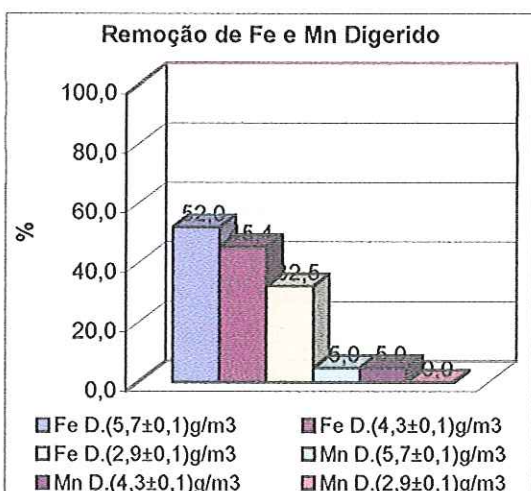


GRÁFICO 5.155 – Remoção (%) de ferro e manganês digeridos nos ensaios de flotação 31, 32 e 33. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=39 m/h, T<sub>r</sub>=15 minutos, G<sub>r</sub>=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

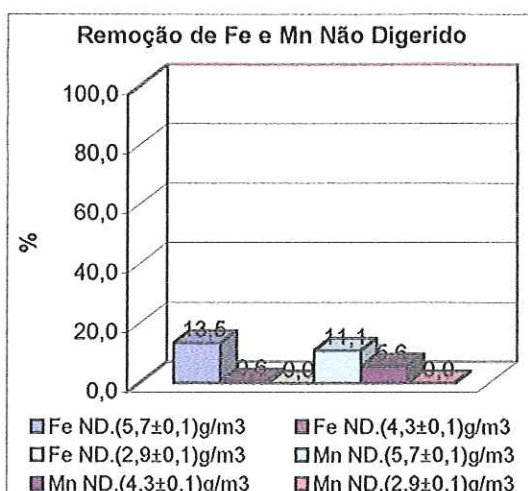


GRÁFICO 5.156 – Remoção (%) de ferro e manganês não digeridos nos ensaios de flotação 31, 32 e 33. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=39 m/h, T<sub>r</sub>=15 minutos, G<sub>r</sub>=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa



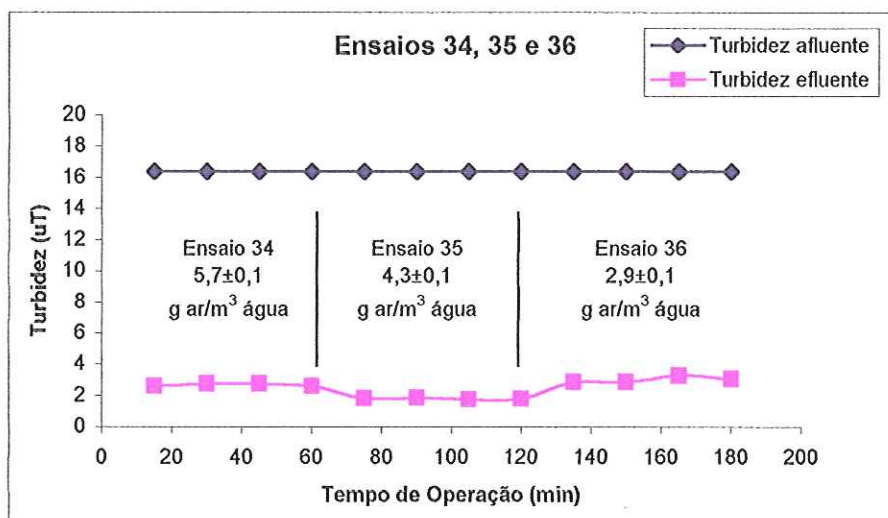


GRÁFICO 5.157 – Turbidez afluente e efluente nos ensaios de flotação 34, 35 e 36 da Fase 3c da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $TAS=39$  m/h,  $T_r=10$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

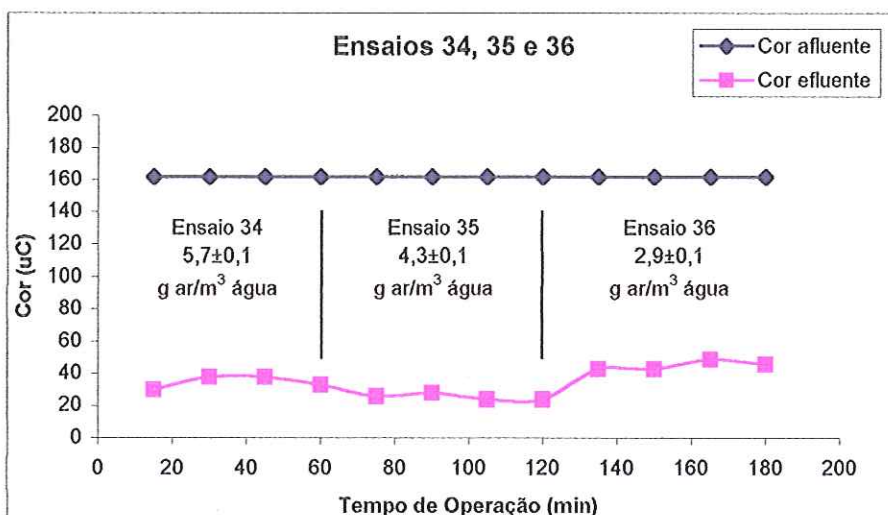


GRÁFICO 5.158 – Cor afluente e efluente nos ensaios de flotação 34, 35 e 36 da Fase 3c da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $TAS=39$  m/h,  $T_r=10$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

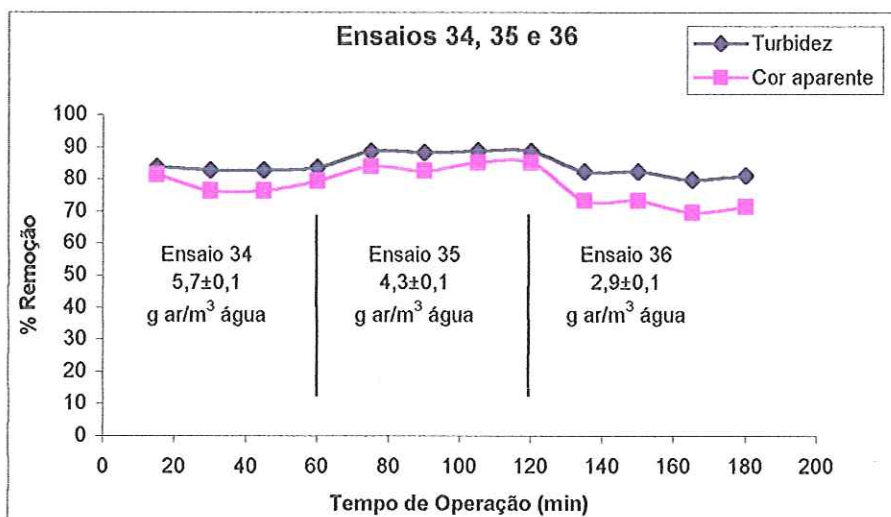


GRÁFICO 5.159 – Remoção (%) de cor e turbidez nos ensaios de flotação 34, 35 e 36 da Fase 3c da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $TAS=39$  m/h,  $T_r=10$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

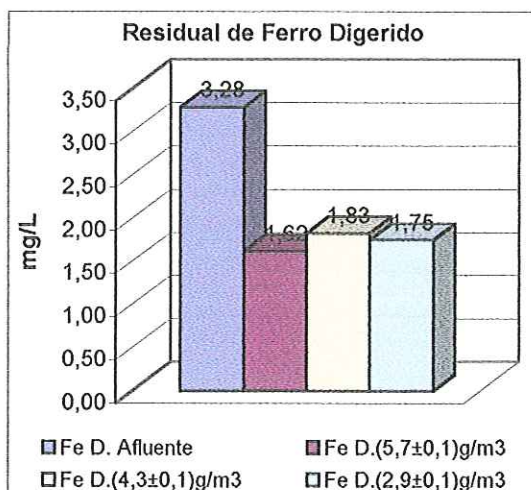


GRÁFICO 5.160 – Ferro digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 34, 35 e 36. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=39 m/h,  $T_r=10$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

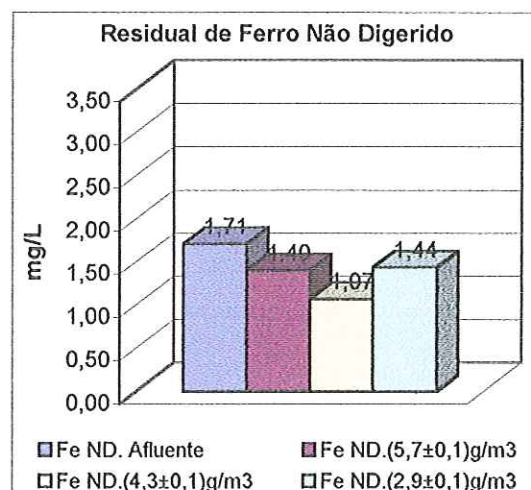


GRÁFICO 5.161 – Ferro não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 34, 35 e 36. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=39 m/h,  $T_r=10$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

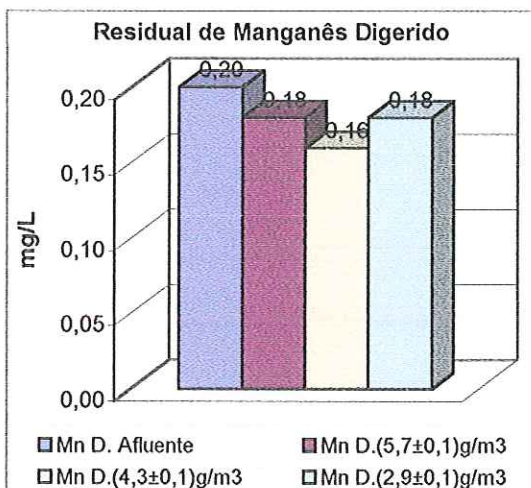


GRÁFICO 5.162 – Manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 34, 35 e 36. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=39 m/h,  $T_r=10$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

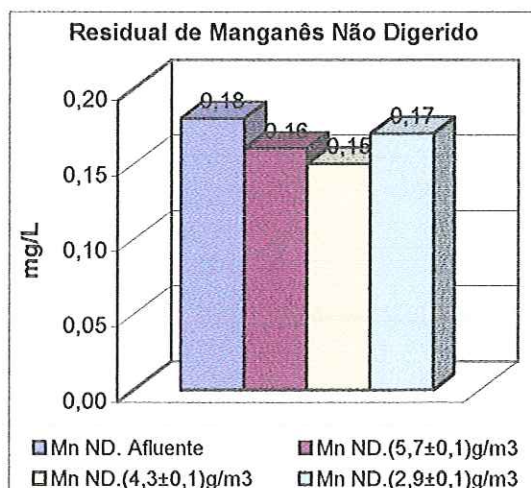


GRÁFICO 5.163 – Manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 34, 35 e 36. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=39 m/h,  $T_r=10$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

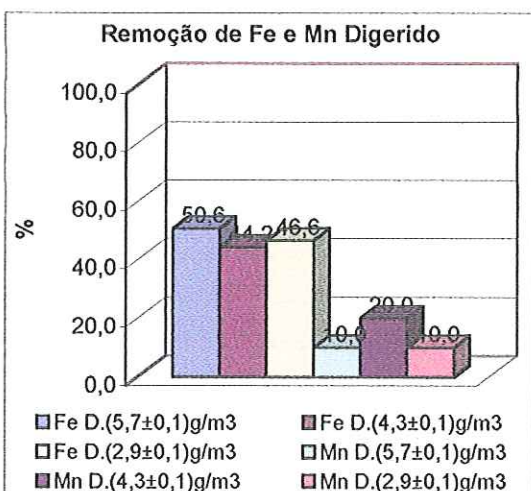


GRÁFICO 5.164 – Remoção de ferro e manganês digeridos nos ensaios de flotação 34, 35 e 36. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=39 m/h,  $T_r=10$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

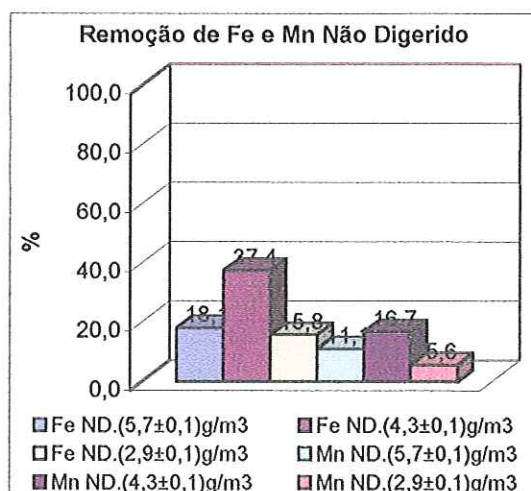


GRÁFICO 5.165 – Remoção de ferro e manganês não digeridos nos ensaios de flotação 34, 35 e 36. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=39 m/h,  $T_r=10$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

TABELA 5.33 – Características principais da água bruta de estudo para os ensaios de 28 a 36 da Fase 3c da ETAPA II.

Condições dos ensaios: Temperatura = 25 °C

ÁGUA DE ESTUDO													
ENSAIO	pH	Cor Aparente (uC)	Cor Verdadeira (uC)	Turbidez (uT)	Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Conduti vidade (µS/cm)	ST (mg/L)	SST (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Distr. de tamanho partículas (de 2 a 24 µm)	
												Média*	Desvio
28	7,3	186	45	18,4	21,0	14,8	50,3	11,3	2,4	3,4	0,2	6,04	3,62
29	7,3	186	45	18,4	21,0	14,8	50,3	11,3	2,4	3,4	0,2		
30	7,3	186	45	18,4	21,0	14,8	50,3	11,3	2,4	3,4	0,2		
31	7,7	152	36	15,3	24,0	16,8	49,5	10,4	2,1	3,5	0,2	5,62	3,39
32	7,7	152	36	15,3	24,0	16,8	49,5	10,4	2,1	3,5	0,2		
33	7,7	152	36	15,3	24,0	16,8	49,5	10,4	2,1	3,5	0,2		
34	7,6	162	39	16,4	23,0	15,8	48,8	10,6	2,3	3,3	0,2	5,37	3,33
35	7,6	162	39	16,4	23,0	15,8	48,8	10,6	2,3	3,3	0,2		
36	7,6	162	39	16,4	23,0	15,8	48,8	10,6	2,3	3,3	0,2		

\*Média ponderada

TABELA 5.34 – Características principais da água coagulada para os ensaios de 28 a 36 da Fase 3c da ETAPA II.

Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI = 2,7 mg/L, Temperatura = 25 °C

ENSAIO	pH	Cor Aparente (uC)	Potencial Zeta (mV)	Turbidez (uT)	ST (mg/L)	SST (mg/L)	Distribuição de tamanho partículas (de 2 a 24 µm)	
							Média*	Desvio
28	6,3	295	-11,0±2,9	20,0	17,3	4,6	6,34	3,85
29	6,3	295	-11,0±2,9	20,0	17,3	4,6		
30	6,3	295	-11,0±2,9	20,0	17,3	4,6		
31	6,4	243	-22,0±1,8	18,3	15,7	4,7	6,09	3,65
32	6,4	243	-22,0±1,8	18,3	15,7	4,7		
33	6,4	243	-22,0±1,8	18,3	15,7	4,7		
34	6,3	232	-13,0±2,9	19,3	15,1	4,4	6,23	3,98
35	6,3	232	-13,0±2,9	19,3	15,1	4,4		
36	6,3	232	-13,0±2,9	19,3	15,1	4,4		

TABELA 5.35 – Tabela resumo dos resultados das amostras compostas obtidas nos ensaios de flotação de 28 a 36 (Fase 3c da ETAPA II)  
 Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF = 30 mg/L, DCI = 2,7 mg/L, pH = 6,3, Pressão de saturação = 450 kPa, Temperatura = 25 °C

TAS (m/h)	Tempo De Floculação (min)	Ensaio	S <sub>FLO</sub> (g de ar/m <sup>3</sup> água)	Turbidez (uT)		Cor (uC)		SST (mg/L)		Fe total (digerido mg/L)		Mn total (digerido mg/L)		Distribuição de Tamanho partículas ( 2 a 24 µm)	
				AFL	EFL	AFL	EFL	AFL	EFL	AFL	EFL	AFL	EFL	Média*	Desvio
39	20	28	5,7±0,1	18,4	1,8	186	27	2,44	0,45	3,40	0,97	0,20	0,16	4,61	3,24
		29	4,3±0,1	18,4	2,0	186	25	2,44	0,45	3,40	0,82	0,20	0,16	4,47	3,04
		30	2,9±0,1	18,4	2,7	186	42	2,44	0,55	3,40	1,35	0,20	0,18	4,81	3,27
	15	31	5,7±0,1	15,3	3,3	152	57	2,14	0,79	3,48	1,70	0,20	0,19	4,30	2,78
		32	4,3±0,1	15,3	4,3	152	65	2,14	0,86	3,48	1,90	0,20	0,19	4,33	2,77
		33	2,9±0,1	15,3	4,8	152	81	2,14	0,94	3,48	2,40	0,20	0,20	4,47	2,83
	10	34	5,7±0,1	16,4	2,8	162	39	2,30	0,60	3,28	1,60	0,20	0,18	4,32	3,04
		35	4,3±0,1	16,4	1,9	162	29	2,30	0,40	3,28	1,80	0,20	0,16	4,35	2,94
		36	2,9±0,1	16,4	3,3	162	50	2,30	0,50	3,28	1,80	0,20	0,18	4,49	3,02

\*Média ponderada

#### 5.5.3.4. Resultados dos Ensaios da Fase 3d

A Fase 3d apresenta os resultados obtidos na série de ensaios com a instalação piloto de FAD de alta taxa, em que foi aumentado o valor da taxa de flotação para 51 m/h.

As Tabelas 5.36 e 5.37 apresentam as principais características da água de estudo e da água coagulada. Para cada ensaio, foram coletadas amostras a cada 15 minutos, amostras pontuais e a junção dessas 4 amostras pontuais são as amostras compostas. Os gráficos relacionados à cor e turbidez apresentam os resultados das amostras pontuais e os gráficos relacionados a ferro e manganês, apresentam os resultados das amostras compostas. Finalmente, A Tabela 5.38 apresenta um resumo dos resultados das amostras compostas (Gráficos 5.166 a 5.183).

Devido a limitações no sistema de alimentação da instalação piloto, não foram realizados os ensaios dessa fase com taxa de 51 m/h.

Analisando-se o tempo de floculação de 15 minutos, observa-se que os resultados com esse tempo e com taxa de 51 m/h não foram satisfatórios, para todas as quantidades de ar estudadas, pois a turbidez residual ficou em torno de 6,6 a 6,9 uT, a cor aparente residual ficou entre 81 e 95 uC, o ferro total residual esteve entre 2,7 e 2,8 mg/L e o manganês total residual manteve-se com a concentração inicial de 0,20 mg/L, ou seja, não foi removido.

Observando-se o tempo de floculação de 10 minutos, nota-se apenas ligeira melhora nos resultados mas, mesmo assim, continuam insatisfatórios para todas as quantidades de ar fornecidas, pois a turbidez residual ficou entre 6,0 e 7,6 uT, a cor aparente residual entre 67 e 89 uC, o ferro total residual entre 2,5 e 2,9 mg/L e o manganês total residual manteve-se na concentração inicial, ou seja, não foi removido.

Verifica-se que, para a taxa 51 m/h, não houve muita diferença entre os resultados obtidos quando se utilizou 10 ou 15 minutos de floculação. Apesar de não terem sido realizados ensaios com taxa de 51 m/h e 20 minutos de floculação, pode-se concluir que este valor de taxa de aplicação superficial foi excessivamente grande para esse tipo de unidades de flotação (alta taxa), acarretando arraste de flocos através do efluente da unidade. Esse arraste fica claramente caracterizado pelos elevados valores residuais de cor aparente, turbidez, SST, ferro total e manganês total, tanto nos ensaios de 10 minutos quanto nos de 15 minutos de floculação, para todos os valores de quantidade de ar fornecidos para a flotação.

Observa-se que 2,9 g de ar/m<sup>3</sup> de água foi insuficiente e que o aumento da quantidade de ar de 4,3 para 5,7 g de ar/m<sup>3</sup> de água não acarretou acréscimo significativo na eficiência do sistema, indicando que a falta de ar não foi o fator responsável pela ineficiência do processo.

Conclui-se, portanto, que a taxa de 51 m/h aliada a valores de tempo de floculação de 10 e 15 minutos não produziu eficiência satisfatória para esse tipo de reator.

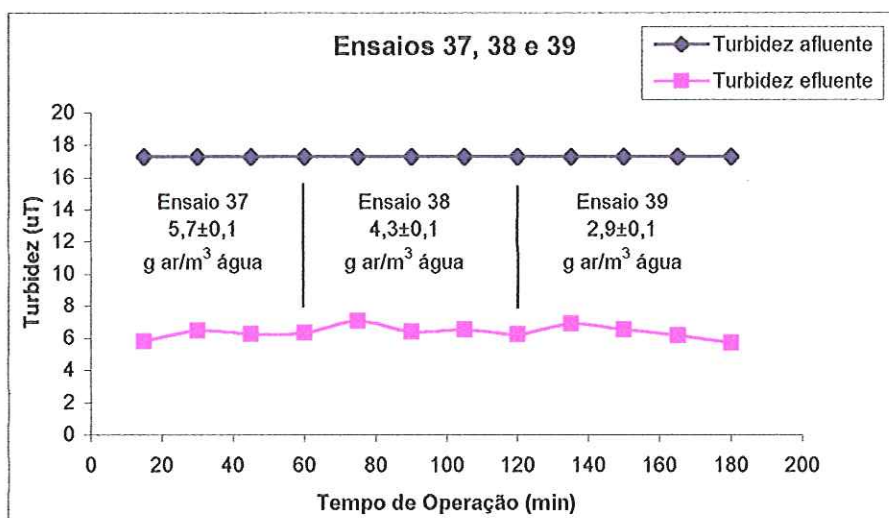


GRÁFICO 5.166 – Turbidez afluyente e efluente nos ensaios de flotação 37, 38 e 39 da Fase 3d da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $TAS=51$  m/h,  $T_r=15$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

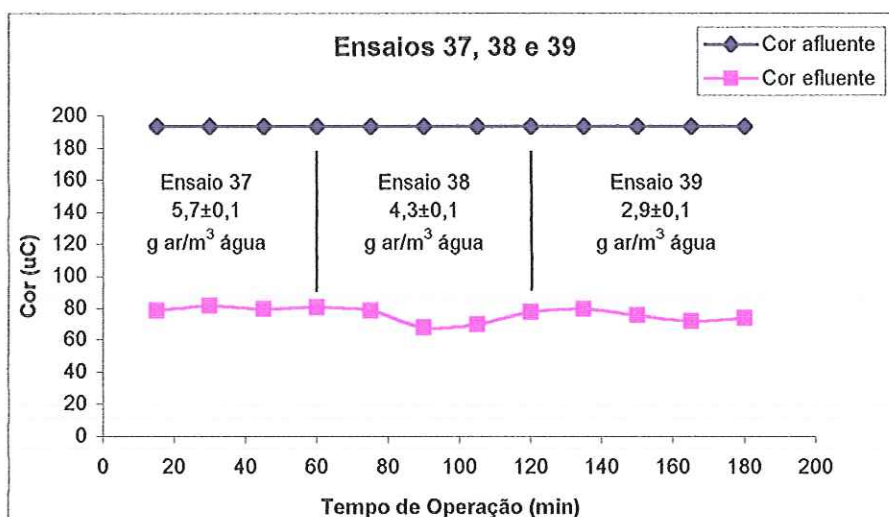


GRÁFICO 5.167 – Cor afluyente e efluente nos ensaios de flotação 37, 38 e 39 da Fase 3d da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $TAS=51$  m/h,  $T_r=15$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

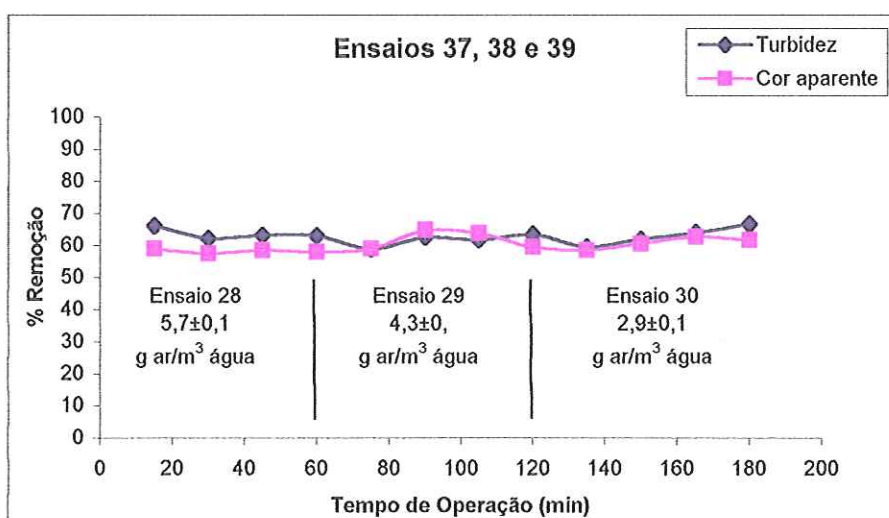


GRÁFICO 5.168 – Remoção (%) de cor e turbidez nos ensaios de flotação 37, 38 e 39 da Fase 3d da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $TAS=51$  m/h,  $T_r=15$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

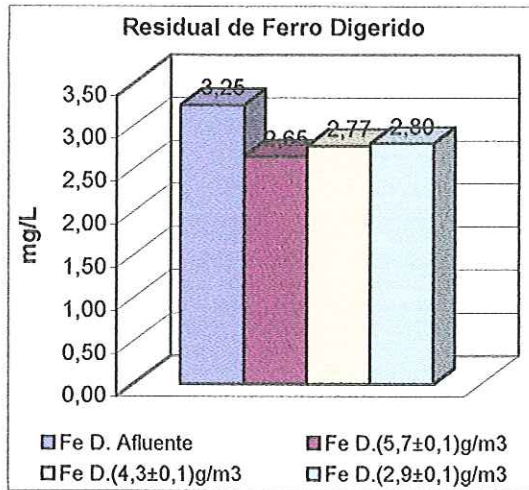


GRÁFICO 5.169 – Ferro digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 37, 38 e 39. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=51 m/h,  $T_r=15$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

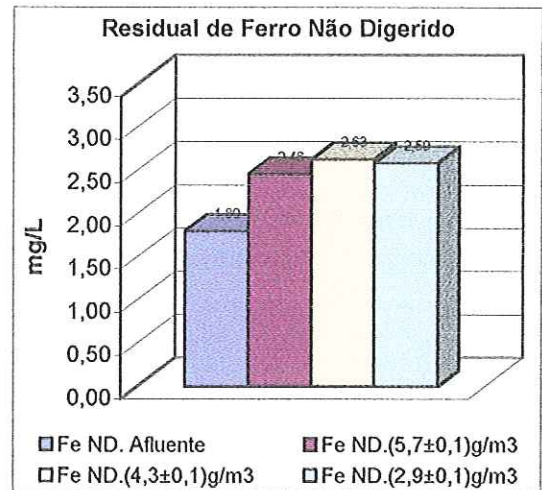


GRÁFICO 5.170 – Ferro não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 37, 38 e 39. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=51 m/h,  $T_r=15$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

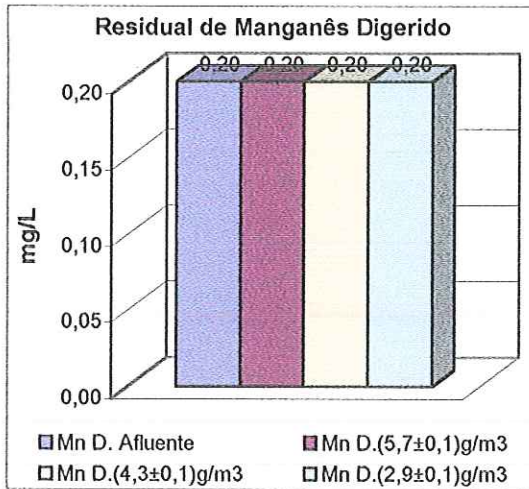


GRÁFICO 5.171 – Manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 37, 38 e 39. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=51 m/h,  $T_r=15$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

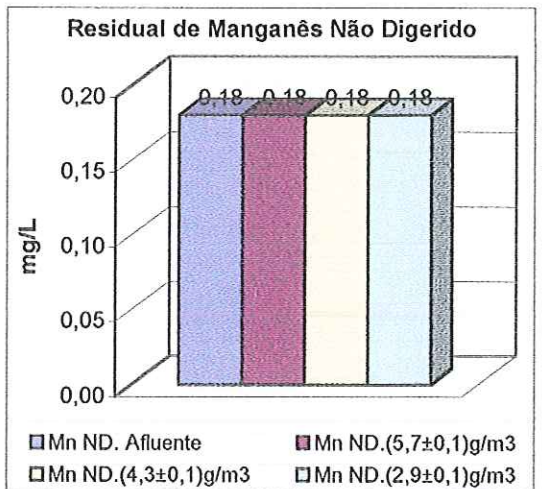


GRÁFICO 5.172 – Manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 37, 38 e 39. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=51 m/h,  $T_r=15$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

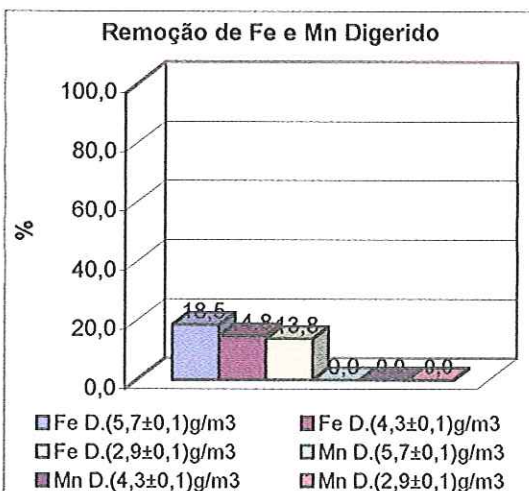


GRÁFICO 5.173 – Remoção (%) de ferro e manganês digeridos nos ensaios de flotação 37, 38 e 39. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=51 m/h,  $T_r=15$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

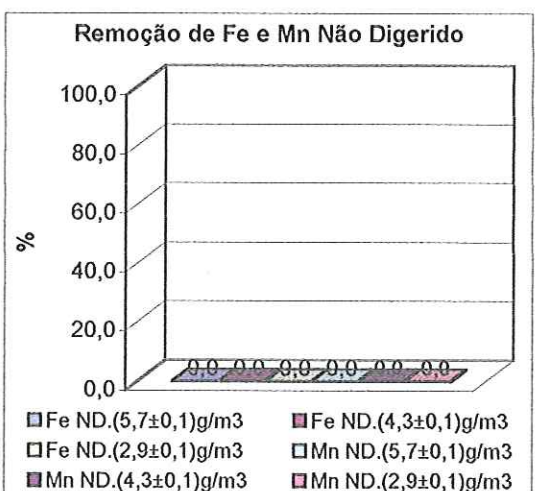


GRÁFICO 5.174 – Remoção (%) de ferro e manganês não digeridos nos ensaios de flotação 37, 38 e 39. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, IAS=51 m/h,  $T_r=15$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

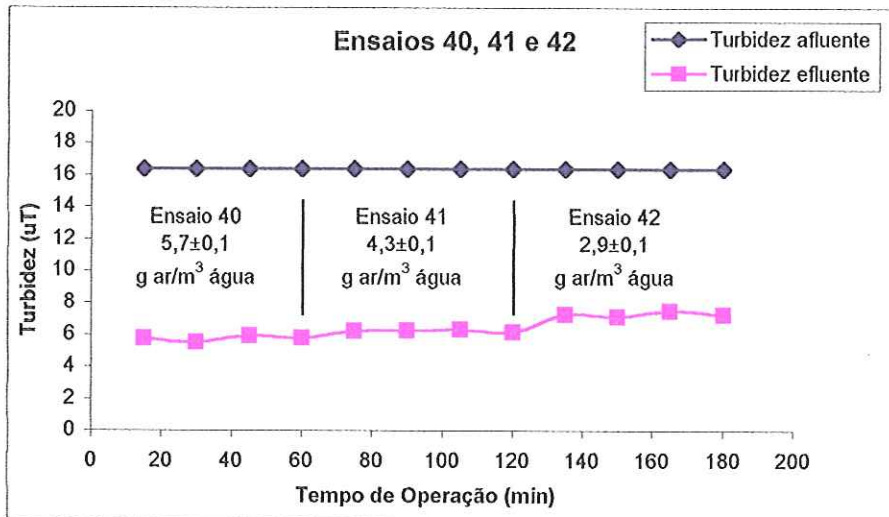


GRÁFICO 5.175 – Turbidez afluente e efluente nos ensaios de flotação 40, 41 e 42 da Fase 3d da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $TAS=51$  m/h,  $T_r=10$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

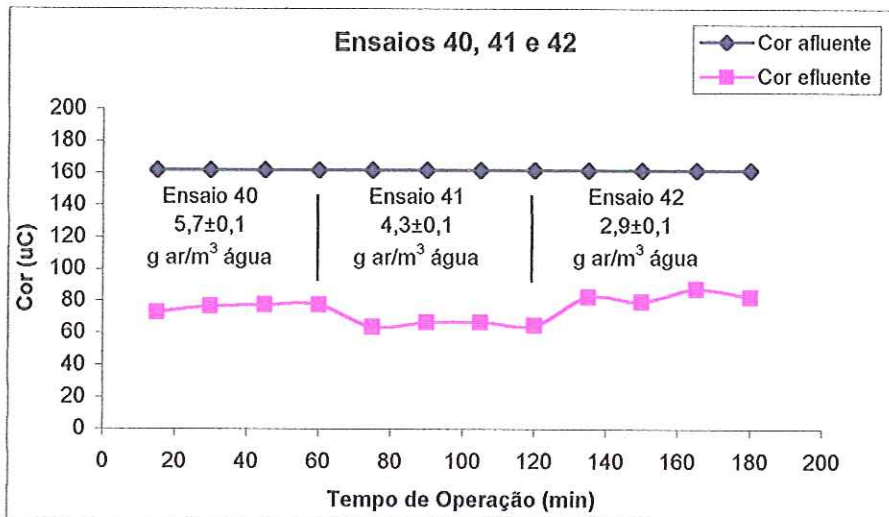


GRÁFICO 5.176 – Cor afluente e efluente nos ensaios de flotação 40, 41 e 42 da Fase 3d da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $TAS=51$  m/h,  $T_r=10$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

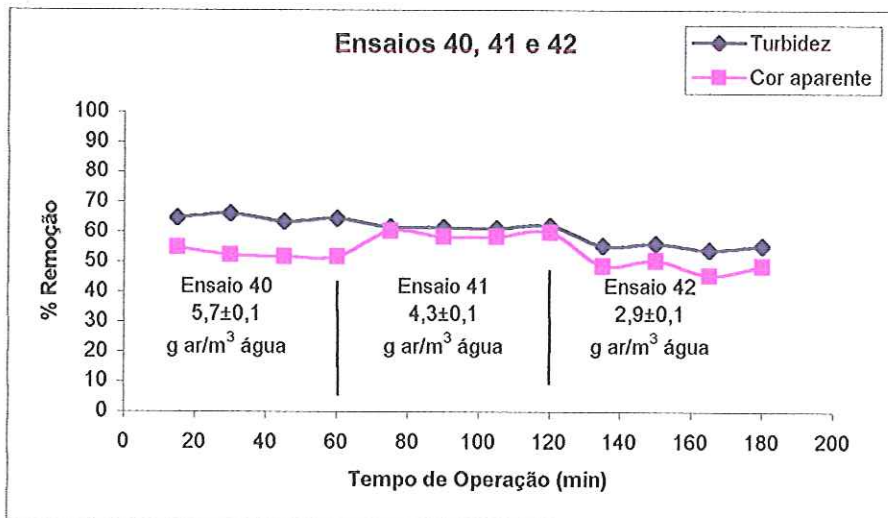


GRÁFICO 5.177 – Remoção (%) de cor e turbidez nos ensaios de flotação 40, 41 e 42 da Fase 3d da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $TAS=51$  m/h,  $T_r=10$  minutos,  $G_r=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa



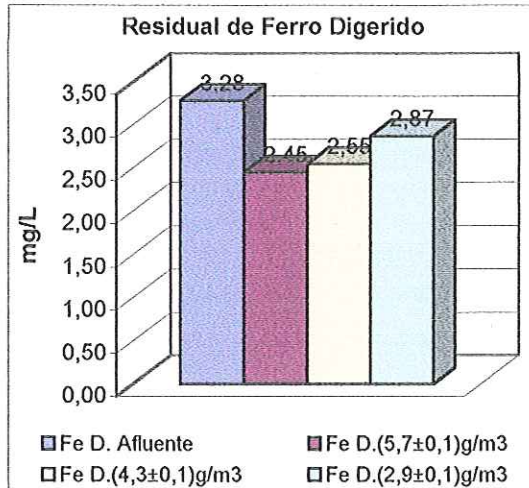


GRÁFICO 5.178 - Ferro digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 40, 41 e 42. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=51 m/h, Tr=10 minutos, Gr=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

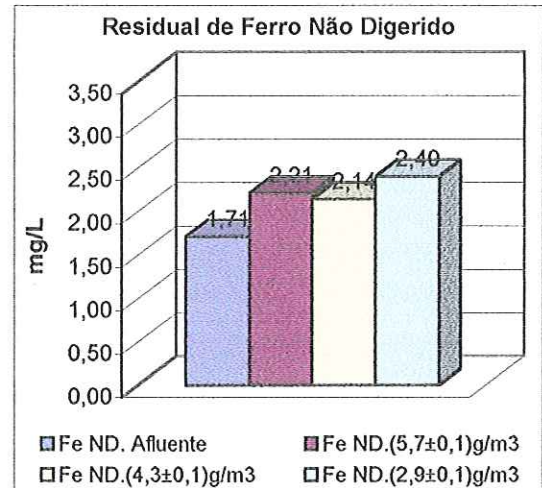


GRÁFICO 5.179 - Ferro não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 40, 41 e 42. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=51 m/h, Tr=10 minutos, Gr=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

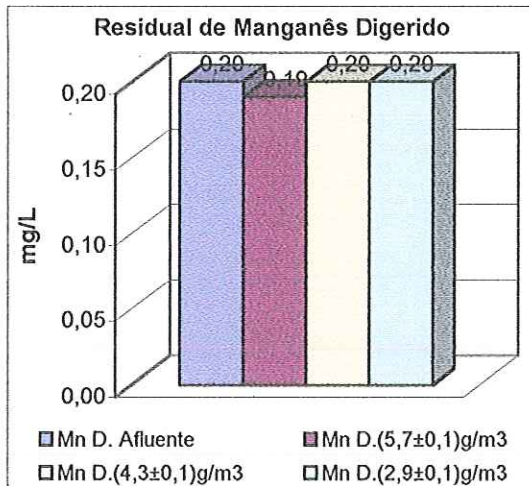


GRÁFICO 5.180 - Manganês digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 40, 41 e 42. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=51 m/h, Tr=10 minutos, Gr=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

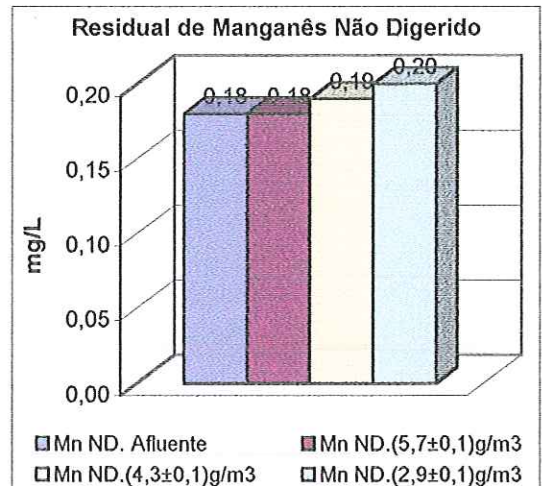


GRÁFICO 5.181 - Manganês não digerido afluente e efluente nos ensaios de flotação 40, 41 e 42. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=51 m/h, Tr=10 minutos, Gr=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

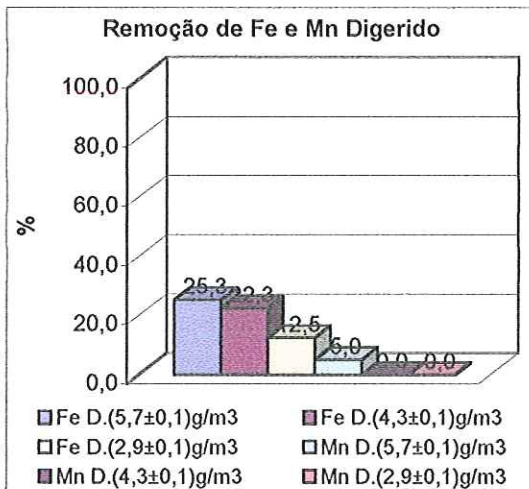


GRÁFICO 5.182 - Remoção de ferro e manganês digeridos nos ensaios de flotação 40, 41 e 42. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=39 m/h, Tr=15 minutos, Gr=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

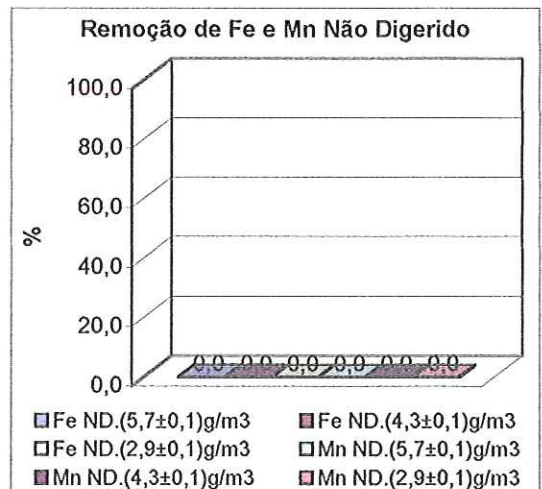


GRÁFICO 5.183 - Remoção de ferro e manganês não digeridos nos ensaios de flotação 40, 41 e 42. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=39 m/h, Tr=15 minutos, Gr=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa

TABELA 5.36 – Características principais da água bruta de estudo para os ensaios de 37 a 42 da Fase 3d da ETAPA II.  
Condições dos ensaios: Temperatura = 25 °C

ÁGUA DE ESTUDO													
ENSAIO	pH	Cor Aparente (uC)	Cor Verdadeira (uC)	Turbidez (uT)	Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Conduti vidade (μS/cm)	ST (mg/L)	SST (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Distr. de tamanho partículas (de 2 a 24 μm)	
												Média*	Desvio
37	7,5	194	47	17,3	24,0	16,8	51,5	10,9	2,8	3,3	0,2	6,07	3,64
38	7,5	194	47	17,3	24,0	16,8	51,5	10,9	2,8	3,3	0,2		
39	7,5	194	47	17,3	24,0	16,8	51,5	10,9	2,8	3,3	0,2		
40	7,6	162	39	16,4	23,0	16,8	48,8	10,6	2,3	3,3	0,2	5,37	3,33
41	7,6	162	39	16,4	23,0	16,8	48,8	10,6	2,3	3,3	0,2		
42	7,6	162	39	16,4	23,0	16,8	48,8	10,6	2,3	3,3	0,2		

\*Média ponderada

TABELA 5.37 – Características principais da água coagulada para os ensaios de 37 a 42 da Fase 3d da ETAPA II.  
Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI = 2,7 mg/L, Temperatura = 25 °C

ENSAIO	pH	Cor Aparente (uC)	Potencial Zeta (mV)	Turbidez (uT)	ST (mg/L)	SST (mg/L)	Distribuição de tamanho partículas (de 2 a 24 μm)	
							Média*	Desvio
37	6,4	271	-12,0±1,9	20,2	17,0	4,9	6,56	3,99
38	6,4	271	-12,0±1,9	20,2	17,0	4,9		
39	6,4	271	-12,0±1,9	20,2	17,0	4,9		
40	6,4	232	-13,0±2,9	19,3	15,1	4,4	6,23	3,98
41	6,4	232	-13,0±2,9	19,3	15,1	4,4		
42	6,4	232	-13,0±2,9	19,3	15,1	4,4		

TABELA 5.38 – Tabela resumo dos resultados das amostras compostas obtidas nos ensaios de flotação de 37 a 42 (Fase 3d da ETAPA II)  
 Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF = 30 mg/L, DCI = 2,7 mg/L, pH = 6,3, Pressão de saturação = 450 kPa, Temperatura = 25 °C

TAS (m/h)	Tempo De Floculação (min)	Ensaio	S <sub>FLO</sub> (g de ar/m <sup>3</sup> água)	Turbidez (uT)		Cor (uC)		SST (mg/L)		Fe total (digerido mg/L)		Mn total (digerido mg/L)		Distribuição de Tamanho partículas ( 2 a 24 µm)	
				AFL	EFL	AFL	EFL	AFL	EFL	AFL	EFL	AFL	EFL	Média*	Desvio
51	20	Ensaio não realizado devido a limitações no sistema de alimentação da instalação piloto													
	15	37	5,7±0,1	17,3	6,6	194	85	2,80	1,4	3,25	2,7	0,20	0,20	4,87	3,02
		38	4,3±0,1	17,3	6,6	194	95	2,80	1,4	3,25	2,8	0,20	0,20	4,87	3,01
		39	2,9±0,1	17,3	6,9	194	81	2,80	1,5	3,25	2,8	0,20	0,20	4,77	2,92
	10	40	5,7±0,1	16,4	6,0	162	79	2,30	1,4	3,28	2,5	0,20	0,20	4,53	3,07
		41	4,3±0,1	16,4	6,4	162	67	2,30	1,4	3,28	2,6	0,20	0,20	4,56	3,26
42		2,9±0,1	16,4	7,6	162	89	2,30	1,7	3,28	2,9	0,20	0,20	4,50	3,05	

\*Média ponderada

#### 5.5.4. Comparação dos Resultados das Fases 3a, 3b, 3c e 3d da ETAPA II de Estudo

A Tabela 5.39 apresenta os valores de quantidade de ar que forneceram os melhores resultados para taxas de aplicação superficial de 13, 26, 39 e 51 m/h e para os valores de tempo de floculação de 20, 15 e 10 minutos.

Analisando-se a Tabela 5.39 e os Gráficos 5.184 e 5.185, verifica-se que as taxas de aplicação superficial de 13 e 26 m/h apresentaram eficiências de remoção de turbidez muito semelhantes para todos os tempos de floculação estudados (residuais menores que 1,0 uT).

Para a taxa de aplicação superficial de 39 m/h, ocorreu ligeira queda na eficiência de remoção, pois os valores residuais de turbidez observados foram menores que 2,0 uT, para 10 e 20 minutos de floculação. É importante ressaltar que, mesmo com essa ligeira queda, esses valores residuais de turbidez são satisfatórios numa etapa de pré-clarificação por flotação, antecedendo à filtração.

A taxa de aplicação superficial de 51 m/h produziu resultados insatisfatórios de residuais de turbidez, de SST, de ferro e manganês, indicando que essa taxa não é recomendada para esse tipo de reator.

A análise dos Gráficos 5.186 e 5.187 mostra excelentes resultados de remoção de cor para taxas de aplicação superficial de 13 e 26 m/h, observa-se, porém que o comportamento dessas duas taxas não foi muito semelhante, como no caso da turbidez, para o tempo de floculação de 20 minutos quando a eficiência de remoção diminui de maneira quase que linear com o aumento da taxa. Para os valores de tempo de floculação de 15 e 10 minutos, as taxas de 13 e 26 m/h apresentam comportamento pouco mais semelhante com residuais de cor aparente menores ou iguais a 5 uC.

Para a taxa de aplicação superficial de 39 m/h, observa-se que houve queda na eficiência de remoção de cor aparente, pois os residuais estiveram na faixa de 27 a 29 uC para tempos de floculação de 10 e 20 minutos.

Para a taxa de 51 m/h, nota-se queda brusca na eficiência de remoção de cor aparente com residuais entre 79 e 85 uC, indicando que essa taxa foi insatisfatória para esse tipo de reator.

É interessante observar no Gráfico 5.186 que, para a remoção de cor aparente, o comportamento das taxas de 13 e 26 m/h foram muito parecidos, para todos os tempos de valores de floculação, e quando se aumentou a taxa para 39 m/h, verifica-se queda considerável na eficiência de remoção. Recomenda-se, portanto, para esse tipo de reator, estudo de taxas entre 26 e 39 m/h visando encontrar um limite mais seguro de taxa para esse tipo de reator de alta taxa.

Analisando-se agora os Gráficos 5.188 e 5.189 referentes à remoção de ferro, verifica-se comportamentos diferenciados para as taxas de aplicação superficial de 13, 26 e 39 m/h. Para as taxas de 13 e 26 m/h, essa diferença é minimizada nos tempos de floculação de 15 e 20 minutos.

Para o tempo de floculação de 20 minutos, principalmente, a eficiência de remoção diminui com o aumento da taxa de aplicação superficial. Ressalta-se que esse comportamento foi verificado também para a remoção de cor aparente o que indica existir estrita correlação entre remoção do ferro e de cor aparente, principalmente para tempo de 20 minutos de floculação, evidenciado o fato, já comentado no item 5.1, que a maior parte da concentração de ferro encontrava-se complexada com ácido húmico.

A taxa de 39 m/h provocou queda na eficiência de remoção de ferro, porém o tempo de floculação de 20 minutos apresentou residuais de ferro na concentração de 0,97 mg/L, maior remoção atingida com esta taxa. Para os tempos de floculação de 15 e 10 minutos, houve queda ainda maior na eficiência de remoção, pois os residuais de ferro obtidos foram 1,7 e 1,8 mg/L, respectivamente.

Analisando-se o Gráfico 5.189 verifica-se certa influência do tempo de floculação na eficiência de remoção de ferro total, tempos maiores aumentaram essa eficiência.

Quanto à taxa de 51 m/h, observam-se residuais de ferro nas concentrações entre 2,5 e 2,7 mg/L, valores insatisfatórios, o que indica que essa taxa foi exagerada para esse tipo de reator. No entanto, como verificado na taxa de 39 m/h, para remoção de ferro, recomenda-se estudo de maiores tempos de floculação para melhor avaliação.

Os Gráficos 5.190 e 5.191 referentes à remoção de manganês, mostram que as condições de flotabilidade dos flocos inorgânicos de dióxido de manganês não foram boas, eles exigem taxas mais baixas para sua remoção. Esse fato torna-se mais evidente ao analisarem-se os resultados de remoção de manganês na fase 2d (TAS igual a 51 m/h) em que se verificou remoção nula de manganês, em todos os ensaios, independente do tempo de floculação e da quantidade de ar fornecida. Nesses ensaios, verificou-se remoção de cor aparente e turbidez na faixa de 45 a 65%, o que demonstra maior flotabilidade dos flocos com matéria orgânica (cor) em relação aos flocos de dióxido de manganês, formados mais lentamente após oxidação química com cloro.

Ainda com relação à remoção de manganês, vê-se que para 15 minutos de floculação, as taxas 13 e 26 m/h apresentaram resultados bons, com residuais menores ou iguais 0,1 mg/L, valores dentro dos limites fixados pelos padrões de potabilidade. Nota-se que, para a taxa de 26 m/h, os tempos de floculação de 10 e 20 minutos sofreram queda na eficiência de remoção do manganês.

Verifica-se através do Gráfico 5.190, a tendência de o aumento da taxa de aplicação superficial acarretar queda na eficiência e também se nota que, para todas as taxas de aplicação superficial estudadas, o tempo de floculação parece não influenciar de maneira significativa a eficiência de remoção do manganês.

Conclui-se, portanto, que para esse tipo de reator e para essa água de estudo, foram adequadas taxas de aplicação superficial até 26 m/h, com eficientes remoções de turbidez, cor, ferro e manganês para tempos de floculação de 15 e de 20 minutos. A taxa de 39 m/h associada a 20 minutos de floculação, forneceu resultados não tão ruins de remoção de cor

aparente, turbidez, ferro e manganês, ou seja, em situações excepcionais – ainda virá a etapa de filtração subsequente à flotação – seriam aceitáveis os residuais obtidos com taxa de 39 m/h, o que demonstra grande versatilidade operacional e compacidade desse tipo de flotador de alta taxa. A taxa de 51 m/h foi insatisfatória.

Conclui-se, também, que o aumento de tempo de floculação influenciou razoavelmente na remoção de ferro, e que o tempo de 20 minutos foi o que apresentou os melhores resultados de ferro para todas as taxas estudadas.

A respeito da influência das condições de floculação e da taxa de aplicação superficial na eficiência da flotação de alta taxa, vale citar aqui o trabalho realizado por EDZWALD et al (1999). Os autores utilizaram unidades de FAD de alta taxa diferentes daquela investigada no presente trabalho, porém capaz também de operar com a mesma faixa de valores de taxa (cerca de 20 a 44 m/h). Os autores estudaram a integração da tecnologia da FAD de alta taxa com unidades com dispositivo tipo colméia, utilizado para remoção de microbolhas residuais do efluente instalado no interior da zona de clarificação por flotação.

As unidades de FAD foram instaladas em duas ETAs. A primeira, em *Newport News* - EUA, utilizou somente sulfato de alumínio com dosagem entre 45 a 50 mg/L e pH entre 6,4 a 6,7. A água bruta afluenta a esta ETA continha as seguintes características: temperatura entre 7 e 22 °C, turbidez entre 1,3 e 3,7 uT, cor entre 20 e 50 uC, COT entre 20 e 50 mg/L e pH entre 7,1 e 7,9. A segunda ETA, em *Fairfield* - EUA, utilizou sulfato de alumínio com dosagens de 10 a 17 mg/L e 1 mg/L de polímero catiônico. Foi utilizada vazão de 20 a 21 m<sup>3</sup>/h com tempo total de floculação de 7 minutos. Características da água bruta: temperatura entre 12 e 17 °C, turbidez entre 0,61 e 1,25 uT, cor entre 20 e 25 uC, COT entre 2,9 e 3,2 e pH entre 7,0 e 7,3. Dentre os objetivos dessa pesquisa, um deles foi testar o uso de baixos tempos de floculação (6 a 7 minutos) e avaliar os efeitos de altas taxas na FAD (17 a 44 m/h), além de estudar a possibilidade de microbolhas residuais serem carregadas para os filtros.

Os autores observaram que, nos dois casos, quando empregadas TAS de até 30 m/h, os resultados foram excelentes, com valores de turbidez menores que 1,0 uT. Porém, quando utilizaram TAS de 44 m/h, a eficiência não foi tão boa. Os resultados também mostraram ser viável a integração da FAD de alta taxa, por possibilitar diminuição dos tempos de floculação (5 minutos), para a água estudada, em relação aos tempos adotados em unidades convencionais (20 a 25 minutos) e por ser possível aumentar a taxa de aplicação superficial para 30 a 40 m/h, sem causar prejuízo à qualidade do efluente. Além disso, foi eficiente a introdução, no interior da zona de flotação, de dispositivo para retirada das microbolhas de ar residuais, com o objetivo de promover melhores condições para operação dos filtros.

Nota-se que a água bruta afluenta aos reatores do estudo realizado por EDZWALD et al (1999), apresentou características de turbidez entre 1,3 e 3,7 uT e de cor entre 20 e 50 uC no primeiro caso e, no segundo caso, turbidez entre 0,61 e 1,25 uT e cor entre 20 e 25 uC. Os autores concluíram que, com tempos de floculação de 6 a 7 minutos e taxa de até 30 m/h, os valores de turbidez obtidos foram inferiores a 1,0 uT.

Neste trabalho, a água bruta apresentou características bem diferentes daquelas da água do estudo citado, turbidez entre 15 e 18 uT, cor entre 152 e 194, ferro total com concentrações entre 3,30 e 3,50 mg/L e manganês total com concentração de 0,20 mg/L. Com uma análise global, verificou-se que taxas de até 26 m/h foram eficientes para 15 e 20 minutos de floculação, produzindo turbidez residual menor 1,0 uT e cor menor ou igual a 5 uC. Nota-se que a concentração de ferro total apresentou-se dentro dos limites fixados pelos padrões de potabilidade antes da filtração, somente quando foram empregados 20 minutos de floculação e taxa de 13 m/h. No entanto, vale salientar que para as taxas maiores, até 26 m/h, as concentrações residuais de ferro ficaram próximas ao limite preconizado pelos padrões de potabilidade, permitindo inferir que, após filtração obter-se-iam valores abaixo dos referidos padrões, conforme será visto mais adiante durante a discussão dos ensaios completos, envolvendo também a filtração.

No que se refere à presença de trihalometanos (THM) no efluente da unidade de flotação, devido à pré-oxidação química com cloro, foram observadas concentrações ligeiramente crescentes à medida que se aumentou a taxa de flotação. Para taxa de 13 m/h a concentração residual de THM foi de 4,7 µg/L, para taxa de 26 m/h, obteve-se residual de THM de 4,9 µg/L e para taxa de 39 m/h o residual de THM foi de 6,3 µg/L. De qualquer forma, todas essas concentrações encontram-se abaixo do valor máximo permitido pelos padrões de potabilidade atuais.

A análise dos Gráficos 5.192 e 5.193 referentes ao diâmetro médio das partículas em função da taxa de aplicação superficial e em função do tempo de floculação, respectivamente, mostra que, conforme se aumentou a taxa de aplicação superficial (até 39 m/h), o diâmetro das partículas, após clarificação por flotação, apresentou-se com valores muito próximos, entre 4,30 e 4,65 µm, para 10 e 15 minutos de floculação. Observa-se que, para o tempo de floculação de 20 minutos, os valores de diâmetro médio de partículas foram diferentes para cada taxa estudada (4,05 µm para 13 m/h, 4,38 µm para 26 m/h e 4,61 µm para 39 m/h). Nota-se que, à medida que se aumentou a taxa, cresceu o valor do diâmetro médio das partículas, indicando que, para 20 minutos de floculação, taxas maiores acarretaram presença de partículas maiores no efluente do flotador.

Somente seriam possíveis discussões mais conclusivas a respeito da influência da distribuição de tamanhos de partículas na eficiência da flotação em reatores do tipo estudado, se tivesse sido monitorada a distribuição de tamanho de partículas no afluente do flotador (água floculada). Isso não foi realizado, no presente trabalho, tendo em vista o método de contagem tipo *Hiac/Royco*, modelo 3000A acoplado a "*Liquid Syringe Sampler*", da marca *Hiac/Royco*, modelo 8000A, que impede a contagem de partículas em suspensões com material floculado, podendo ocasionar ou quebra dos flocos ou entupimento da seringa na qual se insere a amostra. Recomenda-se, portanto, a realização de estudos futuros, com vistas à caracterização fotográfica (análise de imagens) da distribuição de tamanho dos flocos no afluente do flotador.

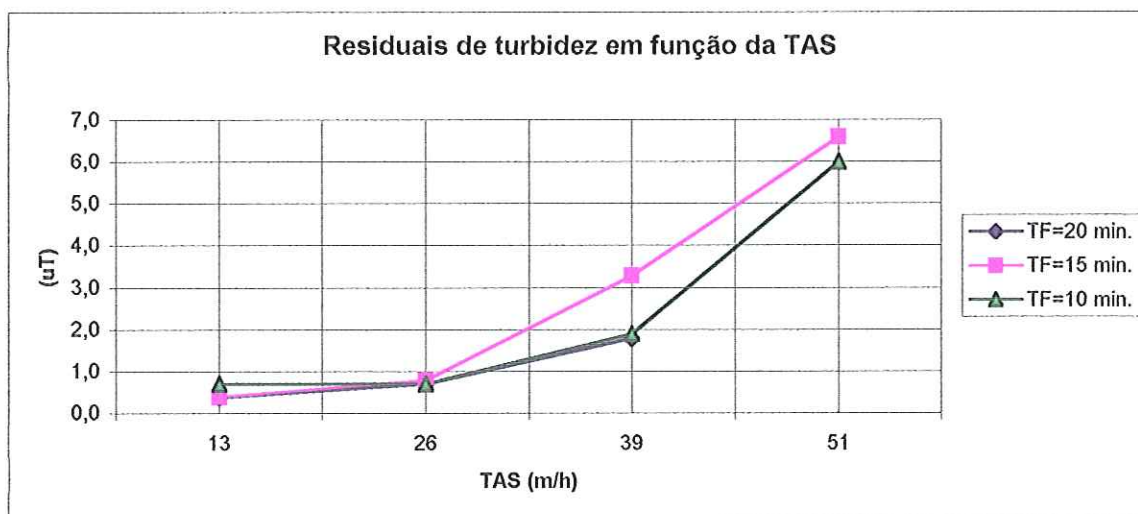


GRÁFICO 5.184 – Residuais de turbidez em função da TAS.

Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $G_I=60/60/60 \text{ s}^{-1}$ , pressão de saturação=450 kPa

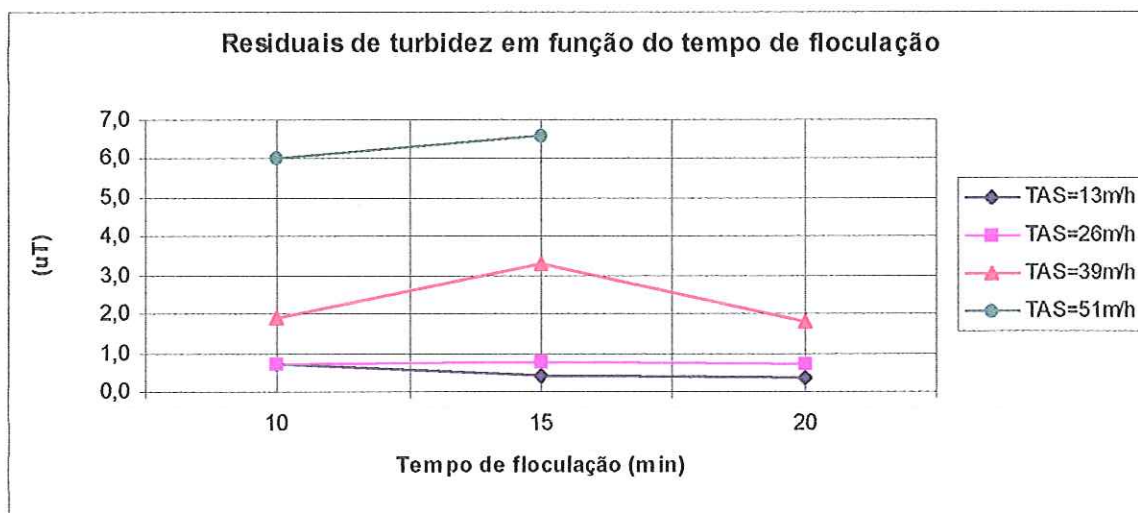


GRÁFICO 5.185 – Residuais de turbidez em função do tempo de floculação.

Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $G_I=60/60/60 \text{ s}^{-1}$ , pressão de saturação=450 kPa

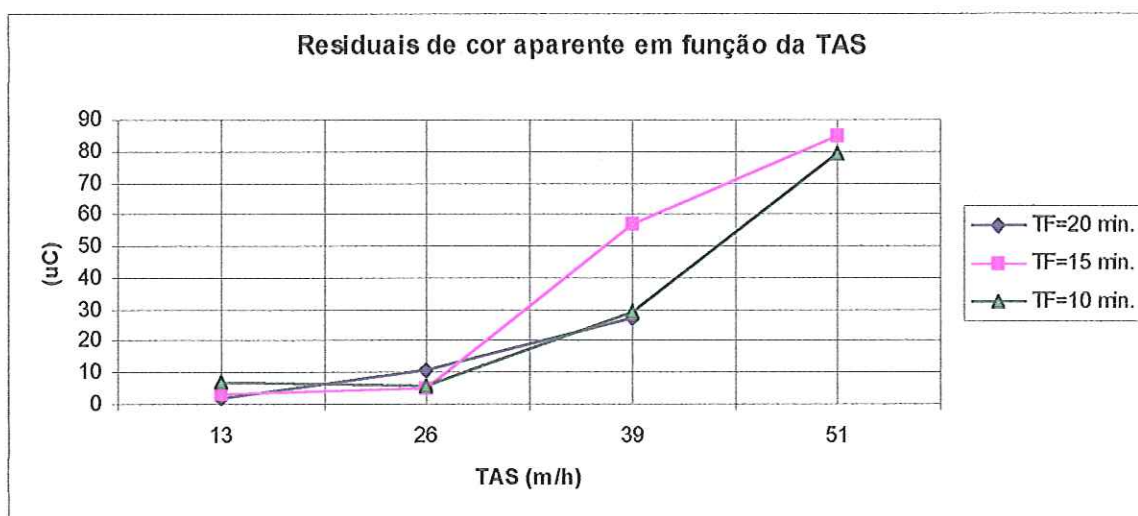


GRÁFICO 5.186 – Residuais de cor aparente em função da TAS.

Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $G_I=60/60/60 \text{ s}^{-1}$ , pressão de saturação=450 kPa



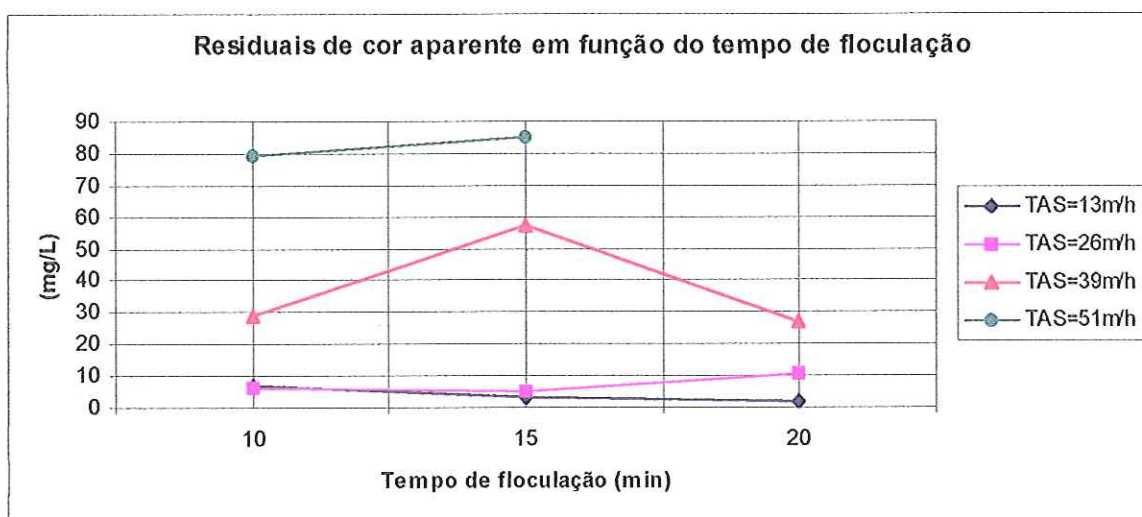


GRÁFICO 5.187 – Residuais de cor aparente em função do tempo de floculação.  
Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $G_i=60/60/60 \text{ s}^{-1}$ , pressão de saturação=450 kPa

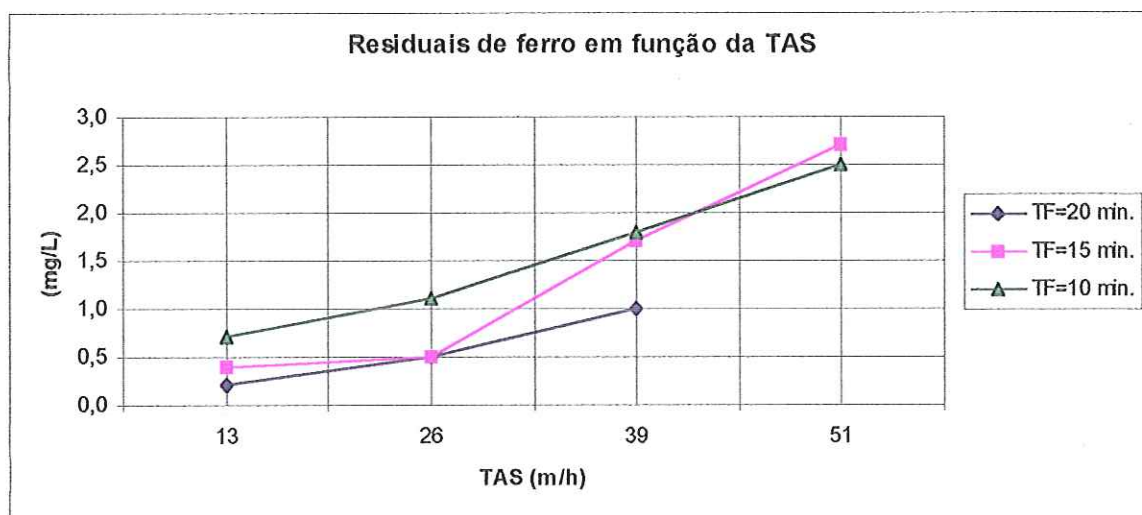


GRÁFICO 5.188 – Residuais de ferro em função da TAS.  
Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $G_i=60/60/60 \text{ s}^{-1}$ , pressão de saturação=450 kPa

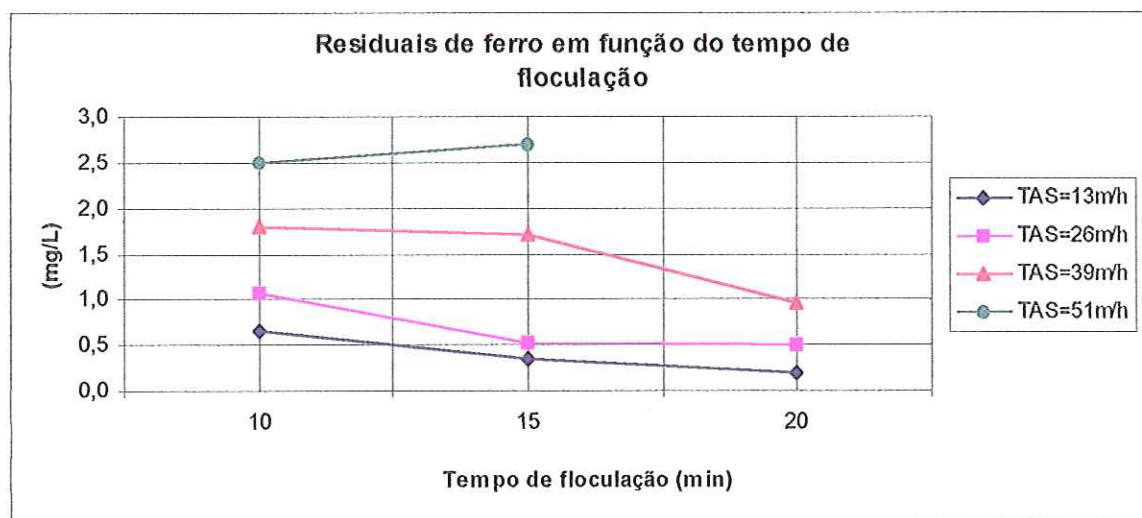


GRÁFICO 5.189 – Residuais de ferro em função do tempo de floculação.  
Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $G_i=60/60/60 \text{ s}^{-1}$ , pressão de saturação=450 kPa

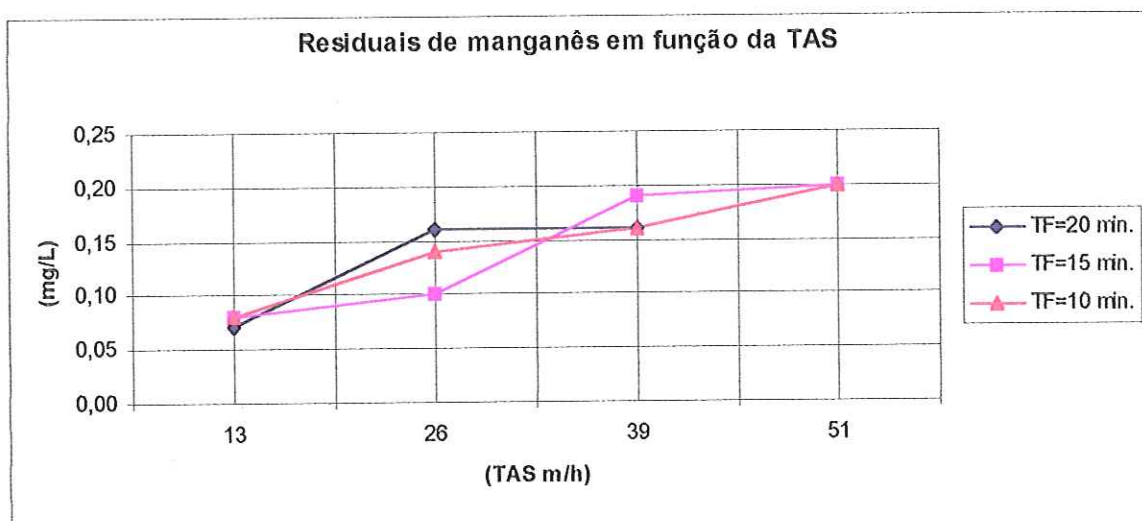


GRÁFICO 5.190 – Residuais de manganês total em função da TAS.

Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $G_i=60/60/60 \text{ s}^{-1}$ , pressão de saturação=450 kPa

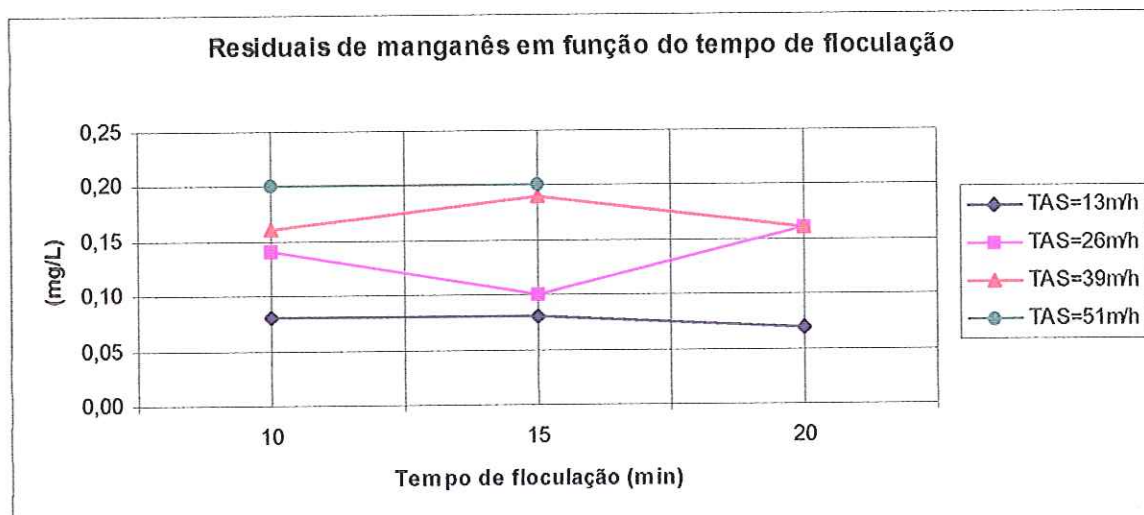


GRÁFICO 5.191 – Residuais de manganês total em função do tempo de floculação.

Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $G_i=60/60/60 \text{ s}^{-1}$ , pressão de saturação=450 kPa

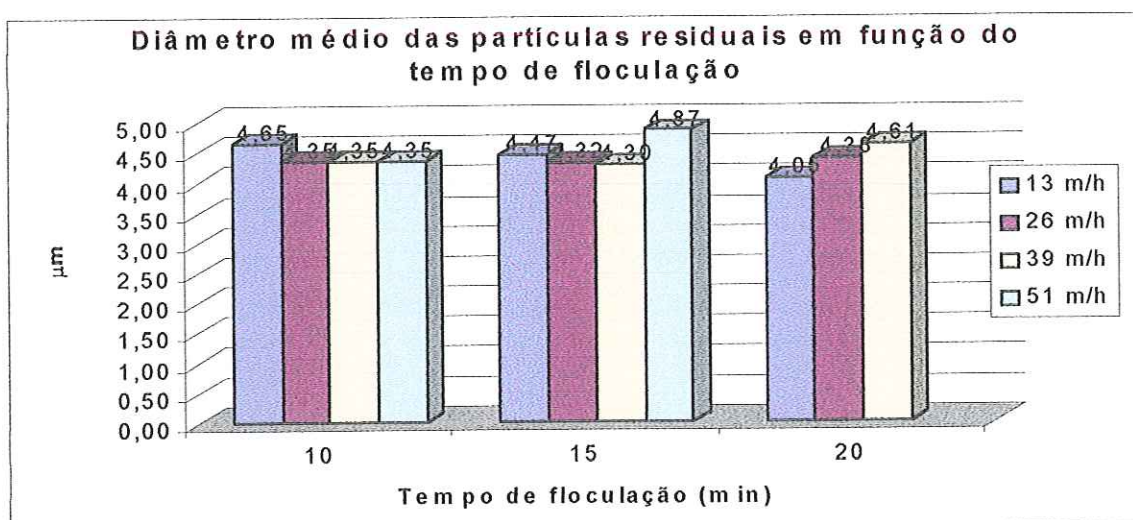


GRÁFICO 5.192 – Diâmetro médio das partículas residuais após flotação em função do tempo de floculação. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $G_i=60/60/60 \text{ s}^{-1}$ , pressão de saturação=450 kPa

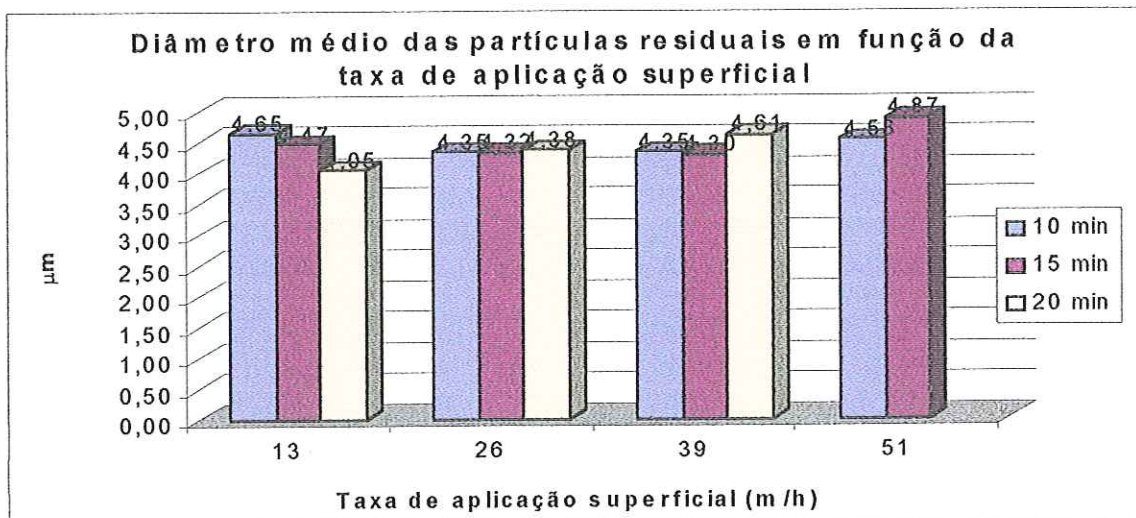


GRÁFICO 5.193 – Diâmetro médio das partículas residuais após flotação em função da taxa de aplicação superficial. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $G_f=60/60/60 \text{ s}^{-1}$ , pressão de saturação=450 kPa

TABELA 5.39 – Resumo das condições de ensaios na instalação piloto de flotação de alta taxa que forneceram os melhores resultados referentes a cada tempo de floculação e TAS investigados (Fases 3a, 3b, 3c e 3d).

Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF = 30 mg/L, DCI = 2,7 mg/L, pH = 6,3, Pressão de saturação = 450 kPa, Temperatura = 25 °C

T <sub>F</sub> (min)	Taxa de aplicação superficial (m/h)	Ensaio	S <sub>FLO</sub> (g de ar/m <sup>3</sup> água)	Turbidez (uT)		Cor (uC)		SST (mg/L)		Fe total (digerido mg/L)		Mn total (digerido mg/L)		Distribuição tamanho partículas (de 2 a 24 µm)		THM µg/L
				AFL	EFL	AFL	EFL	AFL	EFL	AFL	EFL	AFL	EFL	Média*	Desvio	
20	13	10	5,7±0,1	18,4	0,38	186	< 2	2,44	<0,01	3,40	0,20	0,20	0,07	4,05	3,37	4,7
	26	20	4,3±0,1	18,4	0,70	186	11	2,44	0,20	3,40	0,50	0,20	0,16	4,38	3,73	4,9
	39	28	5,7±0,1	18,4	1,80	186	27	2,44	0,45	3,35	0,97	0,20	0,16	4,61	3,24	6,3
15	13	13	5,7±0,1	17,3	0,40	194	3	2,80	0,05	3,30	0,35	0,20	0,08	4,47	2,96	-
	26	22	5,7±0,1	15,3	0,79	152	5	2,14	0,10	3,50	0,52	0,20	0,10	4,32	3,26	-
	39	31	5,7±0,1	15,3	3,30	152	57	2,14	0,79	3,48	1,70	0,20	0,19	4,30	2,78	-
	51	37	5,7±0,1	17,3	6,60	194	85	2,80	1,40	3,25	2,70	0,20	0,20	4,87	3,02	-
10	13	16	4,3±0,1	17,3	0,70	194	7	2,80	0,15	3,30	0,65	0,20	0,08	4,65	3,73	-
	26	25	5,7±0,1	17,3	0,70	194	6	2,80	0,20	3,25	1,08	0,20	0,14	4,35	3,38	-
	39	35	4,3±0,1	16,4	1,90	162	29	2,30	0,40	3,28	1,80	0,20	0,16	4,35	2,94	-
	51	40	5,7±0,1	16,4	6,0	162	79	2,30	1,40	3,28	2,50	0,20	0,20	4,35	3,07	-

\*Média ponderada

### 5.5.5. Estudo da Dosagem de Coagulante e Oxidante (Fase 4 da ETAPA II)

Na seqüência, são apresentados os resultados obtidos na Fase 4 que consistiu na verificação da eficiência da FAD sem oxidação química (sem uso do hipoclorito de sódio) e na análise da eficiência da FAD com redução da dosagem de coagulante (25 e 20 mg/L).

Para realização dos ensaios da Fase 4, mantiveram-se fixas as seguintes condições: aplicação do oxidante no momento da mistura rápida (procedimento Tipo 1), dosagem de oxidante (DCl=2,7 mg/L), pH de coagulação (6,3), gradiente médio de velocidade na floculação ( $G_F=60/60/60 \text{ s}^{-1}$ ), tempo de floculação ( $T_F=20 \text{ min}$ ) e a quantidade de ar fornecida para a flotação ( $S_{FLO}=5,7 \text{ g de ar/m}^3 \text{ de água}$ ). Variaram-se a dosagem de coagulante (DCF), a aplicação do oxidante e a taxa de aplicação superficial (TAS). Nesta fase, foram estudados três valores de dosagem de coagulante (30, 25 e 20 mg/L) e, para cada um deles, estudou-se a influência da aplicação de oxidante. Para esses ensaios fixou-se TAS igual a 13 m/h. Todas as amostras coletadas após clarificação por flotação, foram submetidas a filtração em papel de filtro (Whatman 40).

As Tabelas 5.40 e 5.41 apresentam as características principais da água de estudo e da água coagulada. A Tabela 5.42 mostra um resumo dos resultados das amostras compostas. Para cada ensaio, foram coletadas amostras a cada 15 minutos, designadas amostras pontuais sendo que a junção dessas quatro amostras pontuais deu origem às amostras compostas. Os gráficos relacionados à cor e turbidez apresentam os resultados das amostras pontuais e os gráficos relacionados a ferro e manganês, apresentam os resultados das amostras compostas (Gráficos 5.194 a 5.211).

Conforme já comentado no Capítulo 4 (Materiais e Métodos), a água bruta foi alterada de forma a apresentar 1,3 mg/L de ferro detectável antes da digestão química e 3,4 mg/L de ferro total, após digestão química em meio ácido. Essa mesma água apresentou 0,18 mg/L de manganês detectável sem digestão química e 0,20 mg/L detectável após a digestão química em meio ácido. Verifica-se que, no caso do ferro, as amostras antes e após digestão química apresentaram resultados significativamente diferentes, o que indica que parte significativa da concentração de ferro esteve complexada com ácido húmico, o que não foi verificado de forma predominante no caso do manganês, diferente somente em 10% entre os valores de manganês detectáveis sem e com digestão química. Esses dados mostram que o íon  $\text{Fe}^{+3}$  apresentou maior facilidade ou maior tendência para complexação com ácido húmico, presente na água de estudo, que o íon  $\text{Mn}^{+2}$ . Essa constatação confirma a opinião de O'CONNOR (1971). O autor comenta que, freqüentemente, quando são encontradas dificuldades na oxidação, são citados complexos orgânicos de ferro e manganês. O ferro complexado com matéria orgânica na forma  $\text{Fe}^{+3}$  é mais estável que o íon ferroso  $\text{Fe}^{+2}$  (também complexado) que, por sua vez, tem estabilidade muito maior que o manganês  $\text{Mn}^{+2}$  complexado. No caso do manganês, a ligação entre  $\text{Mn}^{+4}$  e  $\text{OH}^-$  é mais forte que a ligação entre  $\text{Fe}^{+3}$  e  $\text{OH}^-$ . Por isso, em águas naturais é rara a formação de complexos orgânicos ou inorgânicos com  $\text{Mn}^{+4}$ . Da Química, sabe-se que os

hidróxidos formados com  $\text{Fe}^{+2}$  são mais solúveis ( $K_{ps}$  da ordem de  $10^{-16}$ ) que os hidróxidos formados com  $\text{Fe}^{+3}$  ( $K_{ps}$  da ordem de  $10^{-38}$ ). Portanto,  $\text{Fe}^{+3}$  são mais fáceis de serem removidos.

A análise dos resultados mostrados na Tabela 5.42 mostra que, com uso de dosagem de coagulante de 30 mg/L sem aplicação do oxidante, os resultados após etapa de flotação foram excelentes: turbidez residual de 0,82 uT (95,4% de remoção), cor aparente residual de 8 uC (95,8% de remoção), ferro total residual de 0,25 mg/L (92,6% de remoção) e manganês total residual de 0,12 mg/L (40,0% de remoção).

KNOCHE et al (1991) comentam que até 1975, para promover oxidação dos íons metálicos, o controle do ferro e manganês envolvia aplicação do cloro isolado ou combinado com permanganato de potássio em valores de pH alcalinos. Foram reportadas dosagens de cloro livre de 5 mg/L. Na última década, muitas dessas práticas têm sido reestruturadas em virtude da ênfase na remoção de orgânicos e do controle dos subprodutos da cloração. Mais recentemente, a aplicação de oxidantes alternativos de altos custos em relação ao cloro, tem forçado muitos projetistas a reduzirem a dosagem dos oxidantes. Em água contendo matéria orgânica, a competição entre ela e as formas reduzidas dos metais, tem resultado em ineficientes oxidações do ferro  $\text{Fe}^{+2}$  e manganês  $\text{Mn}^{+2}$ . Em virtude disso, durante o tratamento, os valores de pH utilizados têm sido reduzidos para a faixa de 5,5 a 6,5 com o objetivo de maximizar a remoção dos compostos orgânicos. Com isso, a aplicação dos oxidantes é realizada em valores de pH abaixo dos recomendados, tendo em vista apenas a cinética de oxidação dos íons ferro e manganês.

No presente trabalho, o pH utilizado foi de 6,3, com vistas a maximizar a remoção dos orgânicos. No ensaio com dosagem de cloreto férrico de 30 mg/L sem aplicação de oxidante, obteve-se concentração de ferro total de 0,25 mg/L, ou seja, 92,6% de remoção após clarificação por flotação, evidenciando o fato que o ferro foi removido de maneira eficiente, em baixos valores de pH.

Essas amostras, filtradas em papel de filtro Whatman 40 (abertura média de poros igual a 8  $\mu\text{m}$ ), mostraram haver ligeiro aumento na eficiência de remoção, pois a turbidez residual foi 0,70 uT (96,1% de remoção), a cor aparente residual foi 6 uC (96,8% de remoção) e o ferro total residual foi 0,16 mg/L (95,3% de remoção). Porém, o ferro detectável sem digestão química antes da filtração era de 0,14 mg/L, após filtração apresentou-se com concentração de 0,10 mg/L (50,0% de remoção).

Com aplicação do oxidante (cloro), a turbidez residual foi 0,40 uT (97,8% de remoção), a cor aparente residual foi menor que 2 uC (98,9% de remoção), o ferro total residual foi 0,20 mg/L (94,1% de remoção) e o manganês total residual foi 0,14 mg/L (0,08% de remoção), com mínimo aumento de eficiência do processo, principalmente para concentração de ferro. Nota-se aqui e através do Gráfico 5.193, que não houve significativo aumento na eficiência da remoção de ferro com aplicação de cloro. Isto indica que o ferro foi preponderantemente removido por coagulação/floculação/flotação. Com relação ao manganês observa-se, através dos dados da

Tabela 5.42, que as concentrações residuais foram menores com aplicação de cloro, pois anteriormente o manganês apresentava-se com concentração de 0,12 mg/L e, após aplicação do oxidante, o manganês residual apresentou-se com concentração de 0,08 mg/L, indicando ter havido remoção por oxidação (ver Tabela 5.42 e Gráfico 5.194).

Após filtração em papel de filtro Whatman 40, a turbidez residual foi 0,27 uT (98,5% de remoção), a cor aparente residual foi menor que 2 uC (98,9% de remoção), o ferro total residual apresentou-se com concentração de 0,17 mg/L (muito próxima da concentração de 0,20 mg/L obtida antes da filtração), o ferro detectável sem a digestão química apresentou-se com concentração de 0,11 mg/L (muito próxima da concentração de 0,14 mg/L obtida antes da filtração), o manganês total residual foi 0,07 mg/L, também com concentração muito próxima à obtida antes filtração, que foi 0,08 mg/L.

Neste caso, nota-se que o ligeiro aumento causado na eficiência do sistema foi menor ainda que o obtido no caso anterior (sem aplicação de oxidante). Observa-se, portanto, alta eficiência do processo de coagulação/floculação/flotação na remoção de precipitados.

Avaliando-se agora os resultados obtidos com a redução da dosagem de coagulante para 25 mg/L, sem aplicação do oxidante, nota-se queda na eficiência do processo quando comparada à eficiência obtida com 30 mg/L, pois a turbidez residual foi 1,04 uT (94,2% de remoção), a cor aparente residual foi 12 uC (93,7% de remoção), o ferro total residual apresentou-se com concentração de 0,33 mg/L (90,2 % de remoção), o ferro detectável sem a digestão química apresentou-se com concentração de 0,15 mg/L e o manganês total residual apresentou-se com concentração de 0,14 mg/L (30,0% de remoção).

Nestas mesmas condições (25 mg/L de coagulante e sem aplicação de oxidante), após filtração em papel de filtro Whatman 40, a turbidez residual foi de 0,66 uT (96,3% de remoção), a cor aparente residual foi de 7 uC (96,3% de remoção), o ferro total residual foi de 0,20 mg/L, o ferro detectável sem digestão química foi de 0,15 mg/L e o manganês total residual foi de 0,10 mg/L. Neste caso, houve queda na eficiência da flotação devido à redução da dosagem de oxidante mas, após a filtração, os resultados foram muito bons e bastante próximos àqueles obtidos nos ensaios com dosagem de 30 mg/L de cloreto férrico (ver Tabela 5.42 e Gráficos 5.193 e 5.194).

Analisando-se o mesmo ensaio com aplicação de oxidante, nota-se que a turbidez residual obtida foi 0,69 uT (96,2% de remoção) a cor aparente residual foi 5 uC (97,4% de remoção), o ferro total residual foi 0,32 mg/L (90,5% de remoção), ferro detectável sem digestão química foi 0,23 mg/L e o manganês total residual obtido foi 0,11 mg/L (45,0% de remoção). Nota-se que a aplicação de oxidante influenciou de maneira significativa na remoção de manganês e não do ferro, confirmando que o ferro foi removido preponderantemente por coagulação, floculação e flotação.

Os resultados obtidos após a filtração, mostrados na Tabela 5.42, mostram aumento na eficiência de remoção, pois a turbidez residual obtida foi de 0,50 uT (97,2% de remoção), a cor aparente residual foi de 3 uC (98,4% de remoção), o ferro total residual foi para 0,20 mg/L

(94,1% de remoção), o ferro detectável sem digestão química foi de 0,15 mg/L e o manganês total residual foi de 0,09 mg/L.

Reduzindo-se ainda mais a dosagem de coagulante, agora para 20 mg/L, observa-se queda na eficiência do sistema quando comparada à eficiência obtida com 25 mg/L, pois a turbidez residual foi de 0,99 uT (94,5% de remoção), a cor aparente residual de 14 uC (92,6% de remoção), o ferro total residual de 0,41 mg/L (87,9% de remoção), o ferro detectável sem digestão química foi de 0,24 mg/L e o manganês total residual foi de 0,14 mg/L (30,0% de remoção). Nota-se que houve queda na eficiência da flotação, mas não tão significativa quanto o esperado com redução de 33% na dosagem de coagulante, (de 30 para 20 mg/L).

Sem aplicação do oxidante, é interessante notar que, nesse valor de pH (em torno de 6,3), embora a remoção de ferro não tenha sido significativamente influenciada pela dosagem de cloro, a remoção de cor aparente, por sua vez, apresentou ligeiro aumento em todas as três dosagens de coagulante investigadas. De forma especulativa, é possível imaginar que, talvez a adição de cloro tenha ocasionado mudanças na estrutura das moléculas de substâncias húmicas de tal forma que, após a coagulação/floculação das mesmas, tenha havido formação de flocos com características de superfície ou de tamanhos mais favoráveis ao processo de flotação (maior grau de hidrofobicidade e/ou distribuição de tamanhos mais adequados à cinética da flotação).

Após filtração em papel de filtro Whatman 40, a turbidez residual foi de 0,81 uT (95,5% de remoção), a cor aparente residual foi de 8 uC (95,8% de remoção), o ferro total residual foi de 0,22 mg/L (93,5% de remoção), o ferro detectável sem digestão química foi de 0,31 mg/L e o manganês total residual foi de 0,12 mg/L, concentração muito próxima à obtida antes da filtração (0,14 mg/L).

Verificando-se a aplicação do oxidante nesse ensaio, nota-se que não houve aumento significativo de eficiência de remoção, muito provavelmente devido à alta redução da dosagem de coagulante, fazendo com que a unidade piloto de flotação por ar dissolvido não operasse nas condições mais favoráveis. Para esse caso, a turbidez residual foi de 0,81 uT (95,5% de remoção), a cor aparente residual foi de 7 uC (96,3% de remoção), o ferro total residual foi de 0,51 mg/L (84,9% de remoção), o ferro detectável sem digestão química foi de 0,21 mg/L e o manganês total residual foi de 0,12 mg/L (40,0% de remoção).

Analisando-se esse ensaio após filtração em papel de filtro Whatman 40, nota-se que houve ligeira melhora na eficiência de remoção, inferior porém, à obtida nos ensaios anteriores, pois a turbidez residual foi de 0,67 uT (96,3% de remoção), a cor aparente residual foi de 3 uC (98,4% de remoção), o ferro total residual foi obtido na concentração de 0,37 mg/L (89,1% de remoção), o ferro detectável sem digestão química foi obtido na concentração de 0,15 mg/L e o manganês total residual foi de 0,10 mg/L (50,0% de remoção).

De maneira geral, com base em todos os resultados obtidos, verifica-se que as amostras de ferro total detectadas após digestão química sempre foram diferentes das amostras de ferro detectáveis sem digestão química, o que indica que o ferro esteve com



parcelas significativas de sua concentração, complexadas com a matéria orgânica e, que foi preponderantemente removido por coagulação/floculação/flotação.

No caso do manganês, em todos os ensaios, se comparados os resultados das amostras antes e após digestão química em meio ácido, as concentrações encontraram-se muito semelhantes, o que indica que o manganês não esteve com parcelas significativas de sua concentração complexadas ao ácido húmico, sofreu influência do oxidante, e foi parcialmente removido também por oxidação, mesmo em baixos valores de pH.

Dentre as dosagens de coagulante estudadas, a que forneceu os melhores resultados com e sem aplicação do oxidante e também após a filtração, foi a de 30 mg/L, confirmando que, para esse tipo de água, essa é a dosagem mais adequada para clarificação.

Mesmo quando a flotação operou em condições mais adequadas, a remoção do manganês limitou-se entre 40 a 60% após flotação e entre 60 e 65% após filtração, o que indica remoção não totalmente eficiente. Essa falha, muito provavelmente, pode ser atribuída a valores de pH inadequados ao processo de oxidação.

No caso da oxidação, a falha poderia ser atribuída à falta de oxidante ou à falta de tempo de reação, devido aos baixos valores de pH utilizados na coagulação e oxidação conjuntas, prejudicando a cinética do processo de oxidação. A falta de oxidante fica descartada, porque os resultados obtidos no estudo da dosagem de oxidante (item 5.3 da ETAPA I), mostram que, quando se empregou dosagem de 2,7 mg/L, o manganês total residual foi de 0,11 mg/L e quando se elevou a dosagem de oxidante para 4,0 mg/L, o manganês total residual foi 0,15 mg/L, mostrando assim que, para o caso em questão, a dosagem de oxidante não foi fator limitante no processo de oxidação do manganês.

Fica então fortalecida a hipótese que a baixa eficiência de oxidação do manganês esteve ligada ao tempo de reação, ou seja, à cinética da reação devido ao baixo pH utilizado.

Sabe-se que a oxidação química de  $Mn^{+2}$  geralmente é requerida para obter-se precipitação de  $MnO_2$  em razoáveis períodos de tempo, com valores de pH utilizados em águas de abastecimento (maiores que 8,0), e no presente trabalho, a oxidação química foi realizada com valores de pH em torno de 6,3, considerado muito baixo para fins de oxidação química do manganês.

No próximo item estão apresentados os resultados obtidos com uso de filtro rápido descendente com leito de areia, no qual foi maior o tempo de coleta das amostras, ou seja, de oxidação. As coletas foram realizadas após 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 horas de filtração. Assim, foi possível analisar as concentrações de manganês obtidas e verificar a influência do tempo de oxidação na remoção do manganês.

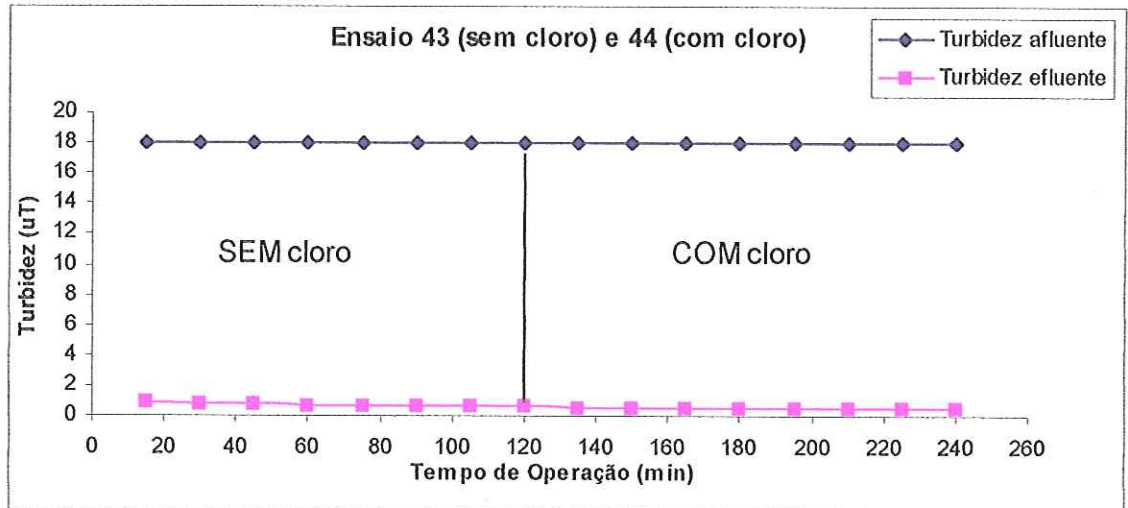


GRÁFICO 5.194 – Turbidez afluente e efluente nos ensaios de flotação 43 (sem cloro) e 44 (com cloro) da Fase 4 da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1,  $DCF=30 \text{ mg/L}$ ,  $DCI=2,7 \text{ mg/L}$ ,  $TAS=13 \text{ m/h}$ ,  $T_f=20 \text{ minutos}$ ,  $G_f=60/60/60 \text{ s}^{-1}$ , pressão de saturação= $450 \text{ kPa}$ ,  $S_{FLO} = 5,7 \text{ g de ar/m}^3 \text{ de água}$

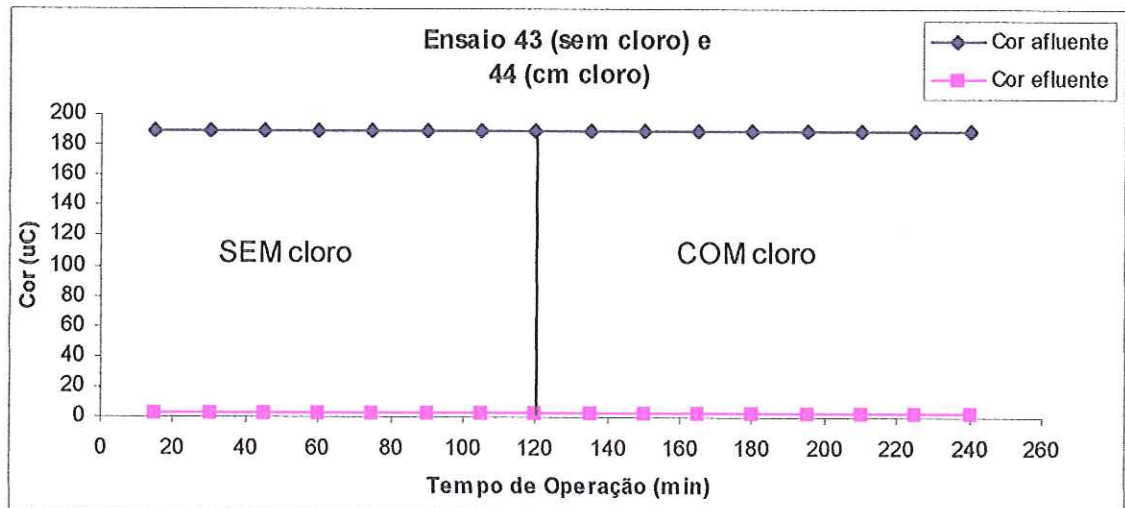


GRÁFICO 5.195 – Cor afluente e efluente nos ensaios de flotação 43 (sem cloro) e 44 (com cloro) da Fase 4 da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1,  $DCF=30 \text{ mg/L}$ ,  $DCI=2,7 \text{ mg/L}$ ,  $TAS=13 \text{ m/h}$ ,  $T_f=20 \text{ minutos}$ ,  $G_f=60/60/60 \text{ s}^{-1}$ , pressão de saturação= $450 \text{ kPa}$ ,  $S_{FLO} = 5,7 \text{ g de ar/m}^3 \text{ de água}$

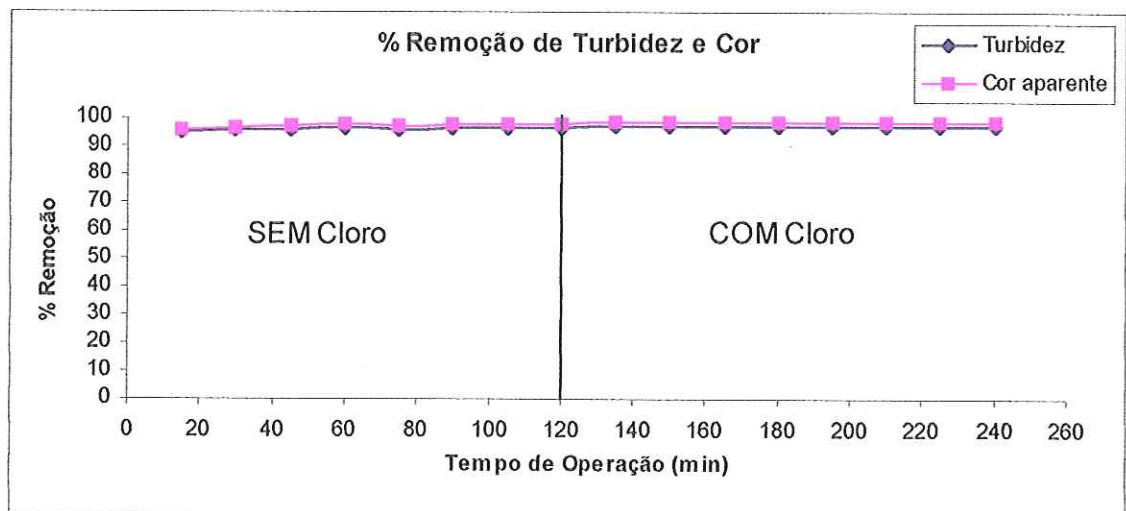


GRÁFICO 5.196 – Remoção de turbidez e cor nos ensaios de flotação 43 (sem cloro) e 44 (com cloro) da Fase 4 da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1,  $DCF=30 \text{ mg/L}$ ,  $DCI=2,7 \text{ mg/L}$ ,  $TAS=13 \text{ m/h}$ ,  $T_f=20 \text{ minutos}$ ,  $G_f=60/60/60 \text{ s}^{-1}$ , pressão de saturação= $450 \text{ kPa}$ ,  $S_{FLO} = 5,7 \text{ g de ar/m}^3 \text{ de água}$

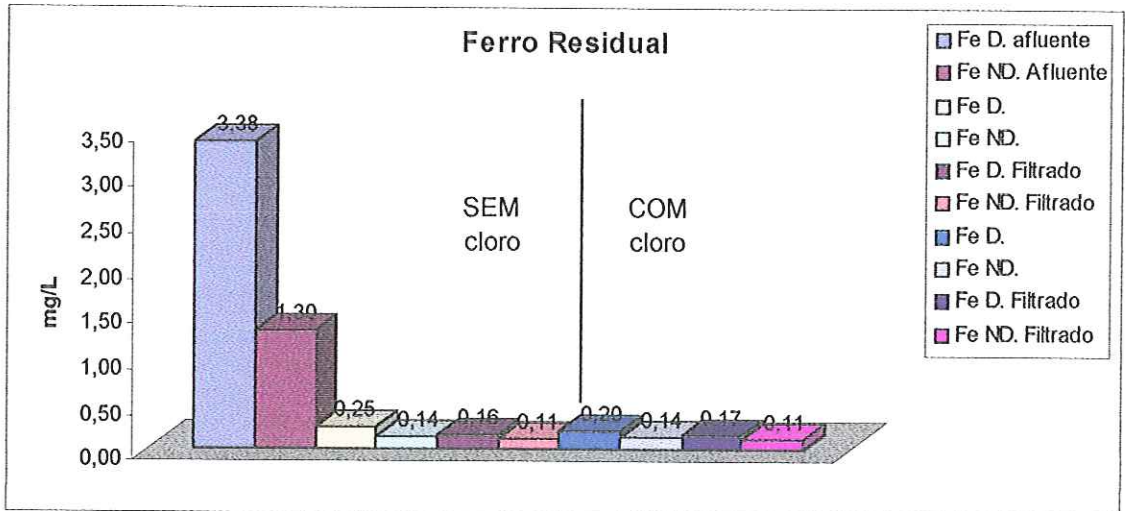


GRÁFICO 5.197 – Ferro residual afluente e efluente nos ensaios de flotação 43 (sem cloro) e 44 (com cloro). Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=13 m/h, T<sub>f</sub>=20 minutos, G<sub>f</sub>=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa, S<sub>FLO</sub> = 5,7 g de ar/m<sup>3</sup> de água

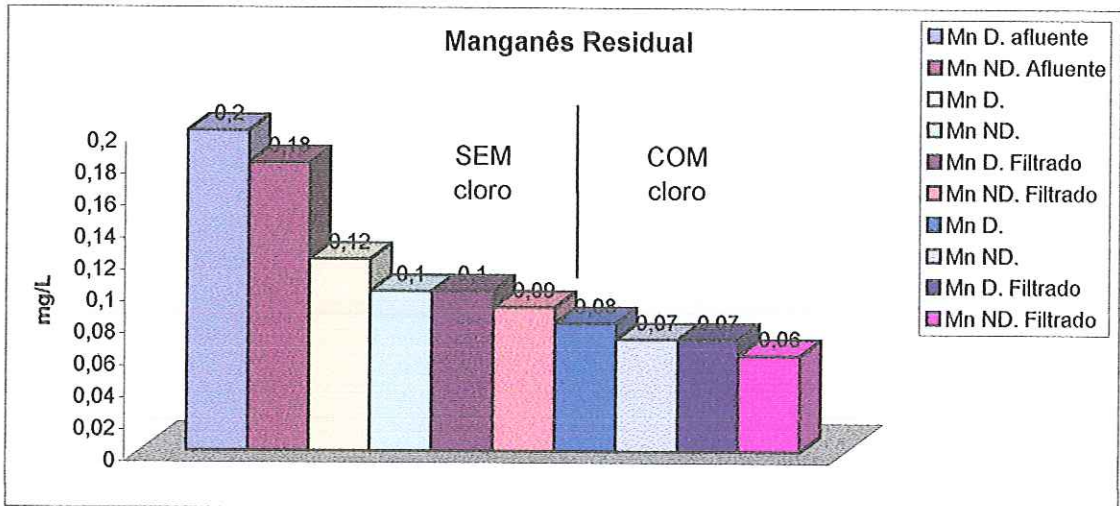


GRÁFICO 5.198 – Manganês residual afluente e efluente nos ensaios de flotação 43 (sem cloro) e 44 (com cloro). Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=13 m/h, T<sub>f</sub>=20 minutos, G<sub>f</sub>=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa, S<sub>FLO</sub> = 5,7 g de ar/m<sup>3</sup> de água

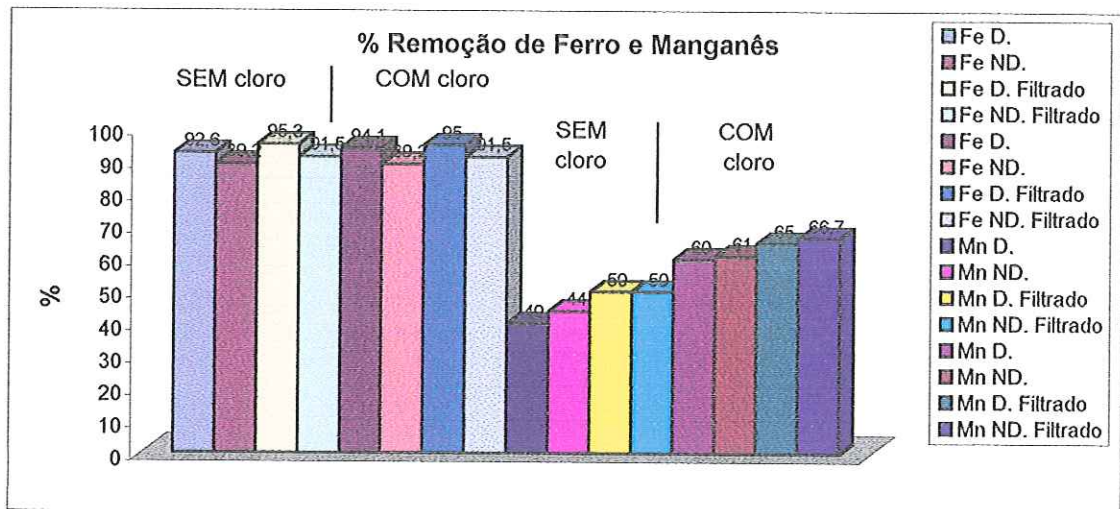


GRÁFICO 5.199 – Remoção de ferro e manganês nos ensaios de flotação 43 (sem cloro) e 44 (com cloro). Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=13 m/h, T<sub>f</sub>=20 minutos, G<sub>f</sub>=60/60/60 s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa, S<sub>FLO</sub> = 5,7 g de ar/m<sup>3</sup> de água

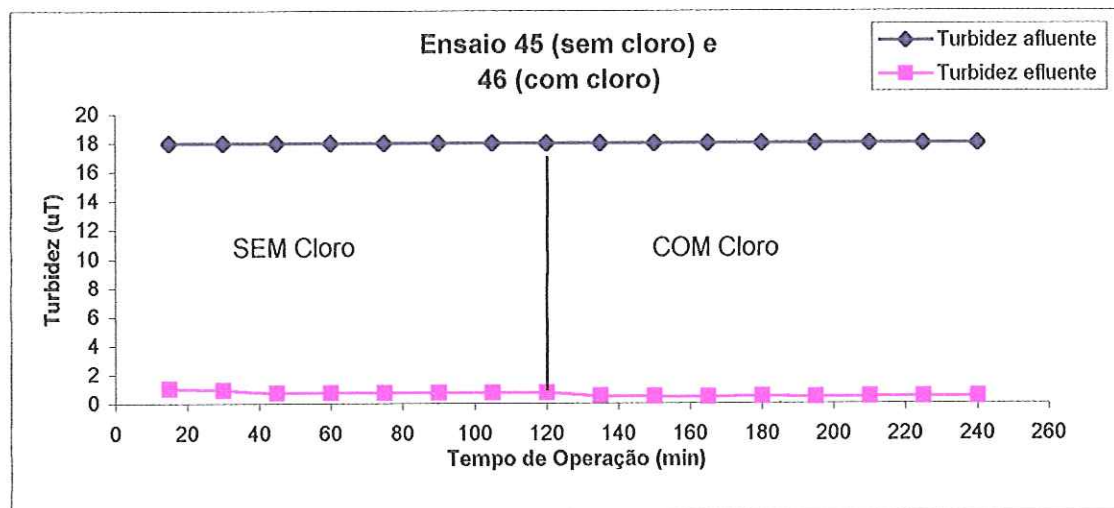


GRÁFICO 5.200 – Turbidez afluyente e efluente nos ensaios de flotação 45 (sem cloro) e 46 (com cloro) da Fase 4 da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1,  $DCF=25$  mg/L,  $DCI=2,7$  mg/L,  $TAS=13$  m/h,  $T_r=20$  minutos,  $G_i=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa,  $S_{FLO} = 5,7$  g de ar/m<sup>3</sup> de água

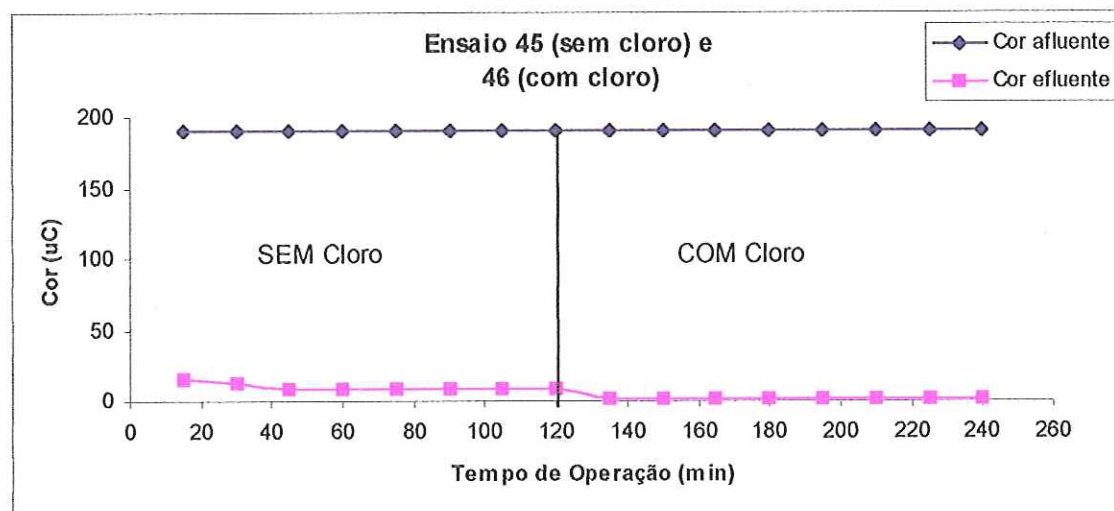


GRÁFICO 5.201 – Cor afluyente e efluente nos ensaios de flotação 45 (sem cloro) e 46 (com cloro) da Fase 4 da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1,  $DCF=25$  mg/L,  $DCI=2,7$  mg/L,  $TAS=13$  m/h,  $T_r=20$  minutos,  $G_i=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa,  $S_{FLO} = 5,7$  g de ar/m<sup>3</sup> de água

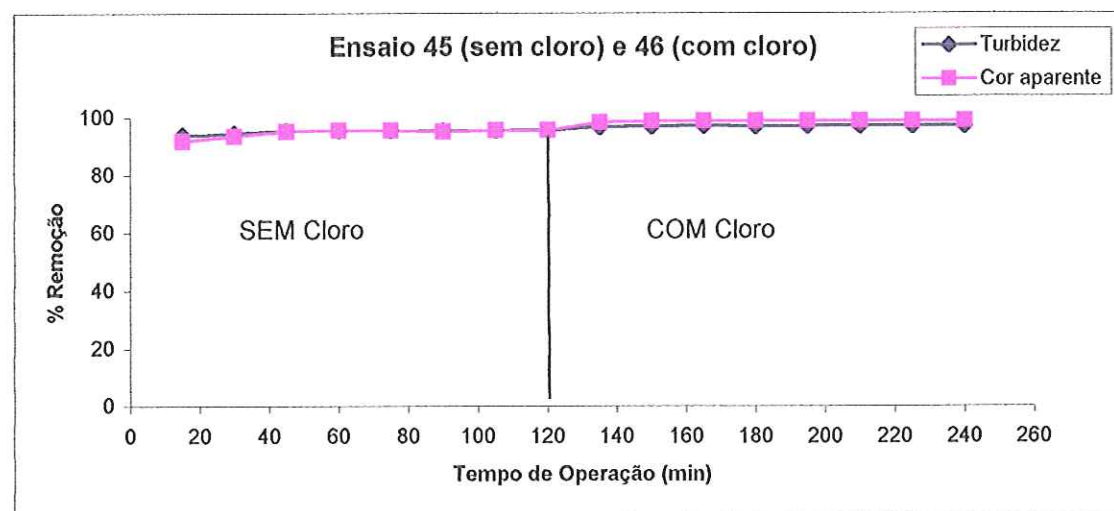


GRÁFICO 5.202 – Remoção de cor e turbidez nos ensaios de flotação 45 (sem cloro) e 46 (com cloro) da Fase 4 da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1,  $DCF=25$  mg/L,  $DCI=2,7$  mg/L,  $TAS=13$  m/h,  $T_r=20$  minutos,  $G_i=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa,  $S_{FLO} = 5,7$  g de ar/m<sup>3</sup> de água

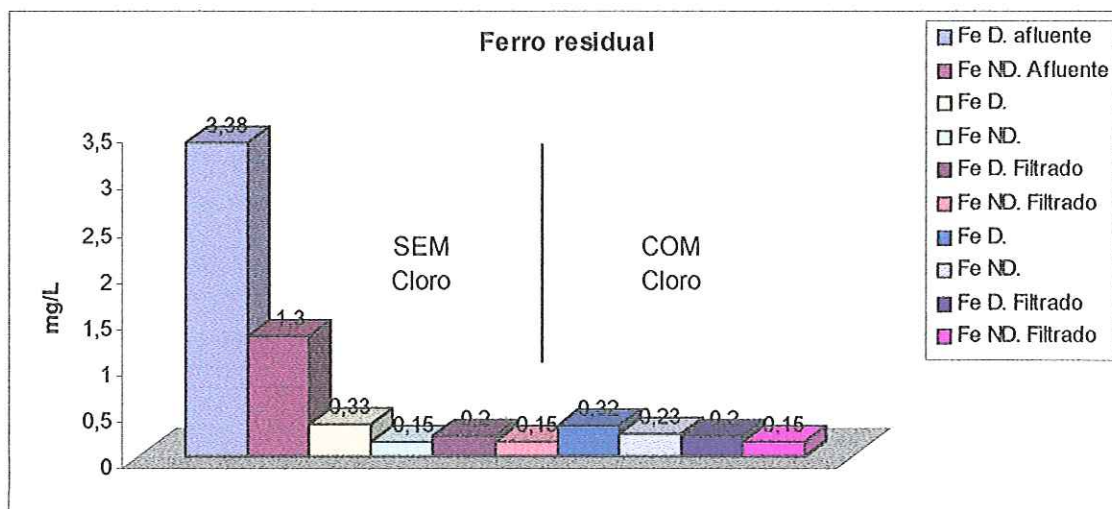


GRÁFICO 5.203 – Ferro residual afluente e efluente nos ensaios de flotação 45 (sem cloro) e 46 (com cloro). Condições dos ensaios: Tipo 1,  $DCF=25$  mg/L,  $DCI=2,7$  mg/L,  $TAS=13$  m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa,  $S_{FLO} = 5,7$  g de ar/m<sup>3</sup> de água

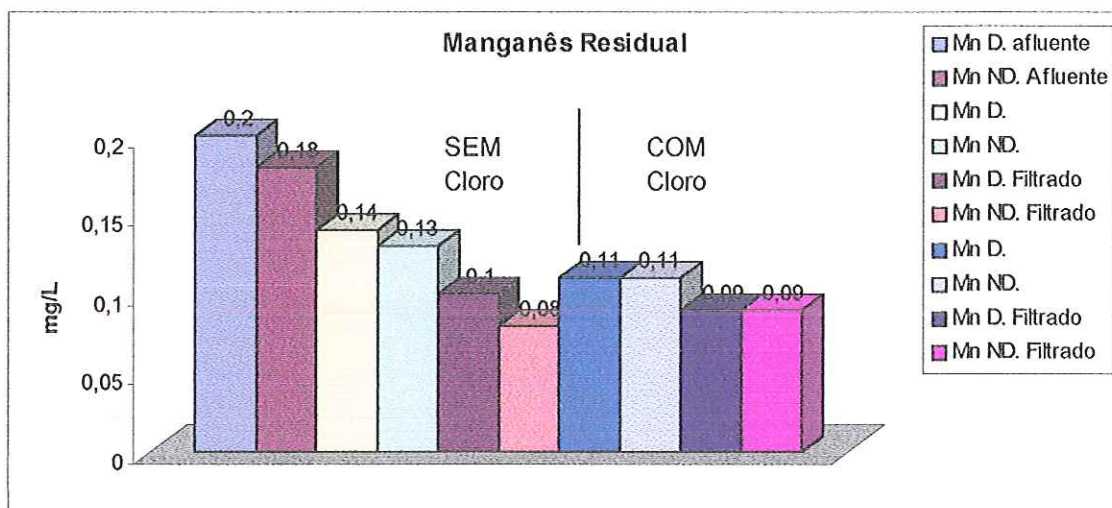


GRÁFICO 5.204 – Manganês residual afluente e efluente nos ensaios de flotação 45 (sem cloro) e 46 (com cloro). Condições dos ensaios: Tipo 1,  $DCF=25$  mg/L,  $DCI=2,7$  mg/L,  $TAS=13$  m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa,  $S_{FLO} = 5,7$  g de ar/m<sup>3</sup> de água

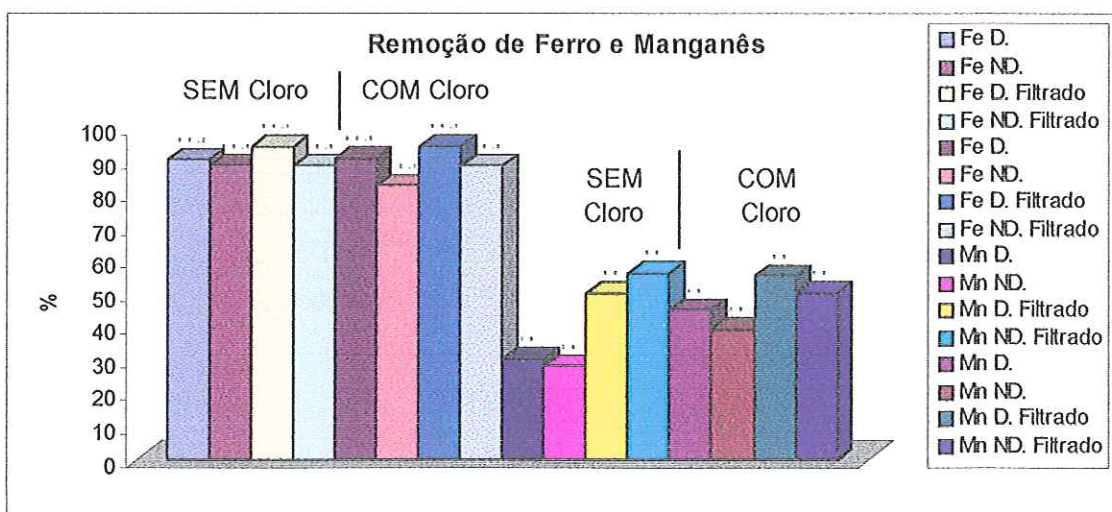


GRÁFICO 5.205 – Remoção de ferro e manganês nos ensaios de flotação 45 (sem cloro) e 46 (com cloro). Condições dos ensaios: Tipo 1,  $DCF=25$  mg/L,  $DCI=2,7$  mg/L,  $TAS=13$  m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa,  $S_{FLO} = 5,7$  g de ar/m<sup>3</sup> de água

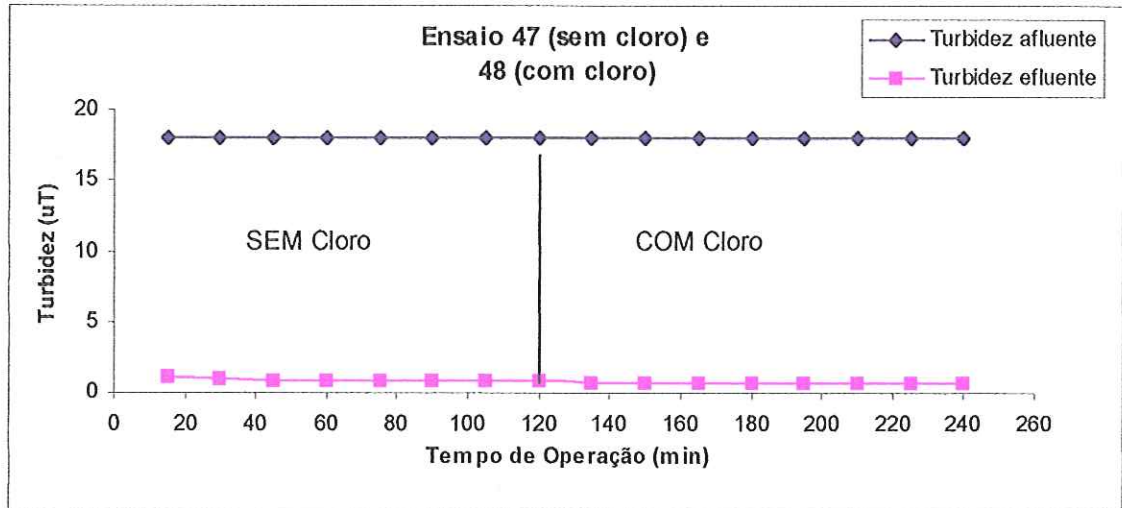


GRÁFICO 5.206 – Turbidez afluyente e efluente nos ensaios de flotação 47 (sem cloro) e 48 (com cloro) da Fase 4 da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1,  $DCF=20$  mg/L,  $DCI=2,7$  mg/L,  $TAS=13$  m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa,  $S_{FLO} = 5,7$  g de ar/m<sup>3</sup> de água

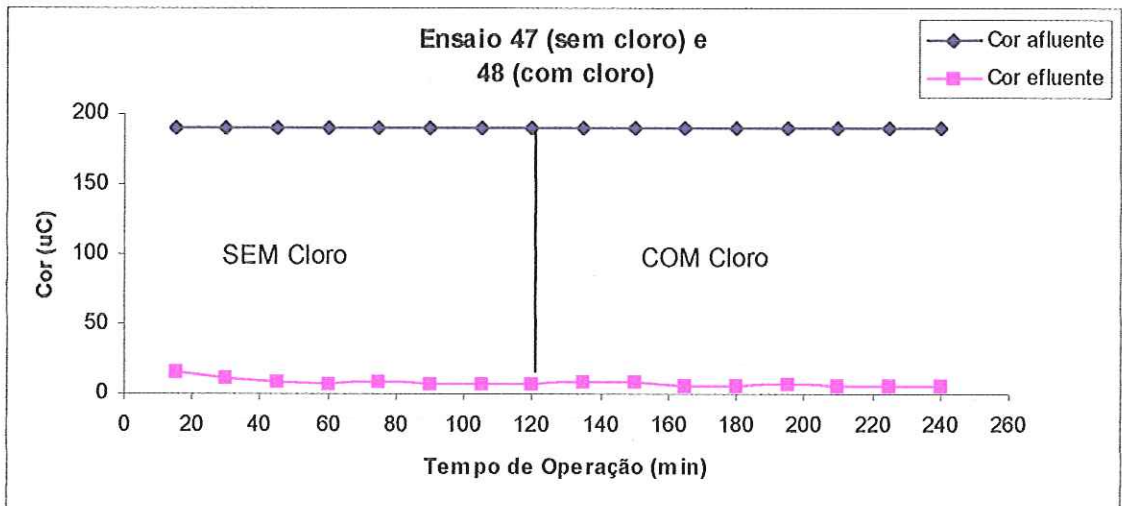


GRÁFICO 5.207 – Cor afluyente e efluente nos ensaios de flotação 47 (sem cloro) e 48 (com cloro) da Fase 4 da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1,  $DCF=20$  mg/L,  $DCI=2,7$  mg/L,  $TAS=13$  m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa,  $S_{FLO} = 5,7$  g de ar/m<sup>3</sup> de água

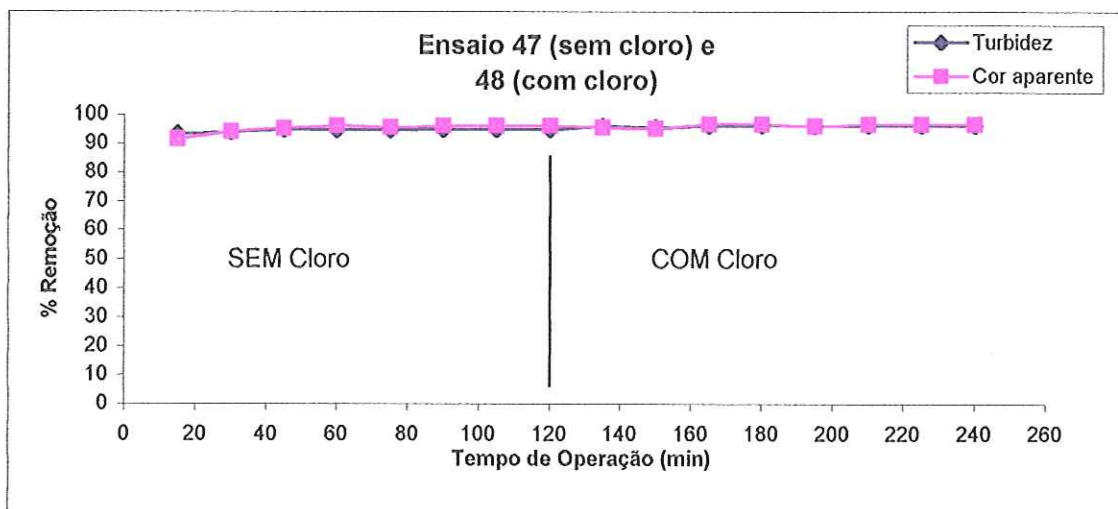


GRÁFICO 5.208 – Remoção de cor e turbidez nos ensaios de flotação 47 (sem cloro) e 48 (com cloro) da Fase 4 da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1,  $DCF=20$  mg/L,  $DCI=2,7$  mg/L,  $TAS=13$  m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa,  $S_{FLO} = 5,7$  g de ar/m<sup>3</sup> de água

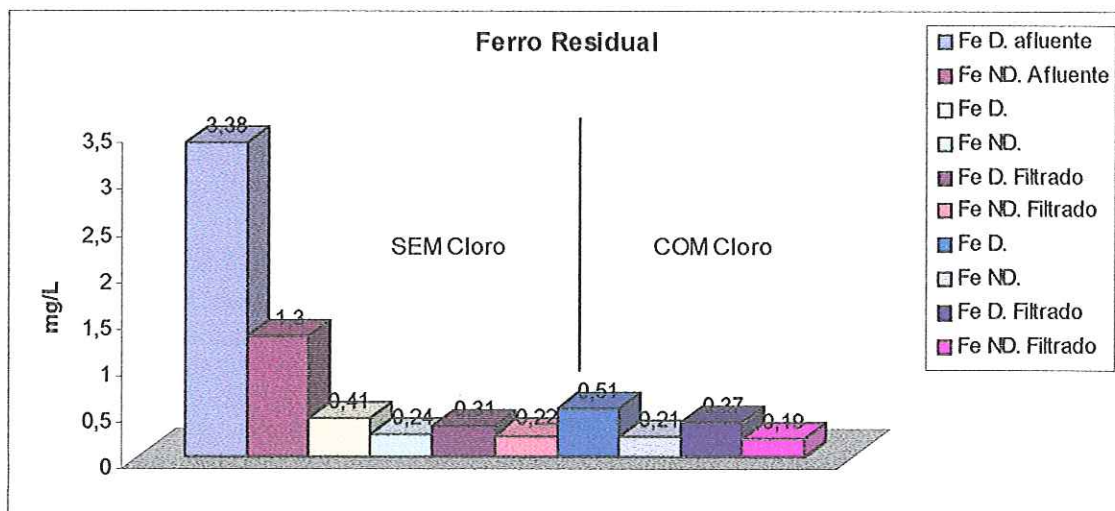


GRÁFICO 5.209 – Ferro residual afluente e efluente nos ensaios de flotação 47 (sem cloro) e 48 (com cloro). Condições dos ensaios: Tipo 1,  $DCF=20$  mg/L,  $DCI=2,7$  mg/L,  $TAS=13$  m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa,  $S_{FLO} = 5,7$  g de ar/m<sup>3</sup> de água

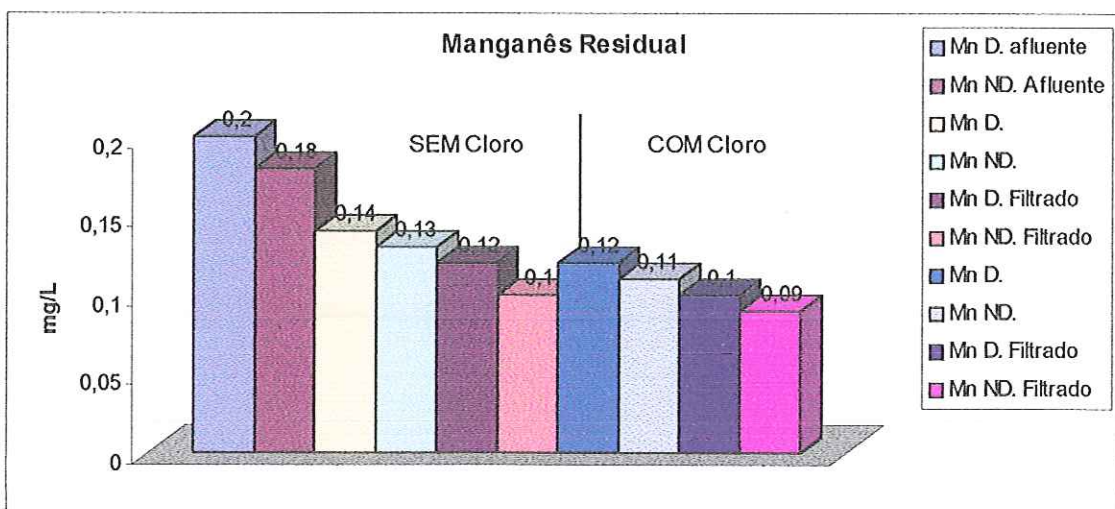


GRÁFICO 5.210 – Manganês residual afluente e efluente nos ensaios de flotação 47 (sem cloro) e 48 (com cloro). Condições dos ensaios: Tipo 1,  $DCF=20$  mg/L,  $DCI=2,7$  mg/L,  $TAS=13$  m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa,  $S_{FLO} = 5,7$  g de ar/m<sup>3</sup> de água

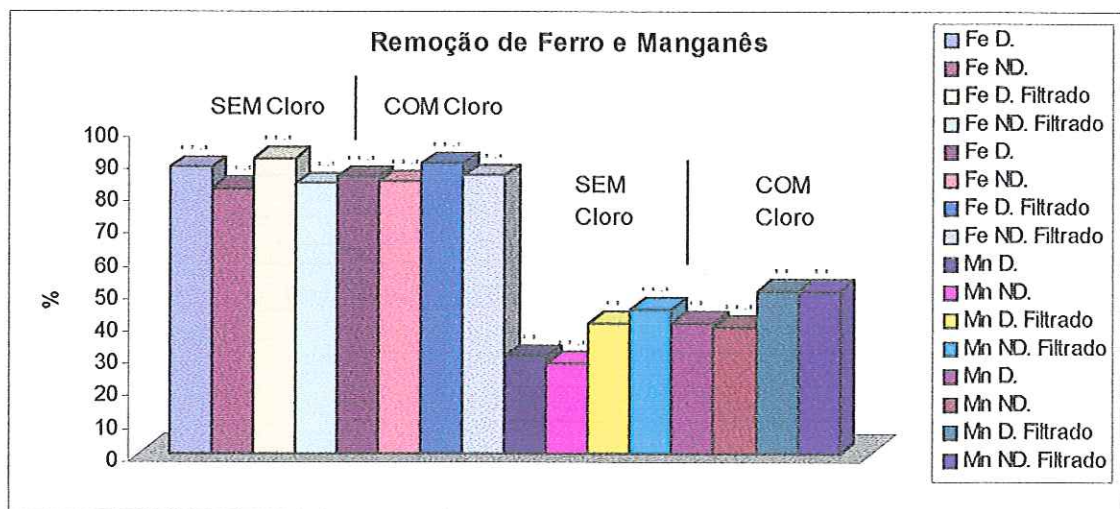


GRÁFICO 5.211 – Remoção de ferro e manganês nos ensaios de flotação 47 (sem cloro) e 48 (com cloro). Condições dos ensaios: Tipo 1,  $DCF=20$  mg/L,  $DCI=2,7$  mg/L,  $TAS=13$  m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa,  $S_{FLO} = 5,7$  g de ar/m<sup>3</sup> de água

TABELA 5.40 – Características principais da água bruta de estudo para os ensaios de 43 a 48 da Fase 4 da ETAPA II.  
Condições dos ensaios: Temperatura = 25 °C

ÁGUA DE ESTUDO													
ENSAIO	pH	Cor Aparente (uC)	Cor Verdadeira (uC)	Turbidez (uT)	Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Conduti- vidade (μS/cm)	ST (mg/L)	SST (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Dist. Tamanho partículas (de 2 a 24 μm)	
												Média*	Desvio
43	7,0	190	46	18,0	21,0	16,8	50,7	10,1	2,6	3,4	0,2	5,95	3,58
44	7,0	190	46	18,0	21,0	16,8	50,7	10,1	2,6	3,4	0,2		
45	7,0	190	46	18,0	21,0	16,8	50,7	10,1	2,6	3,4	0,2	5,95	3,58
46	7,0	190	46	18,0	21,0	16,8	50,7	10,1	2,6	3,4	0,2		
47	7,0	190	46	18,0	21,0	16,8	50,7	10,1	2,6	3,4	0,2	5,95	3,58
48	7,0	190	46	18,0	21,0	16,8	50,7	10,1	2,6	3,4	0,2		

\*Média ponderada

TABELA 5.41 – Características principais da água coagulada para os ensaios de 43 a 48 da Fase 4 da ETAPA II.  
Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI = 2,7 mg/L, Temperatura = 25 °C

ENSAIO	pH	Cor Aparente (uC)	Potencial Zeta (mV)	Turbidez (uT)	ST (mg/L)	SST (mg/L)	Dist. Tamanho partículas 2 a 24 μm	
							Média*	Desvio
43	6,4 sem cloro	274	-16,0±1,9	20,4	15,3	3,9	6,72	4,14
44	6,3 com cloro	282	-12,0±2,9	20,0	18,4	4,7		
45	6,4 sem cloro	273	-15,0±2,9	19,3	16,5	4,2	6,72	4,14
46	6,3 com cloro	279	-13,0±1,9	18,8	15,6	4,0		
47	6,6 sem cloro	228	-18,0±2,9	18,7	12,3	3,5	6,65	4,10
48	6,4 com cloro	213	-15,0±1,9	17,6	13,0	3,7	6,19	3,67



TABELA 5.42 – Resumo dos resultados das amostras compostas obtidas nos ensaios de flotação de 43 a 48 (Fase 4 da ETAPA II)

Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF = 30 mg/L, DCI = 2,7 mg/L, TAS = 13 m/h, pH = 6,3, Pressão de saturação = 450 kPa, Temperatura = 25 °C,  $S_{Flot} = 5,7 \pm 0,1$  g de ar/m<sup>3</sup> de água

DCF mg/L	Condições	Ensaio	Condições	Turbidez (uT)		Cor (uC)		SST (mg/L)		Fe total (digerido mg/L)		Mn total (digerido mg/L)		Distribuição de Tamanho partículas ( 2 a 24 µm)	
				AFL	EFL	AFL	EFL	AFL	EFL	AFL	EFL	AFL	EFL	Média*	Desvio
30	Sem cloro	43	Após Flotação	18,0	0,82	190	8	2,60	0,02	3,38	0,25	0,20	0,12	4,35	3,49
		43	Após Flot + Filtração	18,0	0,70	190	6	2,60	-	3,38	0,16	0,20	0,10	-	-
	Com cloro	44	Após Flotação	18,0	0,40	190	< 2	2,60	< 0,1	3,38	0,20	0,20	0,08	3,93	2,86
		44	Após Flot + Filtração	18,0	0,27	190	< 2	2,60	-	3,38	0,17	0,20	0,07	-	-
25	Sem cloro	45	Após Flotação	18,0	1,04	190	12	2,60	0,13	3,38	0,33	0,20	0,14	3,88	2,74
		45	Após Flot + Filtração	18,0	0,66	190	7	2,60	-	3,38	0,20	0,20	0,10	-	-
	Com cloro	46	Após Flotação	18,0	0,69	190	5	2,60	0,13	3,38	0,32	0,20	0,11	4,03	2,95
		46	Após Flot + Filtração	18,0	0,50	190	3	2,60	-	3,38	0,20	0,20	0,09	-	-
20	Sem cloro	47	Após Flotação	18,0	0,99	190	14	2,60	0,14	3,38	0,41	0,20	0,14	3,86	2,61
		47	Após Flot + Filtração	18,0	0,81	190	8	2,60	-	3,38	0,22	0,20	0,12	3,63	2,84
	Com cloro	48	Após Flotação	18,0	0,81	190	7	2,60	0,14	3,38	0,51	0,20	0,12	4,11	2,98
		48	Após Flot + Filtração	18,0	0,67	190	3	2,60	-	3,38	0,37	0,20	0,10	4,05	3,48

\*Média ponderada

### 5.5.6. Filtração do Efluente da Unidade Piloto de FAD de Alta Taxa em Filtro Rápido Descendente com Leito em Areia (Fase 5 da ETAPA II)

Na Fase 5 foi avaliada a eficiência de um filtro rápido descendente com leito de areia, com utilização de taxa de filtração de 10 m/h. As amostras clarificadas por flotação em duas diferentes condições operacionais foram submetidas, na seqüência, à filtração em areia.

Para a realização dos ensaios da Fase 5, fixaram-se: aplicação do oxidante no momento da mistura rápida (procedimento Tipo 1), dosagem de oxidante ( $DCI = 2,7 \text{ mg/L}$ ), dosagem de coagulante ( $DCF = 30 \text{ mg/L}$ ), pH de coagulação ( $\text{pH} = 6,3$ ), gradiente médio de velocidade na floculação ( $G_F = 60/60/60 \text{ s}^{-1}$ ), tempo de floculação ( $T_F = 20 \text{ min}$ ) e a quantidade de ar fornecida para a flotação ( $S_{FLO} = 5,7 \text{ g de ar/m}^3 \text{ de água}$ ). Variou-se a taxa de aplicação superficial no flotador ( $TAS = 13 \text{ e } 39 \text{ m/h}$ ) e as amostras clarificadas foram submetidas à filtração em areia. As Tabelas 5.43 e 5.44 apresentam as características principais da água de estudo e da água coagulada. As tabelas 5.45 e 5.46 mostram um resumo dos resultados.

Nesse caso específico, conforme descrito no item 4.4.3.5, a água clarificada por flotação foi coletada e estocada por aproximadamente três horas. Através de bomba dosadora, essa água estocada, foi enviada para o filtro de areia, onde foi filtrada por 7 horas. A cada hora de filtração foram coletadas amostras e realizadas as devidas análises.

Nota-se que após a flotação ( $TAS=13 \text{ m/h}$ ), os resultados foram: turbidez do efluente da flotação de 0,61 uT (95,8% de remoção), cor aparente menor 2 uC (98,9% de remoção), ferro total de 0,36 mg/L (89,4% de remoção), ferro detectável sem digestão química de 0,19 mg/L, manganês total de 0,08 mg/L (60,0% de remoção) e manganês detectável sem digestão química de 0,07 mg/L.

Essa amostra de água clarificada por flotação foi submetida à filtração em areia e após 1 hora, foi coletada a primeira amostra que apresentou turbidez residual de 0,77 uT, cor aparente residual de 4 uC, ferro total residual de 0,16 mg/L, ferro detectável sem digestão química de 0,04 mg/L, manganês total residual de 0,05 mg/L e manganês detectável sem digestão química de 0,04 mg/L. Verifica-se que a eficiência de remoção aumentou após 1 hora de filtração, principalmente para o ferro e o manganês. No caso do manganês, possivelmente o tempo de estocagem da amostra influenciou na oxidação do mesmo pois, após 1 hora, o efluente do filtro apresentava somente 0,05 mg/L de manganês total, demonstrando ocorrência de retenção desse íon no processo de filtração.

Na seqüência, coletaram-se amostras após 2, 3, 4, 5, 6 e 7 horas, após 4 horas de filtração verificou-se que as amostras apresentavam resultados muito semelhantes de turbidez (em torno de 0,40 uT), cor aparente (menor que 2 uC), ferro total (0,10 mg/L) e manganês total (0,02 mg/L). Após 5 horas de filtração, não foi detectado ferro, sem a digestão química, o que indica ausência de ferro solúvel no efluente do filtro, ou seja, provavelmente, todo o ferro não complexado estava na forma de hidróxidos férricos, e permaneceu retido no leito filtrante.

A análise da amostra clarificada por flotação com taxa de aplicação superficial de 39 m/h, mostra que os resultados foram: turbidez do efluente da flotação de 1,14 uT (92,1% de remoção), cor de 14 uC (91,4% de remoção), ferro total de 0,74 mg/L (78,2% de remoção), ferro detectável sem digestão química de 0,35 mg/L, manganês total de 0,16 mg/L (20,0% de remoção), e manganês detectável sem digestão química de 0,15 mg/L. Da mesma forma que no ensaio anterior, após 1 hora de filtração, foi coletada uma amostra e esta apresentou turbidez residual de 0,42 uT, cor aparente residual de 3 uC, ferro total residual de 0,14 mg/L, ferro detectável sem digestão química de 0,03 mg/L, manganês total residual de 0,05 mg/L e manganês detectável sem digestão química de 0,04 mg/L, o que demonstra nova ocorrência de retenção dos íons de manganês no processo de filtração.

Para as amostras coletadas após 2, 3, 4, 5, 6 e 7 horas, mostram que, após 4 horas de filtração apresentaram resultados muito semelhantes de turbidez (em torno de 0,40 uT), cor aparente residual (menor que 2 uC), ferro total residual (0,10 mg/L), ferro detectável sem digestão química (não detectado), manganês total residual (0,02 mg/L) e manganês não detectado sem digestão química. Isso indica ausência de manganês solúvel no efluente do filtro, provavelmente por todo o manganês não complexado, na forma de dióxidos mangânicos, ficar retido no leito filtrante.

É importante ressaltar aqui que, novamente, após 1 hora de filtração, o manganês apresentou concentração muito baixa em relação à concentração apresentada após flotação, o que outra vez indica, que o tempo de estocagem das amostras para a filtração influenciou a oxidação. Após 4 horas de filtração, o manganês foi quase totalmente eliminado, ou seja, todo o  $Mn^{+2}$  presente no afluente foi oxidado ficando retido no filtro.

É interessante observar os Gráficos 5.219, 5.220 e 5.221, que apresentam a distribuição do tamanho das partículas, que o efluente do flotador com taxa de 39 m/h continha maior quantidade de partículas – em todas as faixas de tamanho investigadas (2 a 24  $\mu m$ ) - que o efluente com taxa de 13 m/h, fato este também refletido na turbidez que foi de 1,14 uT (efluente do flotador com taxa de 39 m/h) e de 0,61 uT (efluente do flotador com taxa de 13 m/h), o que era de se esperar tendo em vista que, maiores taxas de flotação ocasionam arraste de maior quantidade de partículas, principalmente as de menor tamanho. Verifica-se que, no ensaio de flotação com TAS de 39 m/h, o afluente ao filtro apresentava turbidez de 1,14 uT, e através dos Gráficos 5.219 e 5.220, é possível observar que, nesses ensaios, curiosamente, foi maior a eficiência de retenção de partículas com tamanho na faixa de 2 a 6  $\mu m$ , comparado ao ensaio com taxa no flotador de 13 m/h. Após 1 hora de filtração, nota-se, inclusive, menor residual de turbidez no ensaio com maior taxa, ou seja, 0,42 uT comparado ao residual de 0,77 uT, obtido no efluente do filtro no ensaio com taxa no flotador de 13 m/h.

Porém, no ensaio com taxa de flotação maior (39 m/h), após 4 horas de filtração, verifica-se diminuição significativa na eficiência de remoção de partículas na faixa de 2 a 8  $\mu m$ , apresentando os seguintes aumentos na quantidade de partículas residuais:

- i) número de partículas residuais com tamanho médio de 2  $\mu\text{m}$  passou de 384 (após 3 horas de filtração) para 914 (após 4 horas de filtração);
- ii) número de partículas residuais com tamanho médio de 4  $\mu\text{m}$  passou de 238 (após 3 horas de filtração) para 476 (após 4 horas de filtração);
- iii) número de partículas residuais com tamanho médio de 6  $\mu\text{m}$  passou de 150 (após 3 horas de filtração) para 202 (após 4 horas de filtração);
- iv) número de partículas residuais com tamanho médio de 8  $\mu\text{m}$  passou de 117 (após 3 horas de filtração) para 115 (após 4 horas de filtração).

O fato de haver queda na eficiência de filtração com relação à retenção de partículas na faixa de 2 a 8  $\mu\text{m}$  no ensaio com taxa de flotação mais elevada (39 m/h), pode adquirir maior importância se for considerado o fato de, nessa faixa de tamanho, serem encontrados alguns microrganismos de grande interesse sanitário, tais como:

- Oocistos do *Cryptosporidium* (4,5 a 7,4 $\mu\text{m}$ );
- Cisto da *Entamoeba Hartmanni* (5 a 8 $\mu\text{m}$ );
- Cisto da *Giardia Lamblia* (12 $\mu\text{m}$  de comprimento e 8 $\mu\text{m}$  de largura);
- Cisto da *Entamoeba Histolytica* (8 a 20 $\mu\text{m}$ ).

De qualquer forma, são recomendáveis estudos mais aprofundados a respeito da influência da taxa de flotação na eficiência do subsequente processo de filtração, para obtenção de dados mais conclusivos que os aqui discutidos.

A despeito das diferenças nos resultados referentes à distribuição de tamanho de partículas, tanto para a amostra clarificada por flotação com taxa de aplicação superficial de 13 m/h, quanto para a amostra clarificada por flotação com taxa de aplicação superficial de 39 m/h, os demais resultados (referentes à remoção de turbidez, cor, ferro e manganês), após 1 hora de filtração, apresentaram-se razoavelmente semelhantes (turbidez na faixa de 0,42 a 0,77 uT, cor aparente na faixa de 3 a 4, ferro total na faixa de 0,14 a 0,16 mg/L e manganês igual a 0,05 mg/L). Após 4 horas de filtração, tais residuais passaram a apresentar valores extremamente semelhantes para ambas as taxas de flotação (turbidez em torno de 0,40 uT, cor aparente menor que 2 uC, ferro total em torno de 0,10 mg/L e manganês igual a 0,02 mg/L). Embora não se tenha monitorado a evolução da perda de carga no leito filtrante, após as quatro primeiras horas de filtração, observou-se que, até quatro horas de filtração, através de leitura nos piezômetros instalados na unidade de filtração, não foram detectáveis perdas de carga no leito, em ambos os ensaios (taxas de flotação de 13 e de 39 m/h).

Conclui-se assim, que para o tipo de água em questão, essa unidade de flotação de alta taxa poderia ser empregada com aplicação de taxas de até 39 m/h, como pré-clarificação, pois foram observados resultados muito bons de remoção de turbidez, cor e ferro, no efluente do filtro. No caso do manganês, os resultados também foram muito bons, porém, deve-se ressaltar que devido à estocagem da amostra para filtração, ocorreu tempo de reação de três horas no

processo de oxidação química com cloro, tempo este que seria bem menor (cerca de 20 minutos) se o ensaio tivesse sido realizado imediatamente após a flotação.

Assim, deve-se recomendar muita cautela nos casos de elevadas concentrações principalmente de manganês não complexado, pois, em tais situações seria necessário a obtenção de coagulação química em valores de pH mais elevados, com vistas ao favorecimento da cinética do processo de oxidação química desses íons metálicos.

A respeito da eficiência da FAD como pré-clarificação antes da filtração, pode-se citar também o trabalho realizado por FERGUSON, LOGSDON e CURLEY (1995). Os autores realizaram estudo de caso de água de dois reservatórios comparando o processo de FAD seguida de filtração descendente com o de filtração direta descendente. Entre outros, foram analisados vários parâmetros: desinfecção, remoção de turbidez, ferro, manganês e presença de algas. Quanto a ferro e manganês, concluiu-se que o processo de FAD apresentou remoção similar à filtração direta descendente, porém a flotação por ar dissolvido antecedendo a unidade de filtração, acarretou substancial aumento da carreira de filtração dos filtros.

Ressalta-se também, cautela no uso de taxas de flotação de 39 m/h, devido aos possíveis problemas com queda de eficiência da filtração e de retenção de partículas na faixa de 2 a 8  $\mu\text{m}$ , conforme discutido anteriormente.

Portanto, conforme comentado no item 5.5.4., é sugerido a realização de ensaios com a instalação piloto de flotação/filtração com valores de taxas de flotação entre 26 e 39 m/h.



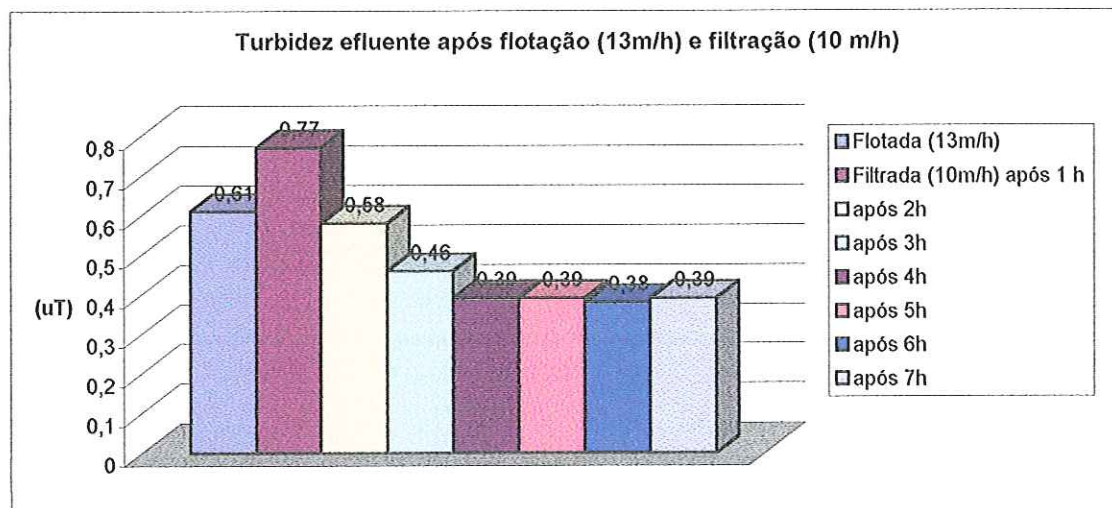


GRÁFICO 5.212 – Turbidez efluente no ensaio de flotação 49 da Fase 5 da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $TAS=13$  m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa,  $S_{FLO}=5,7$  g de ar/m<sup>3</sup> de água,  $TAS_{FIL}=10$  m/h

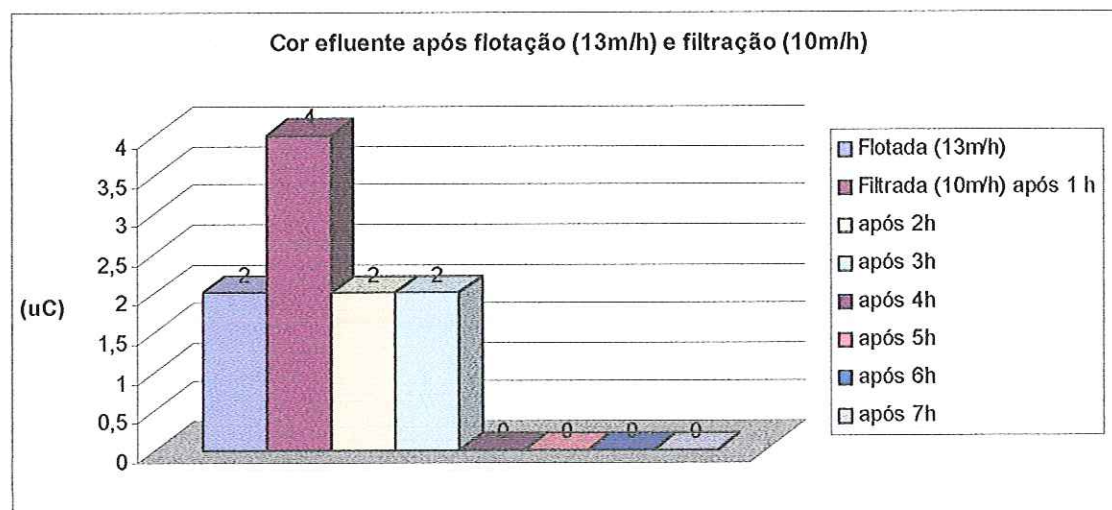


GRÁFICO 5.213 – Cor efluente no ensaio de flotação 49 da Fase 5 da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $TAS=13$  m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa,  $S_{FLO}=5,7$  g de ar/m<sup>3</sup> de água,  $TAS_{FIL}=10$  m/h

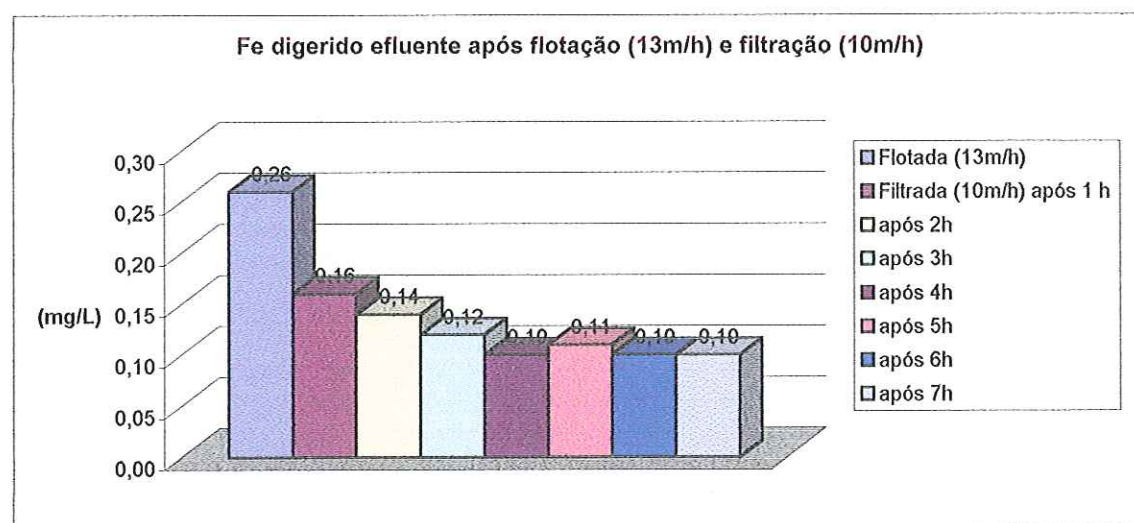


GRÁFICO 5.214 – Ferro digerido efluente no ensaio de flotação 49 da Fase 5 da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $TAS=13$  m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa,  $S_{FLO}=5,7$  g de ar/m<sup>3</sup> de água,  $TAS_{FIL}=10$  m/h

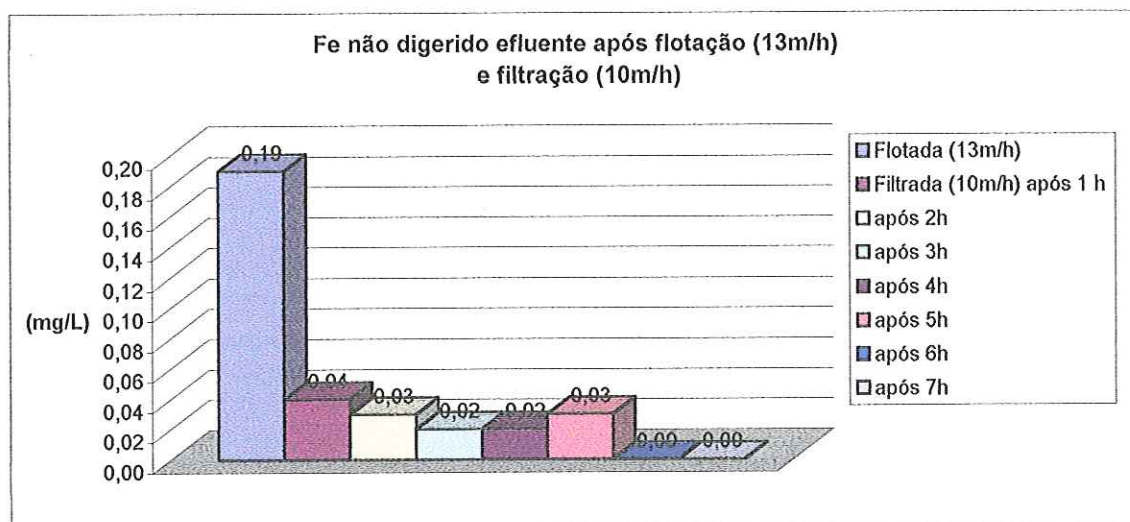


GRÁFICO 5.215 – Ferro não digerido efluente no ensaio de flotação 49 da Fase 5 da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=13 m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa,  $S_{fLO}=5,7$  g de ar/m<sup>3</sup> de água, TAS<sub>FIL</sub>=10 m/h

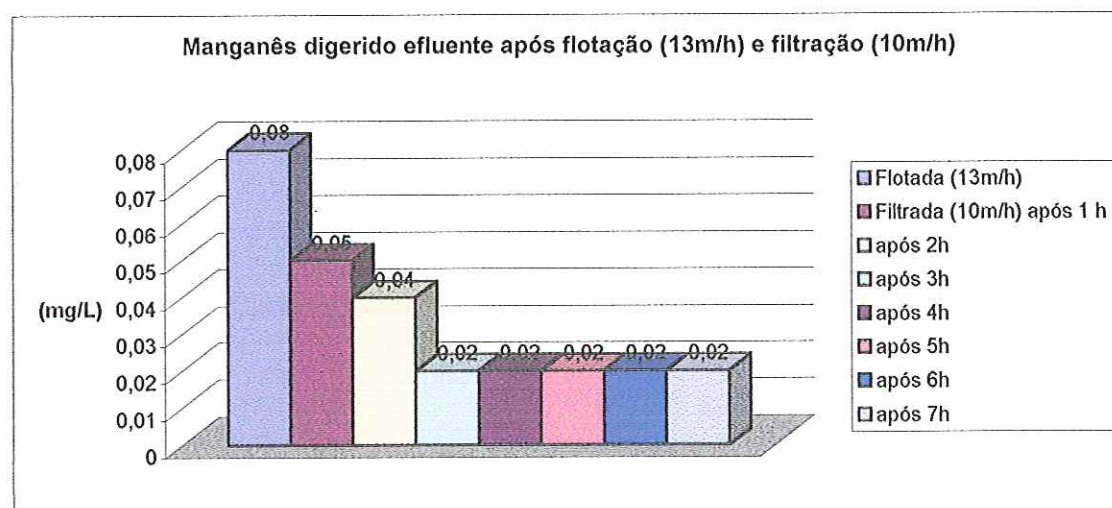


GRÁFICO 5.216 – Manganês digerido efluente no ensaio de flotação 49 da Fase 5 da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=13 m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa,  $S_{fLO}=5,7$  g de ar/m<sup>3</sup> de água, TAS<sub>FIL</sub>=10 m/h

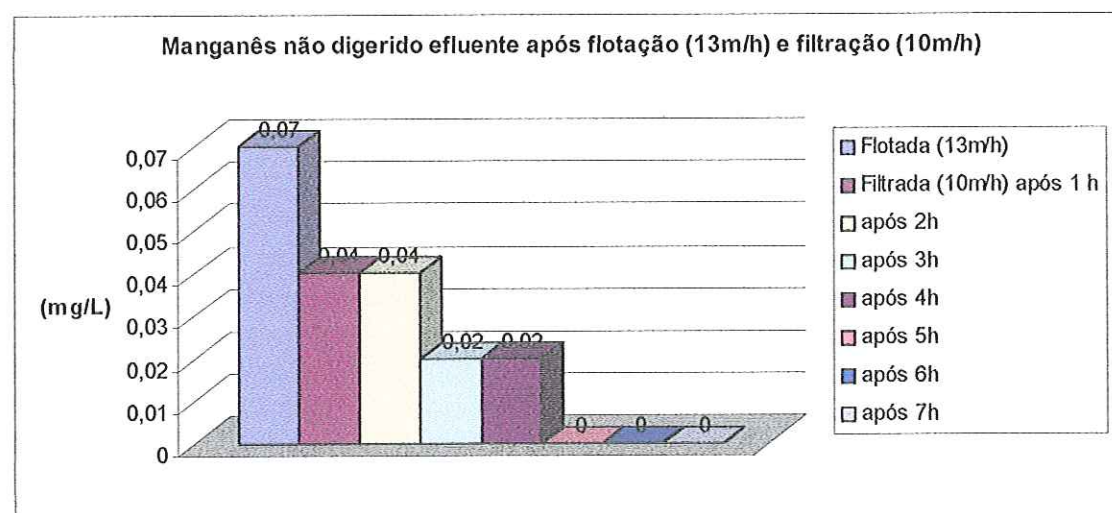


GRÁFICO 5.217 – Manganês não digerido efluente no ensaio de flotação 49 da Fase 5 da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=13 m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa,  $S_{fLO}=5,7$  g de ar/m<sup>3</sup> de água, TAS<sub>FIL</sub>=10 m/h

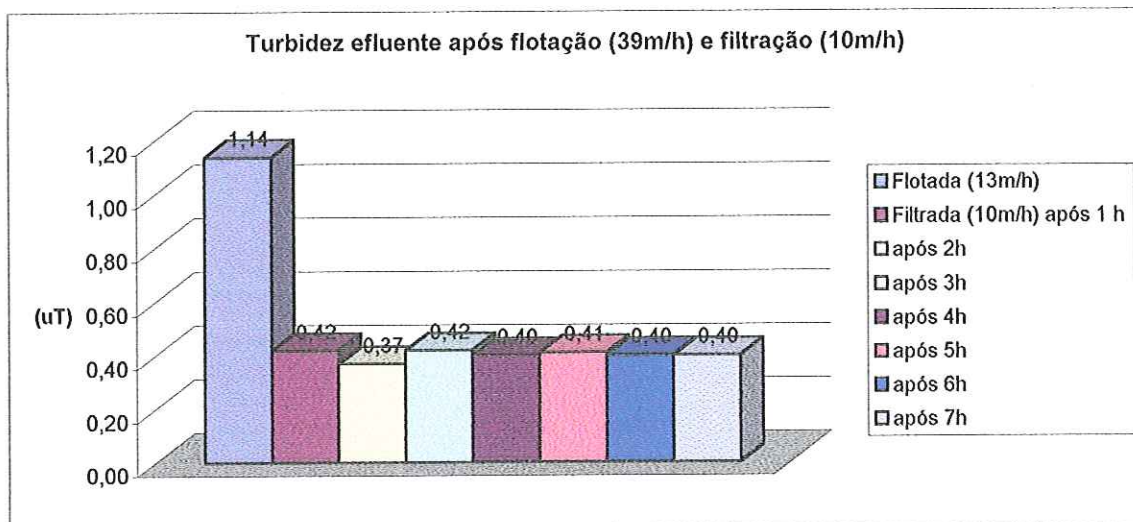


GRÁFICO 5.218 – Turbidez efluente no ensaio de flotação 50 da Fase 5 da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=39 m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60 \text{ s}^{-1}$ , pressão de saturação=450 kPa,  $S_{FLO}=5,7 \text{ g de ar/m}^3$  de água,  $TAS_{FIL}=10 \text{ m/h}$

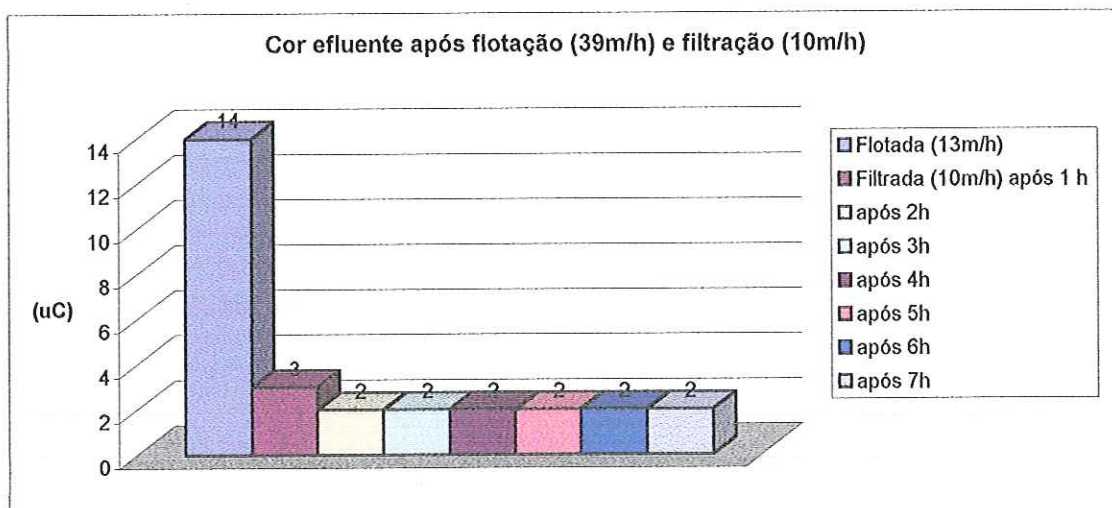


GRÁFICO 5.219 – Cor efluente no ensaio de flotação 50 da Fase 5 da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=39 m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60 \text{ s}^{-1}$ , pressão de saturação=450 kPa,  $S_{FLO}=5,7 \text{ g de ar/m}^3$  de água,  $TAS_{FIL}=10 \text{ m/h}$

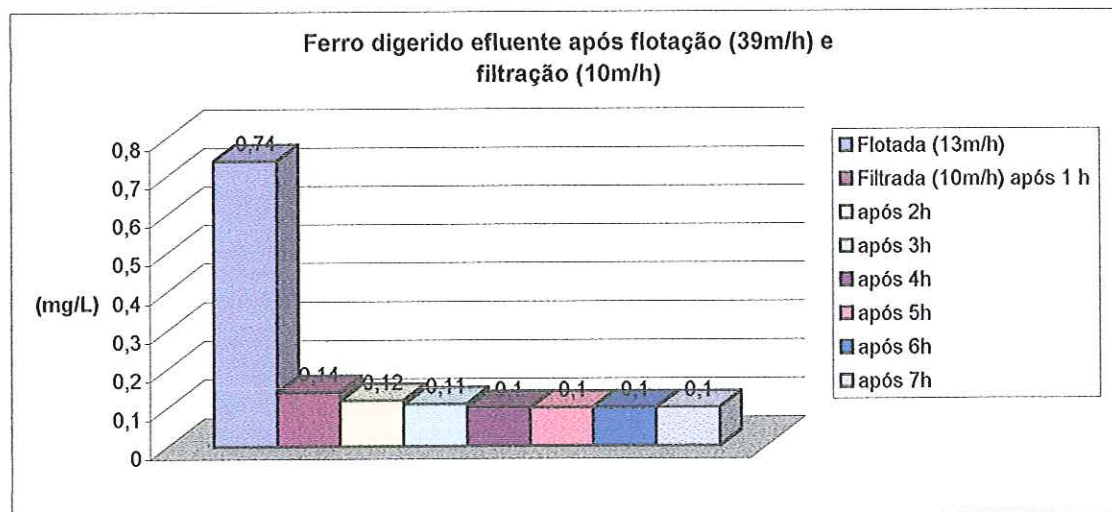


GRÁFICO 5.220 – Ferro digerido efluente no ensaio de flotação 50 da Fase 5 da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L, TAS=39 m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60 \text{ s}^{-1}$ , pressão de saturação=450 kPa,  $S_{FLO}=5,7 \text{ g de ar/m}^3$  de água,  $TAS_{FIL}=10 \pm 1 \text{ m/h}$



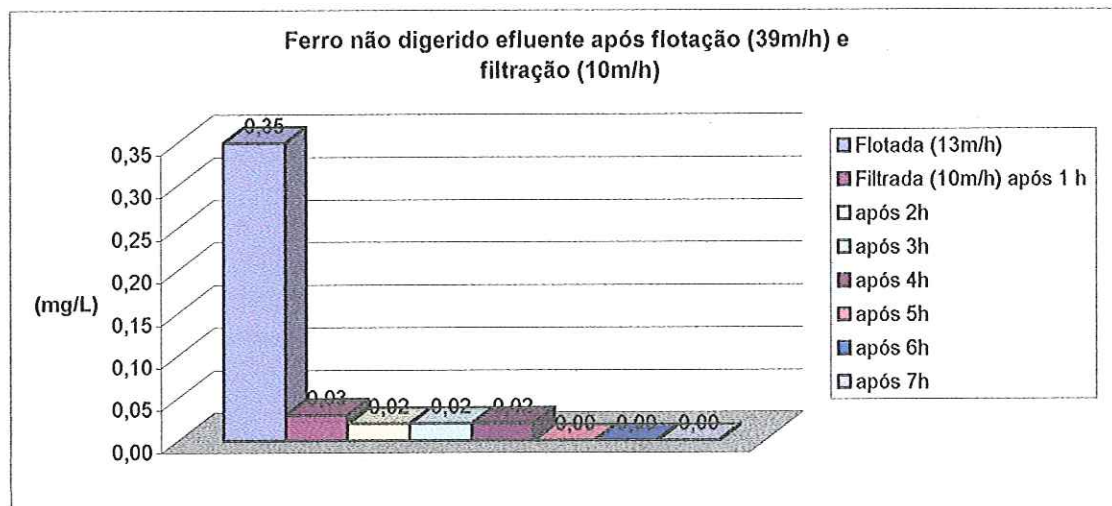


GRÁFICO 5.221 – Ferro não digerido efluente no ensaio de flotação 50 da Fase 5 da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $TAS=39$  m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa,  $S_{FLO}=5,7$  g de ar/m<sup>3</sup> de água,  $TAS_{FIL}=10$  m/h

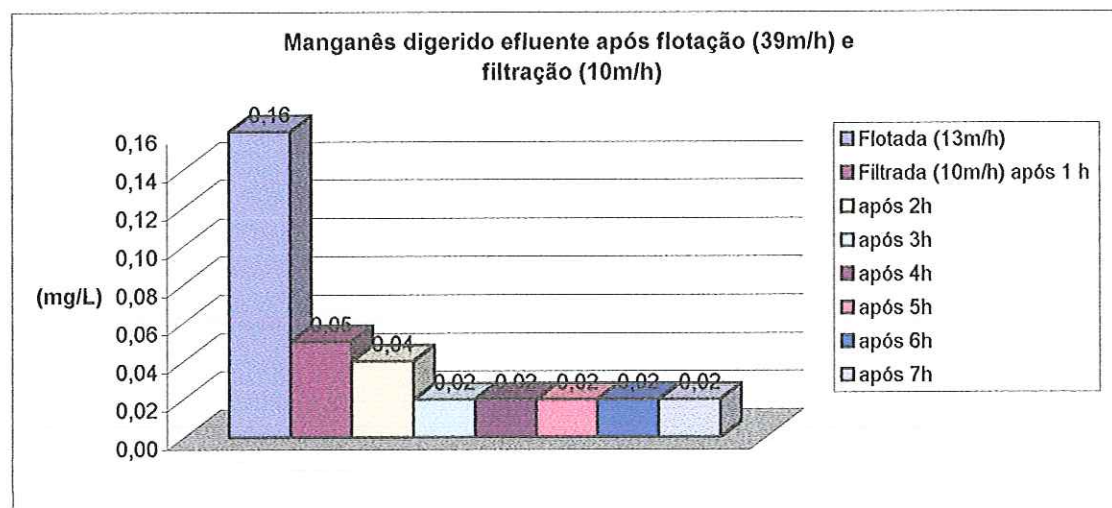


GRÁFICO 5.222 – Manganês digerido efluente no ensaio de flotação 50 da Fase 5 da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $TAS=39$  m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa,  $S_{FLO}=5,7$  g de ar/m<sup>3</sup> de água,  $TAS_{FIL}=10$  m/h

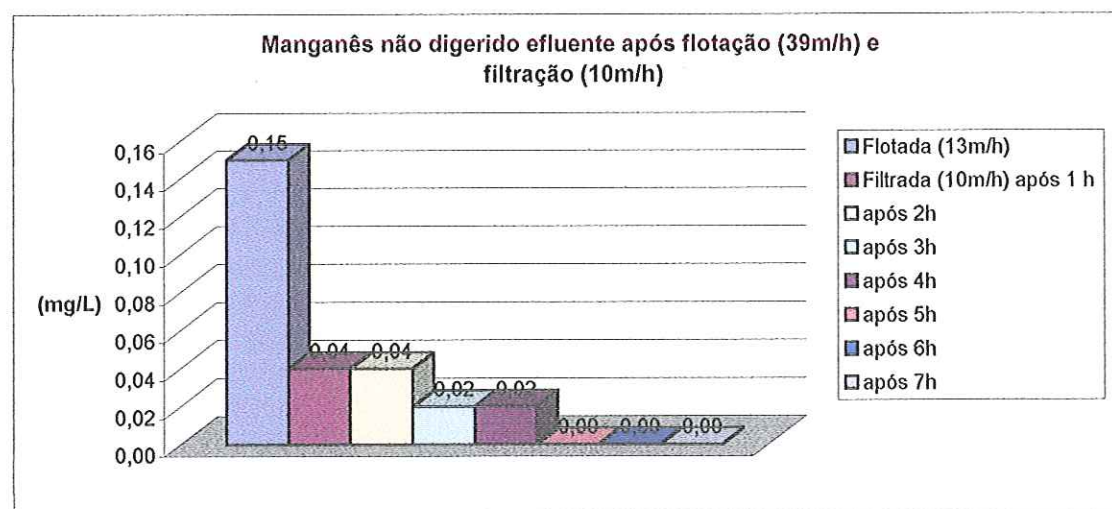


GRÁFICO 5.223 – Manganês não digerido efluente no ensaio de flotação 50 da Fase 5 da ETAPA II. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $TAS=39$  m/h,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60$  s<sup>-1</sup>, pressão de saturação=450 kPa,  $S_{FLO}=5,7$  g de ar/m<sup>3</sup> de água,  $TAS_{FIL}=10$  m/h

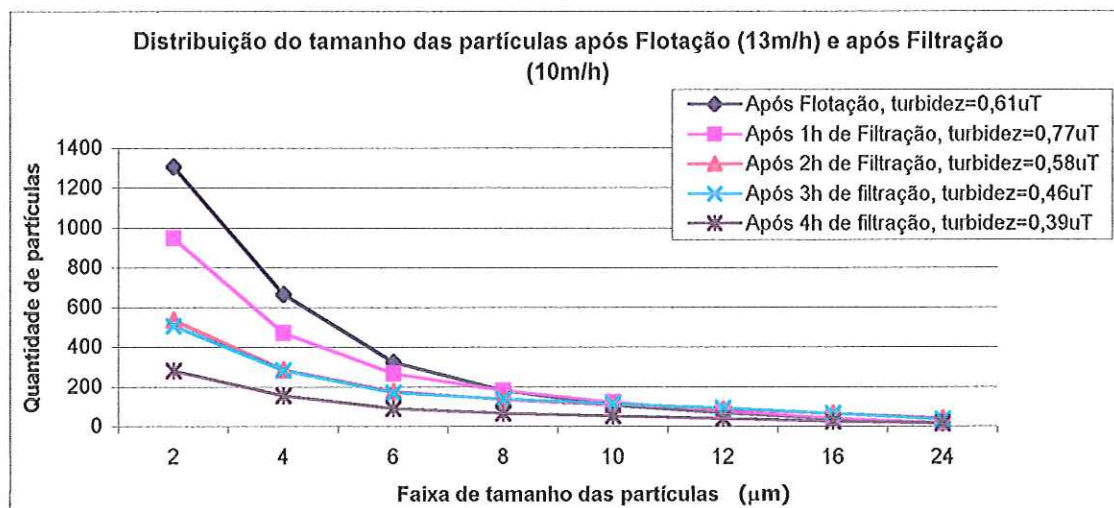


GRÁFICO 5.224 – Distribuição de tamanho das partículas presentes após flotação (TAS=13m/h) e após filtração (TAS=10 m/h). Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60s^{-1}$ , pressão de saturação=450 kPa,  $TAS_{FLO}=13$  m/h,  $S_{FLO}=5,7$  g de  $ar/m^3$  de água,  $TAS_{FIL}=10$  m/h

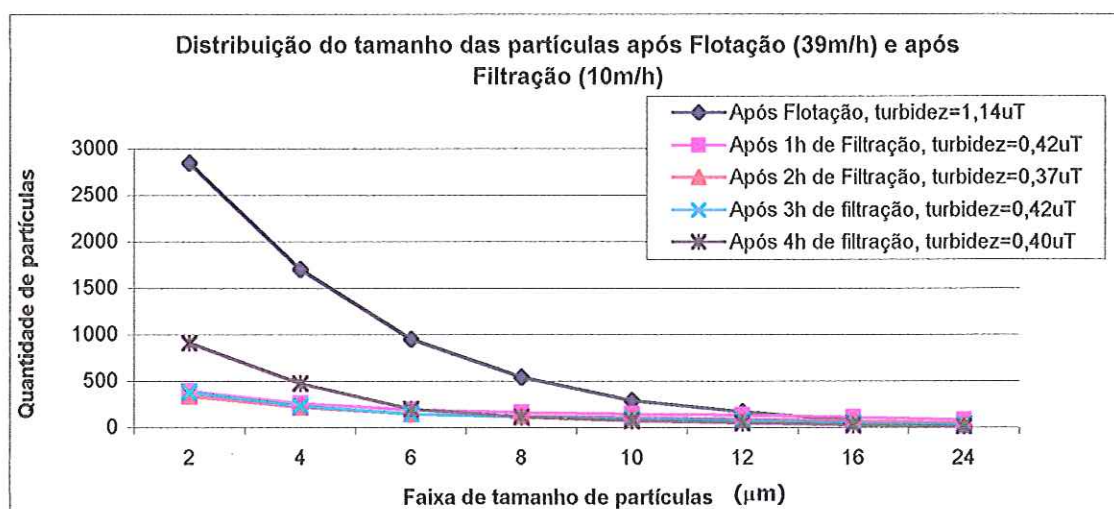


GRÁFICO 5.225 – Distribuição de tamanho das partículas presentes após flotação (TAS=39m/h) e após filtração (TAS=10 m/h). Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60s^{-1}$ , pressão de saturação=450 kPa,  $TAS_{FLO}=39$  m/h,  $S_{FLO}=5,7$  g de  $ar/m^3$  de água,  $TAS_{FIL}=10$  m/h

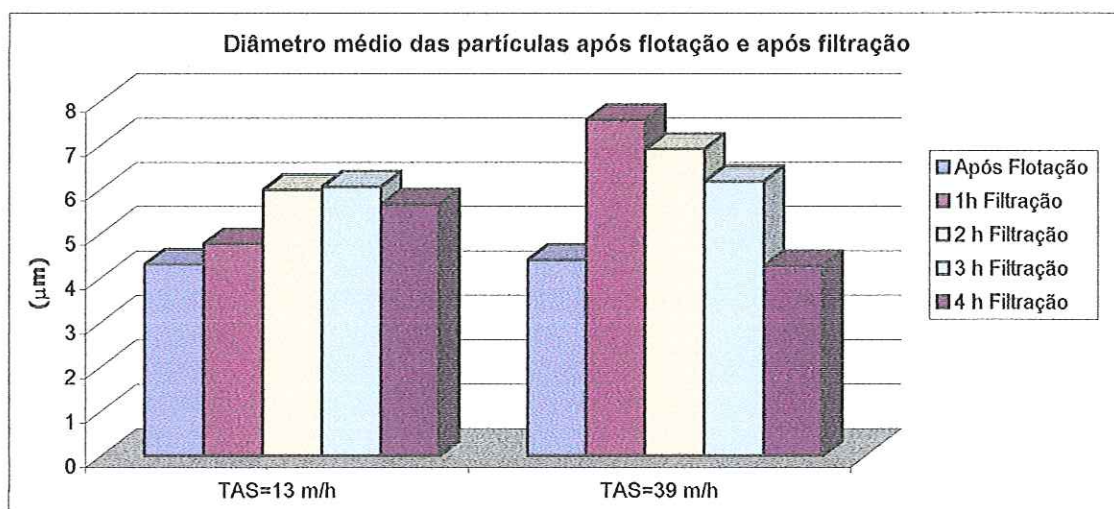


GRÁFICO 5.226 – Diâmetro médio das partículas após flotação e após filtração. Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF=30 mg/L, DCI=2,7 mg/L,  $T_f=20$  minutos,  $G_f=60/60/60s^{-1}$ , pressão de saturação=450 kPa,  $S_{FLO}=5,7$  g de  $ar/m^3$  de água,  $TAS_{FIL}=10$  m/h

TABELA 5.43 – Características principais da água bruta de estudo para os ensaios de 49 e 50 da Fase 5 da ETAPA II.  
Condições dos ensaios: Temperatura = 25 °C

ÁGUA DE ESTUDO													
ENSAIO	pH	Cor Aparente (uC)	Cor Verdadeira (uC)	Turbidez (uT)	Alcalinidade (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Conduti vidade (µS/cm)	ST (mg/L)	SST (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Dist. Tamanho partículas (de 2 a 24 µm)	
												Média*	Desvio
49	7,1	162	39	14,4	22,0	16,3	60,3	10,9	2,3	3,4	0,2	6,09	3,72
50	7,1	162	39	14,4	22,0	16,3	60,3	10,9	2,3	3,4	0,2	6,09	3,72

\*Média ponderada

TABELA 5.44 – Características principais da água coagulada para os ensaios 49 e 50 da Fase 5 da ETAPA II.  
Condições dos ensaios: Tipo1, DCF=30 mg/L, DCI = 2,7 mg/L, Temperatura = 25 °C

ENSAIO	pH	Cor Aparente (uC)	Potencial Zeta (mV)	Turbidez (uT)	ST (mg/L)	SST (mg/L)	Dist. Tamanho partículas 2 a 24 µm	
							Média*	Desvio
49	6,3	223	-3,7±0,9	16,5	17,3	4,6	7,42	4,98
50	6,3	223	-3,7±0,9	16,5	17,3	4,6	7,42	4,98

TABELA 5.45 – Resumo dos resultados das amostras compostas obtidas nos ensaios 49 de flotação e de filtração (Fase 5 da ETAPA II)  
 Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF = 30 mg/L, DCI = 2,7 mg/L, TAS = 13 m/h, pH = 6,3, Pressão de saturação = 450 kPa, Temperatura = 25 °C,  $S_{RLO} = 5,7 \pm 0,1$  g de ar/m<sup>3</sup> de água  
 $TAS_{Filtro} = 10$  m/h

DCF mg/L	TAS (m/h)	Ensaio	Condições	Turbidez (uT)		Cor (uC)		SST (mg/L)		Fe total (digerido mg/L)		Mn total (digerido mg/L)		Distribuição de Tamanho partículas ( 2 a 24 µm)	
				AFL	EFL	AFL	EFL	AFL	EFL	AFL	EFL	AFL	EFL	Média*	Desvio
30	13	49	Após Flotação	14,4	0,61	162	< 2	2,30	< 0,01	3,40	0,26	0,20	0,08	4,30	3,37
			Após 1 h filtração	0,61	0,77	< 2	4	< 0,01	-	0,26	0,16	0,08	0,05	4,76	3,74
			Após 2 h Filtração	0,61	0,58	< 2	< 2	< 0,01	-	0,26	0,14	0,08	0,04	5,98	4,97
			Após 3 h Filtração	0,61	0,46	< 2	< 2	< 0,01	-	0,26	0,12	0,08	0,02	6,05	4,92
			Após 4 h Filtração	0,61	0,39	< 2	< 2	< 0,01	-	0,26	0,10	0,08	0,02	5,64	4,66
			Após 5 h Filtração	0,61	0,39	< 2	< 2	< 0,01	-	0,26	0,11	0,08	0,02	-	-
			Após 6 h Filtração	0,61	0,38	< 2	< 2	< 0,01	-	0,26	0,10	0,08	0,02	-	-
			Após 7 h Filtração	0,61	0,39	< 2	< 2	< 0,01	-	0,26	0,10	0,08	0,02	-	-

\*Média ponderada

TABELA 5.46 – Resumo dos resultados das amostras compostas obtidas nos ensaios 50 de flotação e de filtração (Fase 5 da ETAPA II)  
 Condições dos ensaios: Tipo 1, DCF = 30 mg/L, DCI = 2,7 mg/L, TAS = 13 m/h, pH = 6,3, Pressão de saturação = 450 kPa, Temperatura = 25 °C,  $S_{FLO}=5,7\pm 0,1$  g de ar/m<sup>3</sup> de água  
 $TAS_{Filtro} = 10$  m/h

DCF mg/L	TAS (m/h)	Ensaio	Condições	Turbidez (uT)		Cor (uC)		SST (mg/L)		Fe total (digerido mg/L)		Mn total (digerido mg/L)		Distribuição de Tamanho partículas ( 2 a 24 µm)	
				AFL	EFL	AFL	EFL	AFL	EFL	AFL	EFL	AFL	EFL	Média*	Desvio
30	39	50	Após Flotação	14,4	1,14	162	14	2,30	0,45	3,40	0,74	0,20	0,16	4,44	3,12
			Após 1 h filtração	1,14	0,42	14	3	0,45	-	0,74	0,14	0,16	0,05	7,56	5,83
			Após 2 h Filtração	1,14	0,37	14	< 2	0,45	-	0,74	0,12	0,16	0,04	6,91	5,47
			Após 3 h Filtração	1,14	0,42	14	< 2	0,45	-	0,74	0,11	0,16	0,02	6,17	4,90
			Após 4 h Filtração	1,14	0,40	14	< 2	0,45	-	0,74	0,10	0,16	0,02	4,26	3,37
			Após 5 h Filtração	1,14	0,41	14	< 2	0,45	-	0,74	0,10	0,16	0,02	-	-
			Após 6 h Filtração	1,14	0,40	14	< 2	0,45	-	0,74	0,10	0,16	0,02	-	-
			Após 7 h Filtração	1,14	0,40	14	< 2	0,45	-	0,74	0,10	0,16	0,02	-	-

\*Média ponderada

### 5.5.7. Análise do Oxigênio Dissolvido Presente no Flotador (Fase 6 da ETAPA II)

Em sistemas de tratamento de água para abastecimento, a supersaturação residual, presente em efluentes de unidades de FAD de alta taxa, constitui importante parâmetro relacionado à operação das unidades de filtração subsequentes à flotação, tendo em vista a possibilidade de precipitação e acúmulo nocivo de bolhas de ar no interior do leito filtrante de unidades de filtração existentes à jusante das unidades FAD. Esse risco depende de vários parâmetros: taxas, vazões de recirculação, pressão de saturação, entre outros.

No entanto, esta supersaturação pode ser devida não apenas ao ar efetivamente dissolvido na água, como também à presença de microscópicas bolhas de ar em suspensão na massa líquida. Tais microbolhas, eventualmente, podem ser "arrastadas" com o efluente dessas unidades, devido às taxas nelas aplicadas.

Uma maneira simples para determinar o grau de supersaturação residual seria medida indireta do teor de oxigênio dissolvido (OD) na água e posterior correlação com a concentração de ar dissolvido residual. Mas a presença eventual das microbolhas de ar inviabilizaria a medida de OD através de métodos convencionais (oxímetro ou método de Winckler com modo de coleta tradicional) porque tais métodos não seriam capazes de, com precisão, detectar o oxigênio contido no interior das microbolhas de ar, mas somente o oxigênio efetivamente dissolvido na água. Assim, foram necessários a idealização de modo de coleta capaz de garantir a detecção e quantificação do oxigênio contido nas microbolhas e do oxigênio dissolvido na água, devidamente explicado no item 4.4.2.6. do Capítulo Materiais e Métodos. Foram coletadas amostras em vários pontos ao longo do reator, conforme Figura 5.1 abaixo, para análise do oxigênio através do método Winckler com modo de coleta apropriado para amostras com bolhas de ar.

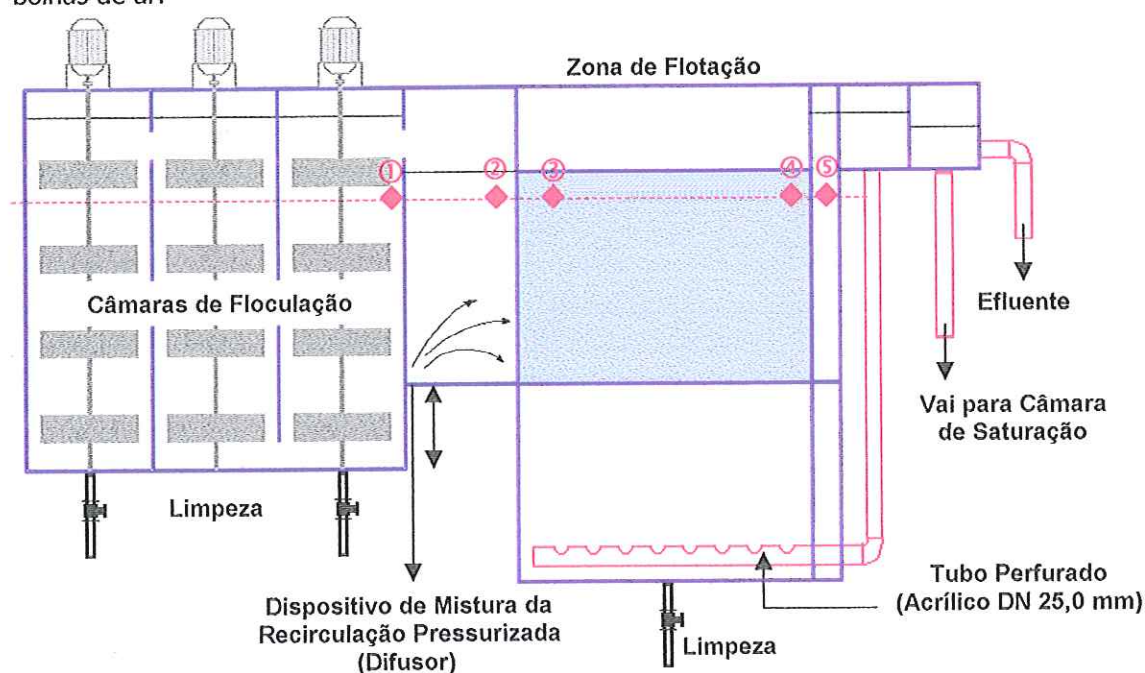


FIGURA 5.1 – Esquema dos pontos de coleta ao longo do reator

A Tabela 5.47 apresenta os resultados obtidos através de método Winckler com modo de coleta tradicional e método Winckler com modo de coleta apropriado para suspensões com bolhas de ar, para água isenta de bolhas de ar e temperatura de 25 °C. Foram realizadas análises em tréplica, com vistas à confirmação dos resultados. Verificou-se que os resultados foram muito semelhantes, confirmando-se a confiabilidade e reprodutibilidade do método com modo de coleta proposto.

TABELA 5.47 – Comparação dos resultados obtidos com utilização dos métodos Winckler com modo de coleta tradicional e Winckler com modo de coleta apropriado para amostras com bolhas de ar, aplicados na determinação de oxigênio dissolvido presente em uma mesma amostra de água isenta de bolhas de ar e temperatura 25 °C.

Métodos	Medidas de oxigênio dissolvido (mg/L)
Winckler com modo de coleta tradicional	7,4
	7,4
	7,3
Winckler com modo de coleta adaptado	7,4
	7,4
	7,4

A Tabela 5.48 apresenta os resultados obtidos através de método Winckler com modo de coleta adaptado, dos referidos pontos ao longo do reator.

TABELA 5.48 – Resultados de oxigênio dissolvido através do método Winckler com modo de coleta adaptado para amostra com bolhas de ar.

Condições de Ensaio: TAS=13 m/h, T<sub>F</sub>=20 minutos, Temperatura=25 °C, Pressão na câmara=450 Kpa, água do poço.

Recirculação	g de ar/ m <sup>3</sup> de água	OD Ponto 1 (mg/L)	OD Ponto 2 (mg/L)	OD Ponto 3 (mg/L)	OD Ponto 4 (mg/L)	OD Ponto 5 (mg/L)	OD Ponto 5 após 15 min (mg/L)
8%	5,7	7,6	13,3	9,0	8,9	8,4	7,5
8%	5,7	7,8	13,8	8,7	9,1	8,5	7,6
8%	5,7	7,6	13,4	8,9	8,8	8,1	7,7
<b>Média</b>		<b>7,7</b>	<b>13,5</b>	<b>8,9</b>	<b>8,9</b>	<b>8,3</b>	<b>7,6</b>
6%	4,3	7,8	11,9	8,7	8,8	8,5	7,6
6%	4,3	7,7	11,1	9,0	9,1	8,0	7,5
6%	4,3	7,6	11,3	8,9	8,7	8,1	7,7
<b>Média</b>		<b>7,7</b>	<b>11,4</b>	<b>8,9</b>	<b>8,9</b>	<b>8,2</b>	<b>7,6</b>
4%	2,9	7,6	10,2	8,8	8,6	8,0	7,5
4%	2,9	7,7	10,9	9,4	9,0	8,4	7,7
4%	2,9	7,5	11,2	9,0	8,7	8,2	7,7
<b>Média</b>		<b>7,6</b>	<b>10,8</b>	<b>9,1</b>	<b>8,8</b>	<b>8,2</b>	<b>7,6</b>

A análise da Tabela 5.48 mostra que, após 15 minutos de repouso, a quantidade de oxigênio dissolvido tornou-se igual à quantidade de oxigênio presente no floculador, ou seja, antes da entrada de ar.

Cálculo da quantidade de  $O_2$  (em microbolhas) arrastado junto ao efluente do flotador para 8% de recirculação:

$$[\text{O.D. no ponto 5} = 8,3 \text{ mg/L}] - [\text{O.D. no ponto 1} = 7,7 \text{ mg/L}] = 0,6 \text{ mg/L}$$

Com o percentual em massa do oxigênio no ar atmosférico = 34%, tem-se:

(Fonte: *Lange's Handbook of Chemistry* apud REALI (1991))

$$\text{Massa de ar arrastado} = 0,6 \text{ mg/L} / 0,34 = 1,76 \text{ g de ar em bolhas/m}^3 \text{ do efluente}$$

Supondo que:

- Todo o ar que entre no leito, a ele fique retido;
- Taxa de filtração de 10,4 m/h, tem-se:

$$\text{Massa de ar por hora para cada m}^2 \text{ de leito: } 1,76 \text{ g de ar/m}^3 \times 10,4 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h} = 18,30 \text{ g/m}^2\text{h}$$

Utilizando a densidade do ar a 25 °C ( $1,25 \times 10^3 \text{ g/m}^3$ ), tem-se:

$$D = \frac{m}{V} \quad (24)$$

Portanto,

$$\text{Volume de ar por hora por m}^2 \text{ de leito: } 18,30 \text{ g} / 1,25 \times 10^3 \text{ g/m}^3 = 0,015 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$$

$$\text{Volume de ar carregado por dia para cada m}^2 \text{ de leito: } 0,351 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{dia}$$

Observa-se que, para taxa de flotação de 13 m/h, significativa quantidade de bolhas de ar foram carregadas para fora do flotador. Se elas tivessem acesso direto à unidades de filtração – como no caso da Flotofiltração – poderiam, para remoção de microbolhas residuais, requerer a adoção de dispositivos específicos como, por exemplo, aqueles descritos por HEDBERG et al (1998) e EDZWALD et al (1999) no item 3.3.7. do capítulo Revisão da Literatura.

Durante esses ensaios, verificou-se massa elevada de ar "arrastado" (dissolvido e na forma de microbolhas) junto ao efluente da unidade FAD de alta taxa. Porém, deve-se considerar o fato de que tais ensaios foram realizados com água limpa, sem prévia coagulação química. Se tivesse havido presença de flocos na zona de reação da unidade de FAD, certamente parte significativa dessas microbolhas, após colisão/aderência com os flocos, seriam removidas do afluente através da zona de acumulação de lodo do flotador.

Recomenda-se a realização de ensaios, para medição do oxigênio dissolvido ao longo do reator, com uso de taxas maiores (26 e 39 m/h), com e sem a presença de flocos.



## 5.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente capítulo é apresentada análise reflexiva acerca das proposições iniciais do trabalho confrontadas com as reais contribuições da presente pesquisa para a área de tratamento de água, assim como as limitações encontradas ao longo do desenvolvimento da mesma.

Esta pesquisa teve como objetivo principal estudar o desempenho da flotação por ar dissolvido de alta taxa aliada a oxidação química no tratamento de água com concentrações de substâncias húmicas, ferro e manganês acima dos padrões de potabilidade.

Para a execução desta pesquisa foi necessária a divisão dos ensaios em duas etapas, ETAPA I constituída de ensaios em escala de laboratório e ETAPA II, constituída de ensaios em escala piloto.

A água de estudo foi alterada com adição de produtos químicos para conferir à água turbidez, cor, ferro e manganês. Essa água de estudo apresentou características muito parecidas a água natural existente no município de Araraquara – SP, que apresenta complexação de parcelas significativas da concentração de ferro com a matéria orgânica presente.

Na ETAPA I, para preparação da água de estudo, como ensaios preliminares, foi necessário atingir a complexação de parcela das concentrações de ferro e manganês com o ácido húmico. Para isso, gastou-se muitos meses de trabalho e essa complexação não era atingida, mesmo testando-se muitos recursos como, por exemplo, tentativa de abaixar o pH para valor em torno de 2,5, aplicação de diálise e outros. Todas essas tentativas estão devidamente detalhadas na dissertação de mestrado de Rodrigo Braga Moruzzi. Finalmente, a complexação foi atingida somente quando se realizou diluição da solução de ácido húmico, antes da introdução do produto químico responsável por conferir a dosagem de ferro desejada. Tal diluição foi realizada de forma que a água de estudo apresentasse uma concentração de ácido húmico de 5 mg/L. Os ensaios realizados com a mesma solução concentrada não obtiveram êxito na complexação. Este fato demonstra a existência de diferença no comportamento das substâncias húmicas, especificamente do ácido húmico, quando a concentração é variada.

Com o término deste estudo preliminar, realizado antes do início da ETAPA I e devidamente apresentado na dissertação de Moruzzi (2000), partiu-se para a realização da Fase 1 da ETAPA I, onde foram analisados os ensaios de flotação por ar dissolvido aliados à oxidação química, em escala de laboratório.

Além de estudar a dosagem de coagulante e pH mais apropriados para a coagulação da água de estudo, um dos objetivos foi verificar a interferência do momento de aplicação do oxidante no comportamento das substâncias húmicas e sua interação com o ferro e o manganês presentes.

Devido à complexidade das estruturas das substâncias húmicas, que são definidas na literatura de maneiras bem diversas, como conseqüência de sua natureza complexa e do fato de não constituírem uma classe definida, mas um grupo dinâmico de compostos heterogêneos que constantemente variam com o tempo e a conjuntura ambiental, não foi possível, com os ensaios realizados nesta pesquisa, uma análise mais detalhada e mais profunda do comportamento do ácido húmico e sua interação com os metais presentes dependendo do momento de aplicação do oxidante. Fica como sugestão para pesquisas futuras, ensaios em laboratório específico, como por exemplo, espectromicroscopia de raio-x com vistas ao monitoramento das possíveis alterações no tamanho e geometria das moléculas de substâncias húmicas e sua interação com os metais na formação de complexos e quelatos, dependendo do momento de aplicação do oxidante.

Nesses ensaios foi possível verificar que a aplicação conjunta de coagulante com o oxidante no momento da mistura rápida (ensaios Tipo 1), forneceu os melhores resultados de remoção de turbidez, cor, ferro e manganês. Também foi possível verificar que as dosagens de coagulante (cloreto férrico) de 15 e 30 mg/L apresentaram resultados muito bons nos valores de pH de 6,3 e 5,9, respectivamente. Entretanto, analisando-se os demais valores de pH e os demais tipos de ensaios (Tipos 2 e 3), verifica-se que a dosagem que forneceu os menores valores residuais de turbidez, cor, ferro e manganês foi a de 30 mg/L, sendo assim selecionada como a mais apropriada para o tratamento da água em questão. É interessante ressaltar que, por razões metodológicas, os parâmetros foram selecionados segundo os melhores resultados fornecidos, mesmo que essa melhora fosse ligeiramente superior. Já no caso de estações de tratamento de água reais, onde o fator econômico é muito importante, uma dosagem menor poderia ser testada.

Um dos pontos considerados como muito importantes dessa fase de estudo foi o estudo de floculação para a FAD. Nesses ensaios, foi possível verificar que, quando analisados turbidez e cor, todos os valores de gradiente médio de velocidade ( $G_F = 40, 60, 70$  e  $80 \text{ s}^{-1}$ ) e tempos de floculação ( $T_F = 5, 10, 15, 20, 25$  e  $30$  minutos) estudados, forneceram bons resultados, comprovando a eficácia da FAD mesmo em baixos valores de tempo de floculação. Entretanto, quando analisada a remoção de ferro e manganês, somente os valores mais elevados de gradiente ( $G_F = 60, 70$  e  $80 \text{ s}^{-1}$ ) aliados a tempos de floculação superiores a 15 minutos ( $T_F = 20, 25$  e  $30$  minutos) forneceram resultados favoráveis. Portanto, de maneira geral, para o valor de pH utilizado (em torno de 6,2), foi necessária a imposição de  $G_F$  e  $T_F$  mais elevados, para obtenção de boa eficiência de remoção de Fe e Mn.

Ainda na ETAPA I, foi estudado a sedimentação (Fase 2) com o objetivo de verificar sua eficiência no tratamento da mesma água de estudo e assim promover a comparação entre os dois tipos de tratamento. Atualmente, muitas estações de tratamento de água utilizam a sedimentação e encontram problemas na remoção do ferro e manganês, principalmente quando há presença de matéria orgânica, mesmo elevando-se o pH para valores propícios para oxidação destes metais. É interessante observar que, para a sedimentação, o valor de pH que

forneceu os melhores resultados foi um valor elevado (pH em torno de 8,5), enquanto a flotação permitiu obtenção de bons resultados de remoção de Fe e Mn em faixa bem mais baixa de pH (em torno de 6,2), valor este onde o potencial zeta encontrava-se bem próximo a zero.

Verifica-se que, para essa água de estudo, a flotação foi mais eficiente que a sedimentação, resultando em menores valores residuais de turbidez, cor e ferro. No caso do ferro, como ocorreu a complexação de parte significativa de sua concentração com a matéria orgânica, muito provavelmente este foi removido junto com a matéria orgânica, de maneira eficiente na FAD em valor de pH em torno de 6,2. No caso do manganês, sua remoção foi similar quando comparada ao resultado fornecido pelo ensaio de sedimentação realizado em pH em torno de 8,5, o qual favorece a cinética da oxidação química do manganês, que não se encontrava significativamente complexado ao ácido húmico.

Terminada a ETAPA I de estudo, partiu-se para a ETAPA II, onde foram realizados ensaios em escala piloto. É interessante ressaltar aqui, a importância dos ensaios de laboratório antecedendo os ensaios em escala piloto. Porém, deve-se reforçar que a eficiência da flotação depende de fatores que são muito diferentes em ensaios de bancada e em ensaios piloto, por isso, alguns dos ensaios foram repetidos com vistas a confirmar o emprego dos ensaios de bancada. Para uma visão mais detalhada dos parâmetros que influenciam na eficiência da FAD, será apresentada a Figura 5.2 que apresenta a estrutura conceitual da FAD, proposta por REALI (1991).

Nessa figura, é possível observar que, a partir de características da unidade de flotação como, por exemplo, dimensões, características hidráulicas, etc., é que ocorrem as oportunidades de contato bolhas/partículas e disso depende a eficiência de remoção das partículas por flotação.

Obviamente que, as dimensões e as características hidráulicas são diferentes no equipamento em escala de laboratório (Flotateste) e na unidade piloto de FAD de alta taxa, principalmente porque nesta última, foi inserido módulo na zona de flotação, o qual a denomina como unidade de terceira geração com escoamento associado a baixos números de Reynolds. Devido a essas diferenças, foram realizados ensaios em bancada, os quais foram repetidos na unidade piloto de alta taxa. A comparação dos resultados dos dois tipos de ensaios confirma a validade dos ensaios de bancada antecedendo os ensaios em escala piloto, quando se deseja a adequação das condições de coagulação e de floculação. Porém, a otimização de parâmetros do processo de flotação de alta taxa, tais como: taxa de aplicação superficial e quantidade de ar requerida deve ser realizada com a unidade piloto.

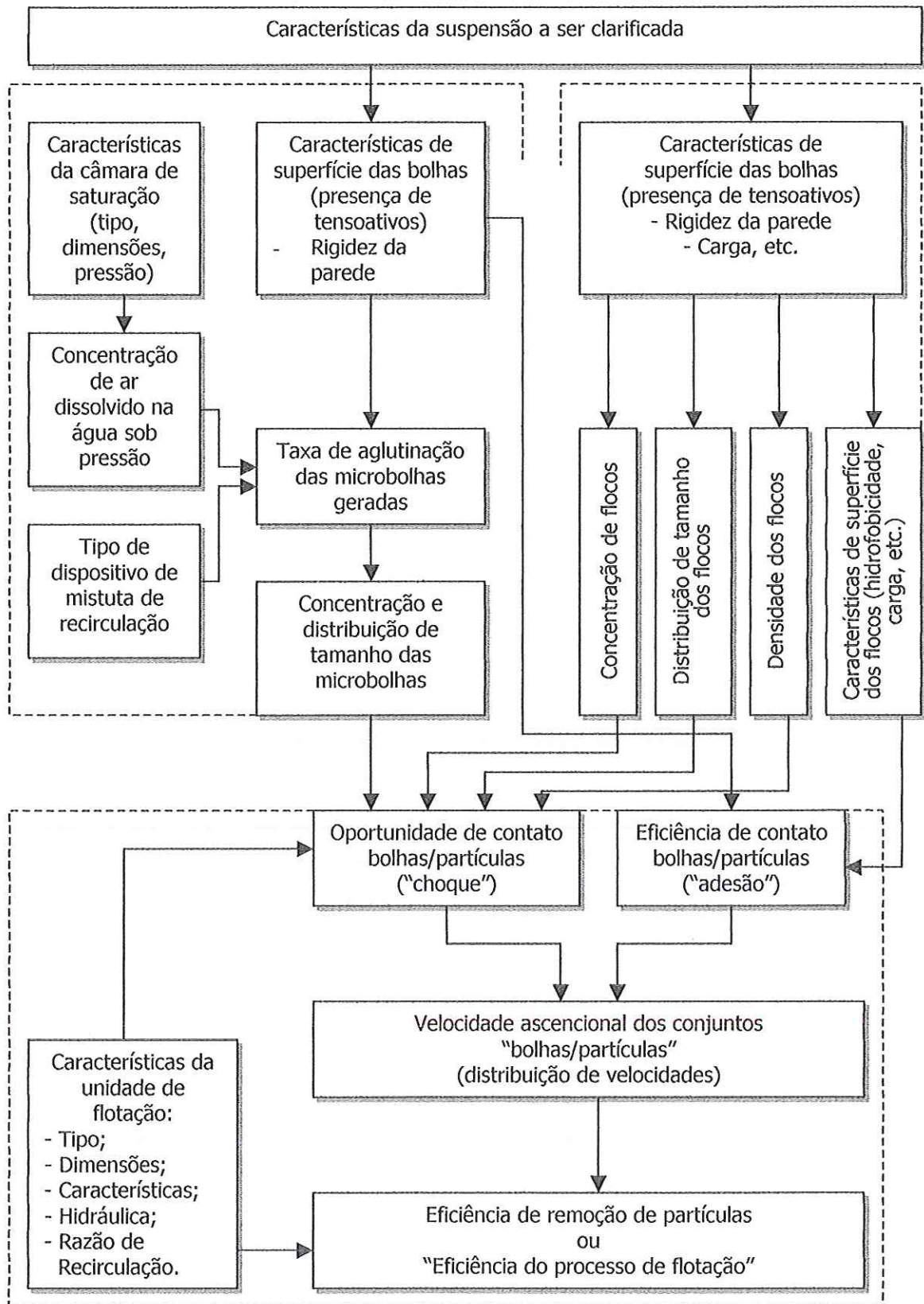


FIGURA 5.2 – Estrutura conceitual da Flotação por ar dissolvido

Fonte: REALI (1991)

Para a realização da ETAPA II de estudo, foi necessária a divisão dos ensaios em 6 fases.

A Fase 3 foi considerada como uma das fases mais importantes dessa etapa, pois nesta fase foi possível avaliar, de maneira integrada, a influência da taxa de aplicação superficial da quantidade de ar fornecida e do tempo de floculação empregados. Assim, observou-se que essa unidade foi capaz de operar com TAS de até 39 m/h, desde que fossem fornecidos 4,3 g de ar/m<sup>3</sup> e tempo de floculação de 20 minutos. Aqui é importante ressaltar que, na literatura, não se tem dados do emprego de unidades de terceira geração com escoamento associado a baixos números de Reynolds para tratamento de águas de abastecimento com concentrações de ferro, manganês e substâncias húmicas acima dos padrões de potabilidade, configurando contribuição significativa para a área, tendo em vista os subsídios fornecidos para o projeto e desenvolvimento desse novo tipo de unidade de flotação.

A Fase 4 de estudo consistiu em ensaios com redução da dosagem de coagulante e ensaios para estudo da influência da concentração de oxidante. Deve-se ressaltar aqui que algumas dúvidas a respeito da oxidação do Mn<sup>+2</sup> e da interação do Fe<sup>+3</sup> e do Mn<sup>+2</sup> com o ácido húmico ainda restaram, ficando assim, como sugestão, a realização de pesquisas futuras em laboratório químico especializado, com vistas à determinação e monitoramento das valências do ferro e do manganês remanescentes na água em cada etapa do tratamento.

No entanto, a Fase 4 foi muito importante, pois confirmou-se a idéia de que parcelas significativas do ferro estiveram complexadas ao ácido húmico e assim foram removidas de maneira eficiente por FAD de alta taxa em valor de pH (em torno de 6,2) propício para remoção de orgânicos. Notou-se que a remoção de ferro com e sem a aplicação do oxidante foi muito semelhante, o que indica que o ferro foi preponderantemente removido por coagulação/floculação/flotação. Já no caso do manganês, nota-se que este não esteve com parcelas significativas de sua concentração complexadas ao ácido húmico, sofreu influência do oxidante e foi parcialmente removido também por oxidação, mesmo em valores de pH em torno de 6,2. Os ensaios dessa fase foram realizados com a utilização de TAS de 13 m/h. Entretanto, deveriam também ser realizados ensaios com taxas de 26 e 39 m/h. Porém, devido ao tempo insuficiente, não foi possível realizá-los, ficando, como sugestão para futuros estudos.

A Fase 5 foi realizada apenas com a finalidade de confirmação da já esperada eficiente remoção de turbidez, cor, ferro e manganês após filtração de dois tipos de efluente do flotador. Um deles foi o efluente dos ensaios no qual utilizou-se taxa de 13 m/h e o outro foi o efluente no qual foi utilizada taxa de 39 m/h. Para trabalhos futuros, fica também a sugestão de um estudo mais aprofundado dessa fase, com investigação de diferentes tipos de meios filtrantes, diferentes taxas de aplicação superficial no filtro e monitoramento detalhado das carreiras de filtração.

Na seqüência, na Fase 6, foram realizados ensaios com o objetivo de verificar o volume de ar carreado por dia para cada m<sup>2</sup> de leito (valor médio de 0,351 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d), o que poderá interferir nas carreiras de filtração, requerendo, em muitos casos, a instalação de dispositivos

---

específicos no flotador para a retirada dessas bolhas antes da entrada nos filtros. Esses ensaios foram realizados com taxa no flotador de 13 m/h, ficando como sugestão, realizar esses ensaios também com taxas de 26 e 39 m/h, com e sem a presença de flocos. Durante os ensaios, verificou-se massa elevada de ar "arrastado" (dissolvido e na forma de microbolhas) junto ao efluente da unidade de FAD de alta taxa. Porém, deve-se considerar o fato de que tais ensaios foram realizados com água potável (proveniente de poço profundo do Campus da USP – São Carlos), sem prévia coagulação química. Caso houvesse a presença de flocos na zona de reação da unidade de FAD, certamente parte significativa dessas microbolhas, após colisão/aderência com os flocos, seriam removidas para a zona de acumulação de lodo do flotador, diminuindo a concentração de microbolhas arrastadas para fora do reator.

## 6. CONCLUSÕES

A partir de resultados obtidos na ETAPA I de estudo, realizados com a instalação de flotação e de sedimentação em colunas, em escala de laboratório, alimentadas com água bruta de estudo (com 5,0 mg/L de ácido húmico, turbidez em torno de 15 uT, cor aparente em torno de 120 uC, ferro em torno de 3,40 mg/L e manganês em torno de 0,20 mg/L), são possíveis as seguintes conclusões:

- Dentre os valores de dosagem de coagulante (cloreto férrico) investigados (na faixa de 15 a 35 mg/L) o valor de 30 mg/L associado ao pH em torno de 6,2 e à aplicação de 2,7 mg/L de cloro, na forma de hipoclorito de sódio, apresentou os melhores resultados de remoção de cor, turbidez, ferro e manganês, nos ensaios de flotação em escala de laboratório.
- Dentre os três modos de aplicação de oxidante (cloro) investigados – antes, durante a mistura rápida do coagulante ou após a flotação – a aplicação conjunta do oxidante e do coagulante proporcionou as melhores eficiências de remoção de turbidez, cor aparente, ferro e manganês, nos ensaios de flotação em escala de laboratório.
- Dentre os valores de gradiente médio de velocidade na floculação ( $40$  a  $60\text{ s}^{-1}$ ) e de tempo de floculação estudados (5, 10, 15, 20, 25 e 30 minutos), a faixa de  $60$  a  $80\text{ s}^{-1}$  proporcionou as melhores condições de flotação para todos os valores de tempo de floculação e forneceu os melhores resultados de remoção de turbidez, cor, ferro e manganês. Os residuais de ferro e manganês encontraram-se abaixo dos limites impostos pelos padrões de potabilidade somente com adoção de tempos de floculação acima de 15 minutos, apresentando turbidez residual em torno de 0,7 uT, cor aparente residual menor que 2 uC, ferro total residual em torno de 0,25 mg/L e manganês total residual em torno de 0,09 mg/L. Ressalta-se que tais valores residuais referem-se ao efluente da flotação, antes da etapa final de filtração.
- Dentre os valores de dosagem de coagulante investigados (30 a 45 mg/L), o valor de 30 mg/L associado ao valor de pH em torno de 8,5 e à aplicação de 2,7 mg/L de cloro, forneceu os melhores resultados de remoção, por sedimentação, de turbidez, ferro e manganês. O modo de aplicação do oxidante (cloro) durante a mistura rápida mostrou-se mais vantajoso que os outros dois modos investigados (antes da mistura rápida ou após a sedimentação).

- As melhores condições de floculação (associadas a 30 mg/L de coagulante e a 2,7 mg/L de oxidante) visando decantação da água de estudo para pH em torno de 8,5, foram obtidas com a imposição de gradiente médio de velocidade em torno de  $60 \text{ s}^{-1}$  aliado a tempo de floculação de 35 minutos, fornecendo residuais de 2,1 uT de turbidez, 35 uC de cor aparente, 1,06 mg/L de ferro e 0,14 mg/L de manganês.
- A comparação entre clarificação por flotação por ar dissolvido e por sedimentação da água de estudo, consideradas as melhores condições de coagulação e de floculação, mostra que a flotação apresentou resultados de remoção de turbidez, cor aparente e ferro muito superiores aos obtidos nos ensaios de sedimentação em colunas de laboratório. Porém, a remoção de manganês foi similar, quando comparada ao ensaio de sedimentação realizado em pH mais elevado (em torno de 8,5), no qual ocorre favorecimento da cinética da oxidação química do manganês, que não se encontrava significativamente complexado ao ácido húmico presente em solução.

A partir de resultados obtidos na ETAPA II de estudo, realizados com instalação de flotação por ar dissolvido lamelar com alta taxa e escoamento horizontal, em escala piloto, alimentada com água bruta de estudo (com 5,0 mg/L de ácido húmico, turbidez em torno de 15 uT, cor aparente em torno de 120 uC, ferro em torno de 3,40 mg/L e manganês em torno de 0,20 mg/L), são possíveis as seguintes conclusões:

- A unidade piloto de flotação lamelar de alta taxa com escoamento horizontal apresentou elevada eficiência de clarificação da água de estudo após prévia adequação das condições de oxidação química, coagulação e floculação em equipamento em escala de laboratório. Essa unidade foi capaz de operar, com excelente desempenho, com taxas de até 39 m/h, desde que fossem fornecidos  $4,3 \text{ g de ar/m}^3$  de água e tempo de floculação de 20 minutos.
- Dentre o conjunto de condições operacionais da unidade piloto estudada, foi considerado como mais vantajoso para a água em questão: taxa de aplicação superficial no flotador de 26 m/h, tempo de floculação de 15 minutos, gradiente médio de velocidade na floculação de  $60/60/60 \text{ s}^{-1}$  e  $5,7 \text{ g de ar/m}^3$  de água. Nessas condições foram obtidos: 0,79 uT de turbidez residual, 5 uC de cor aparente, 0,52 mg/L de ferro residual e 0,10 mg/L de manganês residual.
- O gradiente médio de velocidade na floculação em torno de  $60 \text{ s}^{-1}$ , tido como adequado para operação da instalação piloto, confirmou a indicação obtida através da realização de ensaios em escala de laboratório (faixa de 60 a  $80 \text{ s}^{-1}$ ). Isto corrobora a validade do emprego de ensaios, em escala de laboratório (batelada), para obtenção não só das



---

condições mais adequadas à coagulação e oxidação química, como também para floculação com vistas à flotação.

- O aumento do tempo de floculação influenciou, razoavelmente, na remoção de ferro, principalmente para taxa de 39 m/h, na qual o tempo de floculação de 20 minutos apresentou os melhores resultados. O ferro foi, preponderantemente, removido por coagulação/floculação/flotação, pois parcelas significativas de sua concentração estiveram complexadas à matéria orgânica (ácido húmico).
- Para taxa de 13 m/h, foi verificado arraste de microbolhas residuais junto ao efluente do flotador de alta taxa (valor médio de  $0,351 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ dia}$ ).

## 7. SUGESTÕES

A instalação de flotação por ar dissolvido lamelar com alta taxa e escoamento horizontal, em escala piloto, alimentada com água bruta de estudo (com 5,0 mg/L de ácido húmico, turbidez em torno de 15 uT, cor aparente em torno de 120 uC, ferro em torno de 3,40 mg/L e manganês em torno de 0,20 mg/L), permite sugestões:

- Monitorar possíveis alterações no tamanho e geometria das moléculas de substâncias húmicas e suas interações com os metais na formação de complexos e quelatos, dependendo do momento de aplicação do oxidante, com ensaios em laboratório específico, como por exemplo, espectromicroscopia de raio-X.
- Estudar o desempenho da unidade piloto de flotação por ar dissolvido lamelar de alta taxa e escoamento horizontal com aplicação de taxas entre 26 e 39 m/h com vistas a encontrar limite mais seguro.
- Estudar o desempenho dessa unidade com aplicação de taxas maiores que 39 m/h aliadas a maiores tempos de floculação.
- Estudar de maneira específica, a distribuição ideal de tamanho de flocos para a flotação, com emprego de métodos fotográficos para análise por imagens.
- Estudar o desempenho da unidade piloto de estudo, com aplicação de taxas maiores que 13 m/h com e sem aplicação do oxidante e, também, com junção de outros oxidantes, como permanganato de potássio, por exemplo.
- Determinar e monitorar, em laboratório químico especializado, as valências do ferro e do manganês remanescentes na água em cada etapa do tratamento.
- Estudar mais profundamente a influência da taxa de flotação na eficiência do subsequente processo de filtração, a fim de se obter dados mais conclusivos que os aqui discutidos..
- Estudar, de maneira mais aprofundada, a filtração como, por exemplo, investigar diferentes taxas de aplicação superficial no filtro, diferentes meios filtrantes e monitorar, de maneira detalhada, as carreiras de filtração.

- Investigar e calcular a quantidade de ar que poderá ser carregada para os filtros, para altas taxas de aplicação superficial no flotador (maiores que 13 m/h), com e sem a presença de flocos.
- Convém ter muita cautela quando houver elevadas concentrações, principalmente de manganês não complexado pois, nesses casos, seria necessário a obtenção de coagulação química em valores de pH mais elevados, com vistas ao favorecimento da cinética do processo de oxidação química desses íons metálicos.
- Quando usar taxas de flotação de 39 m/h convém, também, cautela, tendo em vista possíveis problemas com queda da eficiência da filtração na retenção de partículas na faixa de 2 a 8  $\mu\text{m}$ .

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEKSANDROVA, L. N. (1975). Nomenclature used in study of soil humus. *Soviet Soil Science*, v.7, n.1, p.96-100.
- AMATO, T.; EDZWALD, J. K.; TOBIASON, J. E.; DAHLQUIST, J. & HEDBERG, T. (2000). DAFRapide®: The Integrated approach to dissolved air flotation. **The 4<sup>th</sup> International Conference: Flotation In Water and Wastewater Treatment – Conference Proceedings**. Helsinki, Finland 11-14, September (2000). International Water Association – IWA, 2000.
- AZIZ, H. A.; SMITH, P. G. (1992). The influence of pH and coarse media on manganese precipitation from water. *Water Research*, v. 26, n.6, p. 853-855.
- BECKETT, R. (1990). The surface chemistry of humic substances in aquatic systems. In: BECKETT, R., ed. *Surface and colloid chemistry in natural waters and water treatment*. New York, Plenum Press, p. 3-20.
- BENEFIELD, MORGAN (1990). *Chemical Precipitation*. Water Quality and Treatment.
- BOYLE, E.A, et al. (1977). The mechanism of iron removal in estuaries, Geochin, Cosmochin, *Acta*, 41:1313-1324.
- BLOOM, F.; HEINDEL, T. J. (1997). A theoretical model of flotation de-inking efficiency. *J. Colloid Interface Science*. 190, pp.182-197.
- CAMPOS, J. S. (1972). Ensaio sobre a aplicação de polieletrólitos na floculação de águas de abastecimento. São Carlos. 97 p., Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CARLSON, K. H.; KNOCHÉ, W. R.; GERTIG, K. R. (1997). Optimizing treatment through Fe and Mn fractionation. *Journal AWWA*, v.89, n.4, p. 162-171, Abril.
- CLEASBY, J. J. (1975). Iron and manganese removal: a case study. *Journal AWWA*, v.67, n.3, Mar.

- CLEASBY, J. J. (1983). *Iron and manganese removal*. Iowa State University.
- COELHO, E. R. C.; REALI, M. A. P.; CAMPOS, J. R. (1991). Emprego da flotação por ar dissolvido na clarificação de águas para abastecimento: Influência da taxa de aplicação superficial. In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL- ABES, 1991, Goiânia-GO. **Anais do XVI Congresso da ABES-91**. Goiânia, GO-Brasil: Editora da Abes, 1991, v.2, p.215-231.
- COLLINS, G. L.; JAMESON, G. J. (1976). Experiments on the flotation of fine particles. *Chemical Engineer Science*. vol.31, pp.985-991.
- CULP, G. L. (1974). *New concepts in water purification*. (Van Nostrand Reinhold environmental engineering series).
- DI BERNARDO, L. (1993). *Métodos e técnicas de tratamento de água*. Rio de Janeiro, ABES, 2v.
- DOMBROSKI, S. A. G. (1996). Influência das condições de floculação na eficiência da flotação por ar dissolvido de alta taxa aplicada ao tratamento de água de abastecimento. São Carlos. 199 p., Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- DOMBROSKI, S. A. G.; REALI, M. A. P.; MARCHETTO, M. (1996). Método eficiente para o tratamento de água com cor elevada e baixa turbidez. In: III SIMPÓSIO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1996, Gramado-RS. **Anais Eletrônicos do III SIBESA**. Gramado – RS: ABES, 1996, v.1, disco.
- EDZWALD, J.K.; HALF, J.D.; BOAK, J.W. (1977). Polymer coagulation of humic acid waters. *Journal of the Environmental Engineering Division*, p.979-1000, dec.
- EDZWALD, J. K.; TOBIASON, J. E.; AMATO, T. & MAGGI, L. J. (1999). Integrating high-rate DAF technology into plant design. *Journal AWWA*, v. 91, n.12, Dec.
- EDZWALD, J. K. (1995). Principles and applications of dissolved air flotation. In: IVES, K. J.; BERNHARDT, H. J., eds. Flotation Processes in water and sludge treatment. *Water Science & Technology*. Great Britain, v.31, n.3-4, p.1-23.
- EDZWALD, J. K., WALSH, J. P., KAMINSKY, G. S., DUNN, H. J. (1992). Flocculation and air requirements for dissolved air flotation. *Journal AWWA – Research and Technology*, p. 92 – 100, Mar.

- EDZWALD, J. K. et al (1992). Flocculation and air requirements for dissolved air flotation. *Journal AWWA*, 84: 3 : 92, Mar.
- EDZWALD, J. K. (1995). Principles and Applications of Dissolved Air Flotation. *Water Science & Technology*, 31: 3 / 4: 1.
- FERGUSON, C.; LOGSDON, G. S.; CURLEY, D. (1995). Comparison of dissolve air flotation and direct filtration. *Water Science and Technology*, v.31, n.3-4, p.113-124.
- FILHO (1964). *Água, Tratamento e Qualidade*. Rio de Janeiro. Capítulo 14.
- GALVIN, R. M. (1996). Occurrence of metals in waters: an overview. *Water AS*, v.22, n.1, p.7-18, Jan.
- GLAZE, W. H. (1987). Oxidation of organic substances in drinking water. In: BERGER, B. B. ed. *Control of organic substances in water and wastewater*. USA: Noyes data corporation. Cap.5, p.148-170.
- GOUZINIS, A. et al (1998). Removal of Mn and simultaneous removal of NH<sub>3</sub> Fe and Mn from potable water using a trickling filter. *Water Research*, v.32, n.8, p. 2442-2450.
- HEDBERG, T.; DAHLQUIST, J.; KARLSSON, D.; SORMAN, L. O. (1998) – Development of an air removal system for dissolved air flotation. *Water Science & Technology*. vol 37, n.9, pp. 81-88.
- HEINANEN, J.; JOKELA, P.; ALA-PEIJARI, T. (1995). Use of dissolved air flotation in potable water treatment in Finland. In: IVES, K. J.; BERNHARDT, H. J., eds. Flotation processes in water and sludge treatment. *Water Science & Technology*. Great Britain, v.31, n.3-4, p.225-238.
- INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 1996. Cidade do México. **Anais Magnéticos do XXV Congresso AIDIS/96**. Cidade do México: AIDIS, 1996, v.1, disco.
- JOHNSON, D. J.; JENSEN, J. N. (1986). THM and TOX formation: routes, rates and precursors. In: *Journal AWWA. Research & Technology*, p. 156-162, Apr.

- KIURU, H. J. (2000). Development of dissolved air flotation technology from the 1<sup>st</sup> generation to the newest or 3<sup>rd</sup> one (very thick micro-bubble bed) with high flow-rates (DAF in turbulent flow conditions). **The 4<sup>th</sup> International Conference: Flotation In Water and Wastewater Treatment – Conference Proceedings**. Helsinki, Finland 11-14, September (2000). International Water Association – IWA, 2000.
- KNOCHE, W. R.; BENSCHOTEN, KEARNEY, SOBORSKI & RECKHOW (1991). Kinetics of manganese and iron oxidation by potassium permanganate and chlorine dioxide. *Journal AWWA*, v.83, n.6, p. 80-87, Junho.
- KROFTA, M., WANG, L. K. (1982). Potable water treatment by dissolved air flotation and filtration. *Journal AWWA – Research and Technology*, v. 74, n. 6, p. 305 – 310, Jun.
- LEPPINEN, D. M. (2000). A kinetic model of dissolved air flotation including the effects of interparticle forces. *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA*, pp. 259-268.
- LIERS, S.; BAEYENS, J.; MOCHTAR, I. (1996). Modeling dissolved air flotation. *Water Environment Research*. V. 68, n. 6, pp.1061-1075, Set/Oct.
- LIERS, S., BAEYENS, J., MOCHTAR, J. (1996). Modeling dissolved air flotation. *Water Environment Research*. v. 68, n. 6, Sep/Oct.
- LOBATO, S. J. M.; REALI, M. A. P.; FAITANIN, L.(1995). O sucesso da flotação por ar dissolvido no pré-tratamento da água bruta da ETA-Meaípe-ES. IN: XVIII CONGRESSO ABES, 1995, Salvador. **Anais Eletrônicos do XVIII Congresso da ABES**. Salvador – BA: ABES, 1995, v.1, disco.
- LUNDGREEN, H. (1970). *Recent advances in air flotation technology*. Tappi, v.53, n.2, p. 287 – 289, Feb.
- LYBERATOS, VAYENAS, KOSMIDIS & GOUZINIS (1998). Removal of Mn and simultaneous removal of NH<sub>3</sub>, Fe and Mn from potable water using a trickling filter. *Wat. Res.* vol.32, n.8, pp.2442-2450
- MALLEY, J. P.; EDZWALD, J. K.(1991). Concepts for dissolved air flotation treatment of drinking waters. *Journal Water Supply Res. & Technology (Aqua)*. v.40, pp. 7-17.

- MARCHETTO, M. (1996). Estudo de uma unidade de flotação por ar dissolvido com escoamento horizontal entre placas aplicada ao tratamento de água de abastecimento. São Carlos. 179 p., Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MARCHETTO, M.; REALI, M. A. P. (1997). Influência do ângulo de inclinação das placas no desempenho de uma unidade original de flotação de alta taxa. In: 190 CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1997. Foz do Iguaçu. **Anais Digitais, Rio de Janeiro: ABES, 1997**. Foz do Iguaçu-PR: ABES, 1997, v.1, disco.
- MARCHETTO, M.; REALI, M. A. P. (1997). Concepção moderna de unidades de flotação aplicadas ao tratamento de água. In: SIMPOSIO INTERNAZIONALE DI INGENIERIA SANITARIA AMBIENTAL, 1997, Ravello. **Anais do SIDISA/97, Ravello: ATTI, 1997**. Ravello-Italia: SIDISA, 1997, v.2, p. 758-765.
- MARCHIORETTO, M. M.; REALI, M. A. P. (1997). Estudo das condições ótimas de coagulação/floculação com sulfato de alumínio visando a flotação de água para abastecimento contendo turbidez elevada e cor moderada. In: 49a REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA PARA O PROGRESSO DA CIÊNCIA - SBPC, 1997. Belo Horizonte. **Anais: SBPC, 1997**. Belo Horizonte – MG: SBPC, 1997, v.1, disco.
- MICHALAKOS, G. D.; NIEVA, VAYENAS E LIBERATOS (1997). Removal of iron from potable water using a tricliling filter. *Water Research*, v.31, n.5, p.991-996.
- MYNENI, S. C. B. et al. (1999). Imaging of humic substance macromolecular structures in water and soils. *Science*, v.286, n.12, nov.
- MORUZZI, R. B.; PATRIZZI, L. J.; REALI, LM. A. P. (2001). Remoção de Ferro e Manganês complexados com ácido húmico presentes em águas para abastecimento utilizando a flotação. In: XXI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2001, João Pessoa. **Anais Digitais do XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Rio de Janeiro: ABES, 2001, v.1, p. 01-10.
- MORUZZI, R. B. (2000). Tratamento de água para abastecimento, através da flotação por ar dissolvido e/ou oxidação química, preparada com baixa turbidez e concentração moderadamente elevada de formas complexadas de ferro e manganês com o ácido húmico. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos- Universidade de São Paulo.



- NICKOLS, D.; SCHNEIDER, O. D.; LEGGIERO, S. (2000). Pilot-Testing of high rate DAF for New York City. **The 4<sup>th</sup> International Conference: Flotation In Water and Wastewater Treatment – Conference Proceedings**. Helsinki, Finland 11-14, September (2000). International Water Association – IWA, 2000.
- O'CONNOR, J. T. (1971). Iron and manganese. In: AWWA. Water quality and treatment. *A Handbook of Public Water Supplies*. 3. edição, cap. 11, p. 378-396.
- OFFRINGA, G. (1995). Dissolved air flotation in Southern Africa. In: IVES, K. J., BERNHARDT, H. J., eds. Flotation processes in water and sludge treatment. *Water Science & Technology*, Great Britain, v. 31, n. 3 - 4, p. 159 - 172.
- OKADA, K.; AKAGI, Y.; KOGURE, M.; YOSHIOKA, N. (1990). Analysis of particle trajectories of small particles in flotation when the particles and bubbles are both charged. *Chemical Engineer*. vol.68, pp.614-621.
- PATRIZZI, L. J.; REALI, M. A. P.; CORDEIRO, J. S. (1999). Redução de volume de lodo gerado em decantadores de ETAs utilizando espessamento por flotação e por gravidade. In: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1999. Rio de Janeiro. **ABES Rio 99: XX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Rio de Janeiro.
- PORTO, T. G. (2001). Tratamento avançado de esgoto sanitário em sistema seqüencial composto por processo biológico anaeróbio, flotação, filtração em areia e em membrana. São Carlos, 144p., Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- REALI, M. A. P., CAMPOS, J. R. (1992). Projeto de câmaras de saturação de sistemas de flotação por ar dissolvido, com recheio de pvc.. In: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 23, La Habana, Cuba, 1992. Anais. v.2, parte 1, La Habana, Cuba, AIDIS. P. 283 – 296.
- REALI, M. A. P. (1984). Aplicação da flotação por ar dissolvido ao tratamento de águas de abastecimento. São Carlos, 186p., Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

- REALI, M. A. P. (1991). Concepção e avaliação de um sistema compacto para tratamento de águas de abastecimento utilizando o processo de flotação por ar dissolvido e filtração com taxa declinante. São Carlos. 373p., 2v. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- REALI, M. A. P.; CAMPOS, J. R. (1993). Proposição e avaliação de um sistema compacto para tratamento de água utilizando o processo de flotação por ar dissolvido e filtração com taxa declinante. In: XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL – ABES 93, 1993, Natal. **Anais do XVII Congresso da ABES-93**. Natal-RN, Brasil: Editora da ABES, 1993, v.2, p.243-264.
- REALI, M. A. P.; CAMPOS, J. R. (1995). Optimization of colour removal using a batch flotation test. In: WORLD WIDE SYMPOSIUM: POLLUTION IN LARGE CITIES-SCIENCE AND TECHNOLOGY FOR PLANNING ENVIRONMENTAL QUALITY, 1995. Pádua, **Proceedings: 2nd SIBESA – ABES/ANDIS, 1995**. Venice-Pádua, Itália: ABES/ANDES, 1995. v.1, p. 199-210.
- REALI, M. A. P.; GIANOTTI, E. P. (1993). Remoção de algas por flotação: Testes de laboratório. In: XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL-1993, Natal-RN. **Anais do XVII Congresso da ABES-93**. Natal – RN, Brasil: Editora da ABES, 1993, v.2, p.229-242.
- REALI, M. A. P.; DOMBROSKI, S. A. G. (1996). Influência da floculação na flotação por ar dissolvido. In: XXV CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 1996. Cidade do México. **Anais do XXV Congresso da AIDIS/96**. Cidade do México; AIDIS, 1996, v.1, disco.
- REALI, M. A. P.; SANTOS, S. P. (1996). Flotação por ar dissolvido em escala piloto com escoamento vertical entre placas para remoção de algas em águas de abastecimento. In: XXV CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 1996. Cidade do México. **Anais Digitais do XXV Congresso da AIDIS/96**. Cidade do México: AIDIS, 1996, v.1, disco.
- REALI, M. A. P.; SARTORI, L. (1998). Utilização de polímeros sintéticos como auxiliares de floculação na flotação. In: XXVI CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 1998, Lima-Peru. **Anais Digitais do XXVI Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitaria Y Ambiental – AIDIS**. Lima-Peru: Asociación Peruana de Ingenieria Sanitaria, 1998.

- REALI, M. A. P.; SARTORI, L. (2000). The use of polymer as flotation aid in water treatment. In: THE 4<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE: FLOTATION IN WATER AND WASTEWATER TREATMENT, 2000, Helsinki. **The 4<sup>th</sup> International Conference: Flotation In Water and Wastewater Treatment – Conference Proceedings**. Helsinki: International Water Association – IWA, 2000, v.1, p.1-9.
- REALI, M. A. P.; MARCHETTO, M. (2000). High rate DAF unit applied for water treatment. In: THE 4<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE: FLOTATION IN WATER AND WASTEWATER TREATMENT, 2000, Helsinki. **The 4<sup>th</sup> International Conference: Flotation In Water and Wastewater Treatment – Conference Proceedings**. Helsinki: International Water Association – IWA, 2000, v.1, p.1-9.
- REALI, M. A. P.; PATRIZZI, L. J.; CORDEIRO, J. S. (2000). Comparison of thickening of sludges from two water treatment plants using DAF and gravity. In: THE 4<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE: FLOTATION IN WATER AND WASTEWATER TREATMENT, 2000, Helsinki. **The 4<sup>th</sup> International Conference: Flotation In Water and Wastewater Treatment – Conference Proceedings**. Helsinki: International Water Association – IWA, 2000, v.1, p.1-9.
- REES, A. J.; RODMAN, D. J.; ZABEL, T. F. (1979). Evaluation of dissolved air flotation saturator performance. Medmenham (*Water Research Centre Technical Report – Technical Report TR-143*).
- RICHTER, C. A.; AZEVEDO NETTO, J. M. (1991). *Tratamento de água: tecnologia atualizada*. São Paulo, Edgard Bluscher.
- RICHTER, C.; GROSS, F. (2000). Dissolved air flotation in Latin America. **The 4<sup>th</sup> International Conference: Flotation In Water and Wastewater Treatment – Conference Proceedings**. Helsinki: International Water Association, IWA, 2000, v.1, p.1-9.
- ROZEMA, T. (1998). Toxicidade de metais em humanos. *Revista de Oxidologia*, p. 22-30, Nov/Dez.
- SANTAELLA, S. T. (1987). Caracterização e propriedades coloidais de ácido húmico. São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Química, Universidade Federal de São Carlos.

- SANTAELLA, S.T. (1993). Remoção de cor causada pela presença de substâncias húmicas em águas, empregando tratamento biológico. São Carlos. 161p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SANTOS, S. P.; REALI, M. A. P. (1996). Emprego de uma unidade de flotação por ar dissolvido em escala de laboratório para remoção de algas em águas de abastecimento. In: III SIMPÓSIO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1996. Gramado-RS. **Anais Magnéticos do III SIBESA – 1996**. Gramado-RS: ABES, 1996, v.1, disco.
- SARTORI, L. (1998). Influência do uso de polímeros sintéticos no desempenho da FAD aplicada no tratamento de água para abastecimento. São Carlos. 191p., Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SARTORI, L.; REALI, M. A. P. (1999). Diminuição da dosagem de coagulante primário através da aplicação de polímeros sintéticos na flotação de águas para abastecimento. In: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1999. Rio de Janeiro. **ABES Rio 99: XX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1999.
- SCHNITZER M., KHAN, S.U. *Humic Substances in Environment*. Dekker, New York, 1972.
- SCHNITZER et al (1971). Metal organic matter interactions in soils and waters. *Organic Compounds in Aquatic Environments*. New York. p.297
- SCHOFIELD, T. (2001). Dissolved air flotation in drinking water production. *Water Science and Technology*. vol. 43, n. 8, p. 9-18.
- SNOEYINK, V. L.; JENKINS, D. (1980). *Water Chemistry*. New York, John Wiley & Sons.
- STUMM, W.; MORGAN, J. J. (1981). *Aquatic chemistry: an introduction emphasizing chemical equilibrium in natural waters*. 2 edição. New York, John Wiley & Sons.
- TOLEDO, A .P.P. (1973). Contribuição ao estudo físico-químico de ácido húmico extraído de sedimento. São Paulo. 122 p. Dissertação (Mestrado) -Instituto de Química, Universidade de São Paulo.

- 
- VAN PUFFELEN, J., BUIJS, P. J., NUHN, P. N. A. M., HIJNEN, W. A. M. (1995). Dissolved air flotation in potable water treatment: the Dutch experience. In: IVES, K. J., BERNHARDT, H. J., eds. Flotation processes in water and sludge treatment. *Water Science & Technology*, Great Britain, v. 31, n. 3 - 4, p. 149 - 157.
- ZABEL, T. (1985). The advantages of dissolved air flotation for water treatment. *Journal AWWA. Management and Operations*, p.42-46, May.
- ZIRSCHKY, J.; CARLSON, L. (1984). Overland flow for iron removal from potable water. In: *Journal AWWA. Research & Technology*, p. 80-83, Jan.
- WHITE, C. (1972). *Handbook of chlorination*. p. 331-336.
- WONG, J. M. (1984). Chlorination-filtration for iron and manganese removal. In: *Journal AWWA. Research & Technology*, p. 76-79, Jan.
- YOON, T. (1997). Flotation in water treatment. In: *The Scientific Basis of Flotation*. pp. 349-377. Martinus Nijhoff.