



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

**ESTUDO DA FLOCULAÇÃO EM MEIO GRANULAR SEGUIDA
POR FILTRAÇÃO DESCENDENTE EM ESGOTO DOMÉSTICO
TRATADO PARA FINS DE REUSO**

Leonardo Casaril

Florianópolis
2011

Leonardo Casaril

**ESTUDO DA FLOCULAÇÃO EM MEIO GRANULAR SEGUIDA
POR FILTRAÇÃO DESCENDENTE EM ESGOTO DOMÉSTICO
TRATADO PARA FINS DE REUSO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Regina de Fátima Peralta Muniz Moreira
Co-orientador: Prof. Dr. Humberto Jorge José

Florianópolis
2011

ESTUDO DA FLOCULAÇÃO EM MEIO GRANULAR SEGUIDA POR FILTRAÇÃO DESCENDENTE EM ESGOTO DOMÉSTICO TRATADO PARA FINS DE REUSO

Por
Leonardo Casaril

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Química**, área de concentração **Desenvolvimento de Processos Químicos e Biotecnológicos**, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof^a. Dr^a. Regina de F. P. M. Moreira
Orientadora

Prof. Dr. Humberto Jorge José
Co-orientador

Prof. Dr. Leonel Teixeira Pinto
Coordenador

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Agenor Furigo Junior

Prof. Dr^a. Ticiane Sauer Pokrywiecki

Dr. José Luciano Soares

Florianópolis, 17 de Dezembro de 2011.

Dedico este trabalho...

Aos meus pais, Neudi e Judith, pelo exemplo de vida, caráter e superação.

À minha esposa, Nérica, pelo carinho, participação e incentivo, constantes na minha realização pessoal e profissional.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter-me concedido a oportunidade e sabedoria para que pudesse alcançar os meus objetivos.

Aos meus pais, irmãos e esposa, pelo carinho e afeto a mim dedicados.

Aos meus orientadores, Regina e Humberto, pelo estímulo, apoio e paciência durante este projeto. Pela amizade construída ao longo dos anos.

À Carbonífera Criciúma S.A pelo incentivo e por viabilizar a realização deste estudo.

Aos caros colegas de trabalho pelo companheirismo e auxílio durante os experimentos laboratoriais. Agradecimentos especiais à Eng. Vivian pelo incentivo e conhecimento transmitido ao longo dos anos.

À Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN) por fornecer amostras dos efluentes utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos e pessoas que contribuíram de alguma forma para a realização deste projeto.

RESUMO

CASARIL, L. Estudo da floculação em meio granular seguida por filtração descendente em esgoto doméstico tratado para fins de reuso. Florianópolis, 2011. 140p. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina.

Este trabalho propôs um sistema de tratamento terciário para esgoto sanitário tratado para a produção de água de reuso, composto por coagulação com sulfato de alumínio, floculação em meio granular fixo, filtração rápida descendente e desinfecção com hipoclorito de cálcio. O estudo experimental buscou otimizar o processo de coagulação, definindo pH ótimo de operação e dosagens de sulfato de alumínio. No processo de floculação, em escoamento ascendente, foi utilizado um fluxo de $48 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$ e diferentes granulometrias de carvão mineral. O efeito da taxa de filtração foi avaliado em 136 e $227 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$, em leito composto por areia e um compósito comercial. A avaliação da desinfecção consistiu em monitorar os coliformes totais otimizando dosagem de cloro para tempo de contato de 120 min. O efluente terciário produzido atingiu as expectativas iniciais de qualidade, baseadas na NBR 13.969/97, para águas de classe I. O efluente final apresentou coliformes ausentes em 100% das amostras, turbidez menor que 5,0 FTU e cloro residual médio de 1,25 mg/L. A carreira de floculação para a granulometria ótima foi de 11 horas enquanto a de filtração atingiu 13 horas de operação. Após a validação do tratamento, foi projetado um sistema em larga escala, com capacidade nominal de $187,5 \text{ m}^3/\text{dia}$, adequada para a produção de água de reuso para uma comunidade de 2.500 habitantes a um custo estimado de R\$ $4,15/\text{m}^3$, evidenciando a necessidade de otimização de custos, seja por aumento de escala ou otimização de processo.

Palavras-chave: tratamento terciário, floculação em meio granular fixo, filtração, desinfecção, reuso.

ABSTRACT

CASARIL, L. Study of Granular Media Flocculation followed by descendent filtration of domestic sewage for recycling purposes. Florianópolis, 2011. 140p. Dissertation (Master's Degree) – Chemical Engineering and Food Engineering Department, Santa Catarina Federal University

This work proposed a tertiary treatment system of sewage to produce reusable water, composed by coagulation with aluminum sulfate, fixed granular media flocculation (GMF), down flow direct filtration and disinfection with calcium hypochlorite. Experimental study aimed to optimize coagulation process, defining operation optimum pH and aluminum sulfate dosages. On ascendant flow flocculation process, flowing rate of $48 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ was utilized and different mineral coal grain sizes. Filtration rate effect was evaluated in 136 and $227 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day}$, in a steam composed by sand and a commercial composite. Disinfection evaluation consisted in monitoring total coliforms, optimizing chlorine dosage with a contact time of 120 min. Tertiary effluent obtained met initial expectations in terms of quality for class I water, based on NBR 13.969/97. Final effluent showed absence of coliforms in 100% of the samples, turbidity lower than 5,0 FTU and mean residual chlorine of 1,25 mg/l. Flocculation run for optimum grain size was 11 hours while filtration run took 13 hours of operation. After treatment validation, a large scale system was designed, with nominal capacity of $187,5 \text{ m}^3/\text{day}$, appropriate to produce reusable water for a 2,500 people community, with a estimated cost of R\$ $4,15/\text{m}^3$, making evident the necessity for cost reduction, by production increase or by process optimization.

Keywords: tertiary treatment, fixed granular media flocculation, filtration, disinfection, reuse.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Floculador em meio poroso de fluxo ascendente.....	13
Figura 2.	Curva típica de distribuição granulométrica de materiais filtrantes (FONTE: DI BERNARDO e DANTAS, 2005)	20
Figura 3.	Fluxograma do tratamento de esgoto sanitário pelo processo SBR típico e proposição de tratamento para produção de água de reuso.....	25
Figura 4.	Aparato experimental utilizado na floculação em meio granular (FMG).....	30
Figura 5.	Remoção de turbidez para diferentes pHs em Jar Test.	34
Figura 6.	Remoção de cor verdadeira para diferentes pHs em Jar Test.	34
Figura 7.	Remoção da absorbância em 254 nm para diferentes pHs em Jar Test.	35
Figura 8.	Comportamento da turbidez em Jar Test no pH ótimo	36
Figura 9.	Comportamento da cor verdadeira em Jar Test no pH ótimo.	36
Figura 10.	Características operacionais e configuração do FMG (T16), (ϵ = porosidade do leito).	38
Figura 11.	Comportamento da turbidez durante o ensaio T16 da FMG.....	38
Figura 12.	Comportamento da cor verdadeira durante o ensaio T16 da FMG.....	39
Figura 13.	Comportamento da absorbância em 254 nm durante o ensaio T16 da FMG.	39

Figura 14. Características operacionais e configuração do FMG (T17), (ϵ = porosidade do leito).	40
Figura 15. Comportamento da turbidez durante o ensaio T17 da FMG.....	41
Figura 16. Comportamento da cor verdadeira durante o ensaio T17 da FMG.	41
Figura 17. Comportamento da absorvância em 254 nm durante o ensaio T17 da FMG.....	42
Figura 18. Características operacionais e configuração do FMG (T18), (ϵ = porosidade do leito).	43
Figura 19. Comportamento da turbidez durante o ensaio T18 da FMG.....	44
Figura 20. Comportamento da cor verdadeira durante o ensaio T18 da FMG.	44
Figura 21. Comportamento da absorvância em 254 nm durante o ensaio T18 da FMG.....	45
Figura 22. Características operacionais e configuração do FMG (T19), (ϵ = porosidade do leito).	46
Figura 23. Comportamento da turbidez durante o ensaio T19 da FMG.	46
Figura 24. Comportamento da Cor Verdadeira durante o ensaio T19 da FMG.	47
Figura 25. Comportamento da absorvância em 254nm durante o ensaio T19 da FMG.....	47
Figura 26. Quadro comparativo dos experimentos de FMG.	48
Figura 27. Comportamento da turbidez nos testes de FRD – T20 e T21.	50

Figura 28. Comportamento da cor verdadeira nos testes de FRD – T20 e T21.....	50
Figura 29. Comportamento da absorvância em 254 nm nos testes de FRD – T20 e T21.....	51
Figura 30. Comportamento da turbidez nos testes de FRD – T21 e T22.....	52
Figura 31. Comportamento da cor verdadeira nos testes de FRD – T21 e T22.....	53
Figura 32. Comportamento da absorvância em 254 nm nos testes de FRD – T21 e T22.....	53
Figura 33. Variação do residual de cloro em função do tempo de contato.....	56
Figura 34. Efeito da dosagem de hipoclorito de cálcio no pH.	57
Figura 35. Desempenho de cada tecnologia empregada no processo na remoção de coliformes totais (desinfecção com 2,0 mg Cl ₂ /L).	58
Figura 36. Desempenho de cada tecnologia empregada no processo na remoção de coliformes totais (desinfecção com 3,0 mg Cl ₂ /L).	58
Figura 37. Layout geral da planta de reuso de esgoto.	60
Figura 38. Esquema do balanço de massa na aplicação de produtos químicos.....	81
Figura 39. Teste 16.1 – Remoção de contaminantes para comparar com o teste T16.....	89
Figura 40. Teste 17.1 – Remoção de contaminantes para comparar com o teste T17.....	91
Figura 41. Teste 18.1 – Remoção de contaminantes para comparar com o teste T18.....	93

Figura 42.	Teste 19.1 – Remoção de contaminantes para comparar com o teste T19.....	95
Figura 43.	Teste 20.1 – Remoção de contaminantes para comparar com o teste T20.....	97
Figura 44.	Teste 21.1 – Remoção de contaminantes para comparar com o teste T21.....	99
Figura 45.	Teste 22.1 – Remoção de contaminantes para comparar com o teste T22.....	101
Figura 46.	Detalhes do tanque de amortecimento e bombeamento.	106
Figura 47.	Esquema de uma unidade de floculação em meio granular.	107
Figura 48.	Detalhes construtivos de uma unidade filtrante.	108
Figura 49.	Tanque de preparo de soda cáustica e sulfato de alumínio.	111
Figura 50.	Misturador para tanque de preparo de soda cáustica e sulfato de alumínio.....	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Qualidade da água de reuso e tipos de tratamento sugeridos para cada categoria de reuso direto, segundo USEPA (2004).	8
Tabela 2.	Classificação, qualidade e utilização de água de reuso segundo NBR 13969/97.	11
Tabela 3.	Valores médios de remoção de turbidez com utilização de floculador de pedras piloto, floculador mecânico e “jar-test”	15
Tabela 4.	Resumo de limites para filtração direta (adaptado de CARRIÓN E ESPARZA, 1992).	17
Tabela 5.	Resumo de limites para filtração direta descendente (adaptado GONÇALVES, 2003).	17
Tabela 6.	Faixa de variação de $C.t$ para desinfecção com cloro... ..	23
Tabela 7.	Caracterização do carvão mineral utilizado na floculação em meio granular.	26
Tabela 8.	Caracterização dos meios filtrantes utilizados nos experimentos.	26
Tabela 9.	Especificação do sulfato de alumínio.	27
Tabela 10.	Métodos de análise dos parâmetros físico-químicos de qualidade da água.	27
Tabela 11.	Caracterização do EST.	33
Tabela 12.	Condições experimentais do ensaio de FMG com granulometria entre 10 e 30 mm (T16).	37
Tabela 13.	Condições experimentais do ensaio de FMG com granulometria entre 10 e 20 mm (T17).	40

Tabela 14. Condições experimentais do ensaio de FMG com granulometria entre 6,35 e 20 mm (T18).	43
Tabela 15. Condições experimentais do ensaio de FMG com granulometria entre 6,35 e 9,52 mm (T19).	45
Tabela 16. Identificação dos experimentos realizados no estudo da FRD.	49
Tabela 17. Parâmetros de operação aplicados no processo de FRD.	49
Tabela 18. Comparativo de remoção de contaminantes dos testes T20 e T21.	51
Tabela 19. Comparativo de remoção de contaminantes dos testes T21 e T22.	54
Tabela 20. Dados do ESF utilizado nos testes T21 e T22.	54
Tabela 21. Contagem de coliformes totais em cada etapa do tratamento.	59
Tabela 22. Dados de projeto da Estação de água de reuso proposta neste estudo.	61
Tabela 23. Dados de projeto da estação de reuso.	61
Tabela 24. Dados da unidade de floculação em meio granular.	62
Tabela 25. Características do material granular de floculação.	63
Tabela 26. Dados da unidade de floculação em meio granular.	64
Tabela 27. Características dos materiais filtrantes adotados.	64
Tabela 28. Dados de projeto das unidades de filtração descendente.	65
Tabela 29. Custos estimados de implantação de uma ETER.	66
Tabela 30. Estimativa de custos mensal de operação da ETER.	67

Tabela 31. Depreciação baseada na instrução normativa nº 162 de 31/12/1998 da Secretaria da Receita Federal.....	67
Tabela 32. Estimativa do preço de produção por unidade de volume.	69
Tabela 33. Preços praticados atualmente para água de reuso e potável.....	69
Tabela 34. Cálculo da estimativa de energia elétrica mensal gasta na ETER.	84
Tabela 35. TESTE T16.1 – Obtenção do ponto ótimo de coagulação para o teste T16.....	88
Tabela 36. Teste T17.1 – Obtenção do ponto ótimo de coagulação para o teste T17.....	90
Tabela 37. Teste T18.1 – Obtenção do ponto ótimo de coagulação para o teste T18.....	92
Tabela 38. Teste T19.1 – Obtenção do ponto ótimo de coagulação para o teste T19.....	94
Tabela 39. Teste T20.1 – Obtenção do ponto ótimo de coagulação para o teste T20.....	96
Tabela 40. Teste T21.1 – Obtenção do ponto ótimo de coagulação para o teste T21.....	98
Tabela 41. Teste T22.1 – Obtenção do ponto ótimo de coagulação para o teste T22.....	100
Tabela 42. Teste T20.2 – Floculação em meio granular realizada para desenvolvimento do teste de filtração (T20).....	102
Tabela 43. Teste T21.2 – Floculação em meio granular realizada para desenvolvimento do teste de filtração (T21).....	103
Tabela 44. Teste T22.2 – Floculação em meio granular realizada para desenvolvimento do teste de filtração (T22).....	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIISI	American Iron and Steel Institute
ANSI	American National Standards Institute
APHA	American Public Health Association
AWWA	American Water Works Association
CASAN	Companhia Catarinense de Águas e Saneamento
CJT	Coagulação em Jar-test
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CP	Compósito Carbotrat Premium
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ECR	Estação de Condicionamento para Reuso
ESC	Esgoto Coagulado
ESF	Esgoto Floculado
ESFF	Esgoto filtrado
EST	Esgoto Tratado
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
ETER	Estação de Tratamento de Esgoto para reuso
FMG	Floculador de meio granular ou Floculação em meio Granular
FRD	Filtração Rápida Descendente ou Filtro Rápido Descendente
FTU	Formazin Turbidity Unit
HP	Horse Power
IPAT	Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas
mca	Metros de coluna de água
MGM	Média geométrica mensal
NBR	Norma Técnica Brasileira
NMP	Número mais provável
NTU	Nephelometric Turbidity Unit
OMS	Organização Mundial da Saúde
pH	Potencial hidrogeniônico
PROSAB	Programa de Pesquisa em Saneamento Básico
PVC	policloreto de vinila
RPM	Rotações por minuto
RPVC	Policloreto de vinila reforçado com fibra de vidro
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Estado do Paraná

SATC	Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
SBR	Sequential Batch Reactor
SST	Sólidos Suspensos Totais
uC	Unidade de cor
UNESC	Universidade do Extremo Sul Catarinense
USEPA	United States Environmental Protection Agency
uT	Unidade de turbidez
UV	Ultra Violeta

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ_{ap}	Massa específica aparente (kg/m^3);
ρ_a	Massa específica da água (kg/m^3);
ρ	Massa específica real (kg/m^3);
ε	Porosidade do meio (adimensional);
Q	Vazão (m^3/s);
\emptyset	Fator de forma (adimensional);
g	Aceleração da gravidade (m/s^2);
D_{10}	Tamanho efetivo (mm);
D	Diâmetro ou tamanho das partículas (m);
C.U.	Coefficiente de Uniformidade (adimensional);
A	Área do filtro (m^2);
μ	Viscosidade absoluta da água (N m/s);
ΔL	Espessura do meio filtrante (m);
nm	Nanômetros;

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVOS	3
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1	Reuso da água	5
3.2	Recomendações e Regulamentações para reuso	7
3.3	Tecnologias aplicadas ao tratamento terciário	11
3.3.1	Coagulação/Floculação.....	11
3.3.2	Floculação em meio granular	13
3.3.3	Filtração em meio granular	15
3.3.3.1	Filtração direta descendente (FDD).....	16
3.3.3.2	Meio Filtrante	19
3.3.3.3	Taxa de filtração.....	19
3.3.3.4	Características dos materiais filtrantes	19
3.3.4	Desinfecção.....	22
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
4.1	Materiais	25
4.1.1	Afluente ao tratamento terciário.....	25
4.1.2	Meio Granular de Floculação.....	25
4.1.3	Meio Granular de Filtração.....	26
4.1.4	Sulfato de Alumínio.....	27
4.2	Métodos	27
4.2.1	Caracterização das Águas.....	27
4.2.2	Ensaio de Coagulação em Jar Test	28

4.2.3	Floculação em meio granular (FMG)– Seleção do tamanho de partículas	29
4.2.4	Filtração Descendente (FRD).....	31
4.2.5	Desinfecção	31
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
5.1	Características do EST.....	33
5.2	Ensaio de Coagulação	33
5.3	Floculação em Meio Granular (FMG) – Efeito da granulometria e distribuição granulométrica do leito.....	37
5.4	Filtração Rápida Descendente (FRD)	48
5.5	Desinfecção	55
5.6	Dimensionamento de uma Estação de Reuso de Esgoto Sanitário - ETER	59
5.6.1	Tanque de amortecimento	62
5.6.2	Preparo e dosagem de produtos químicos	62
5.6.3	Floculador em meio granular	63
5.6.4	Filtros descendentes.....	64
5.6.5	Reservatórios de água de reuso	65
5.6.6	Custos estimados de implantação e operação.....	65
6.	CONCLUSÕES.....	71
7.	REFERÊNCIAS.....	73
	ANEXO A – Memorial de cálculos.....	79
	ANEXO B – Planilhas de resultados auxiliares	87
	ANEXO C – Especificação de Equipamentos.	105

1. INTRODUÇÃO

A água foi, por muito tempo, considerada pela humanidade como um recurso inesgotável. Com o crescimento demográfico desordenado e um gerenciamento hídrico ineficaz, a demanda por água se tornou muito maior que a sua disponibilidade sendo este quadro agravado pela distribuição irregular das precipitações pluviométricas e por seu manejo inadequado (adaptado de VARGAS, 2008).

Tal situação é agravada pela distribuição desigual de recursos hídricos: atualmente, existem 26 países que abrigam 262 milhões de pessoas e que se enquadram na categoria de áreas de escassez de água. Segundo MANCUSO E SANTOS (2003), pelo menos 8% da reserva mundial de água doce está no Brasil, sendo que 80% concentram-se na Região Amazônica e somente 20% encontram-se distribuídos nas regiões onde vivem 95% da população brasileira.

Impulsionado pelos problemas de escassez em termos de quantidade e qualidade, o interesse por reuso de efluentes industriais e esgotos sanitários vem aumentando nos últimos anos. Em 1992, o documento consensual apresentado pelos 179 países participantes da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, a Agenda 21, recomendou a todos os países participantes a implantação de políticas de gestão, dirigidas para o reuso e reciclagem de efluentes, integrando proteção da saúde pública de grupos de risco com práticas ambientalmente adequadas visando principalmente ao desenvolvimento sustentável (adaptado de MACHADO, 2004).

Segundo HESPANHOL (2003), as possibilidades e formas potenciais do reuso dependem de características, condições e fatores locais, incluindo decisão política, esquemas institucionais e disponibilidade. Além disso, a qualidade da água utilizada e o objetivo específico do reuso estabelecerão os níveis de tratamento recomendados, os critérios de segurança a serem adotados e os custos de capital, operação e manutenção.

Algumas iniciativas no Brasil buscam regulamentar o uso racional dos recursos hídricos, bem como do reuso para fins não potáveis, resultado de reuniões realizadas pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos e pela iniciativa da Câmara Técnica de Ciências e Tecnologia na criação de um grupo de trabalho encarregado de estabelecer diretrizes, propor instrumentos legais e normativos e mecanismos de articulação com outros setores, relacionados ao tema reuso de água.

O reuso de águas residuárias para fins menos restritivos não potáveis, (agrícolas, paisagísticos, industriais, recreacionais, recarga de aquíferos, manutenção dos cursos de água) busca a redução do consumo de água potável disponibilizando-a para fins mais nobres. No caso do esgoto de origem essencialmente doméstica ou com características similares, o esgoto tratado deve ser reutilizado para fins que exigem qualidade de água não potável, mas sanitariamente segura, tais como irrigação dos jardins, lavagem dos pisos e dos veículos automotivos, na descarga dos vasos sanitários, na manutenção paisagística dos lagos e canais com água, na irrigação dos campos agrícolas e pastagens (NBR 13969/97).

As tecnologias disponíveis para o tratamento de águas e efluentes são numerosas e novos processos tem sido propostos. Porém, alguns equipamentos e processos são amplamente utilizados em função do domínio e conhecimento difundidos ao longo dos anos, a saber: processos de coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção.

Este trabalho propõe-se a investigar a floculação em meio granular seguida por filtração descendente e desinfecção de esgoto sanitário para o tratamento de esgoto doméstico, visando produzir água para reuso não potável. Os primeiros estudos sobre a floculação em meio granular fixo na América Latina foram feitos no Brasil pela SANEPAR (Companhia de Saneamento do Estado do Paraná) em 1979. A floculação em meio granular desperta interesse, até hoje, em função dos poucos estudos realizados e por suas possibilidades de aplicação, principalmente em pequenas instalações, onde geralmente apresenta alta eficiência com custo atrativo (LIMA, 2010).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a combinação dos processos de coagulação e floculação em meio granular, filtração e desinfecção, no tratamento terciário de esgoto sanitário para fins de reuso urbano.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar a faixa de pH ótima para coagulação de esgoto proveniente de reator SBR bem como a faixa usual de sulfato de alumínio a ser empregada.
- Avaliar o comportamento do processo de floculação hidráulica em meio granular (FMG), composto por carvão mineral, determinando a melhor granulometria a ser utilizada no equipamento.
- Avaliar a filtração rápida descendente para remoção de contaminantes provenientes do floculador de meio granular, observando-se a taxa de filtração e a carreira de filtração.
- Determinar a dosagem ótima de cloro para desinfecção total da água de reuso produzida.
- Propor e dimensionar uma unidade de tratamento terciário de esgoto sanitário para fins de reuso.
- Avaliar os custos envolvidos para implementação do sistema de reuso.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Reuso da água

A crescente escassez de água no mundo, juntamente com o aumento rápido da população em áreas urbanas é motivo de preocupação e cria necessidade de práticas adequadas de gestão de água. “Estimativas apontam que a população mundial crescerá cerca de 1,5 vezes durante a segunda metade do século XXI enquanto o uso da água em todo o mundo terá aumentado 3 vezes o crescimento populacional” (VIGNESWARAN e SUNDARAVADIVEL, 2004).

Neste cenário, a reutilização de águas servidas gera a possibilidade de reduzir a pressão sobre os recursos hídricos atacando, concomitantemente, o problema do aumento da captação e da poluição. Aliado a este fato, ao reutilizar efluentes domésticos evita-se sua disposição no meio ambiente deixando de contaminar rios e córregos, mitigando de sobremaneira a poluição hídrica (GIORDANI e SANTOS, 2003).

MANCUSO e SANTOS (2003) sugerem, como definição, que o *reuso da água* é o aproveitamento de águas previamente utilizadas, uma ou mais vezes, em alguma atividade humana, para suprir as necessidades de outros usos benéficos, além do original.

A reciclagem ou reuso de água não é um conceito novo na história do nosso planeta. A natureza, por meio do ciclo hidrológico, vem reciclando e reutilizando a água há milhões de anos, e com muita eficiência (HESPANHOL et al, 2006).

Cidades, lavouras e indústrias já se utilizam, a muitos anos, de uma forma indireta, ou pelo menos não planejada de reuso, que resulta da utilização de águas, por usuários de jusante que captam águas que já foram utilizadas e devolvidas aos rios pelos usuários de montante (HESPANHOL et al, 2006). Uma segunda forma de reutilizar a água seria por meio do reuso direto, onde o efluente tratado é diretamente encaminhado ao uso. Este sistema é, na maior parte, o caso de efluentes industriais recolhidos e reutilizados em circuito fechado nos processos industriais, tal como nas indústrias de papel e celulose (adaptado de GANOULIS e PAPALOPOULOU, 1996).

Segundo a USEPA (United States Environmental Protection Agency, 2004), podemos classificar o reuso de esgoto municipal nas seguintes categorias:

- Reuso urbano irrestrito – irrigação de áreas nas quais o acesso do público não é restrito, tais como parques, “playgrounds”, jardins

escolares e residenciais; descarga de sanitários, proteção contra incêndio, construção civil e fontes ornamentais.

- Reuso urbano restrito – irrigação de áreas nas quais o acesso de pessoas pode ser controlado, tais como campo de golfe, cemitérios e canteiros de rodovias.
- Reuso agrícola de culturas alimentícias – irrigação de safras de alimentos que são destinadas para consumo humano direto, muitas vezes classificados como alimentos de consumo cru.
- Reuso agrícola de culturas não-alimentícias – irrigação de forrageiras para gado, fibras, sementeiras, viveiros, aquicultura.
- Reuso recreacional irrestrito – represas e lagos onde nenhuma limitação é imposta ao contato direto em atividades recreacionais como natação e mergulho.
- Reuso recreacional restrito – represas e lagos de água na qual a recreação é limitada à pesca, canoagem e outras atividades de contato indireto.
- Reuso ambiental – uso de água para criar “wetland” artificial e sustentar vazões.
- Reuso industrial – água aproveitada para uso em instalações industriais como sistema de refrigeração, reposição de água, água de alimentação de caldeira e água de processo.
- Reuso em recarga de aquífero – reposição de aquífero, controle de salinidade e de abaixamento de lençol freático.

De acordo com MANCUSO e SANTOS (2003), a questão da saúde pública é um dos principais fatores a ser considerado em um sistema de reuso de água, principalmente em zonas urbanas. Quanto maior a exposição ou o nível de contato humano com a água recuperada, maior deve ser sua segurança sanitária, e os autores sugerem o estabelecimento de critérios usando bioindicadores como os coliformes totais e fecais, de ovos de helmintos, para o monitoramento da qualidade da água de reuso como recomendado pela Organização Mundial de Saúde – OMS.

Alguns países adotam o reuso urbano não potável, como Japão e Israel. Em Fukuoka, uma cidade com aproximadamente 1,2 milhões de habitantes, situada no sudoeste do Japão, diversos setores operam com rede dupla de distribuição de água, uma das quais com esgotos domésticos tratados em nível terciário (lodos ativados, desinfecção com cloro em primeiro estágio, filtração, ozonização, desinfecção com cloro em segundo estágio), para uso em descarga de toaletes em edifícios residenciais. Esse efluente tratado é também utilizado para outros fins,

incluindo irrigação de árvores em áreas urbanas, para lavagem de gases, e alguns usos industriais, tais como resfriamento e desodorização (SANO e MIURA, 1990).

No Brasil, as empresas têm intensificado investimentos e dado grande atenção na busca por soluções envolvendo o reuso de efluentes e esgoto sanitário. Isto se deve principalmente aos recentes condicionantes legais de gestão de recursos hídricos, particularmente as associadas à cobrança pelo uso da água conforme Lei 9.433 de 1997.

Como destaque, podemos citar o sistema de tratamento de água e efluentes da Refinaria de Capuava, da Petrobrás em São Paulo, que em 2010 se tornou a primeira refinaria da América Latina com descarte zero de efluentes. Em ganhos para o meio ambiente, a refinaria deixou de captar 1 bilhão de litros de água por ano do Rio Tamanduatei, que corta o município onde a planta está instalada. Em relação ao descarte, deixou de lançar 700 milhões de litros de efluente industrial por ano para este mesmo rio (PETROBRÁS, 2011).

Outros exemplos no Brasil podem ser citados como o projeto de reuso de água em um parque temático nas proximidades da cidade de São Paulo (TOSETTO, 2005), Sabesp, a Coats Corrente, as construtoras Camargo Corrêa, VA Engenharia, DP Barros e Norte Sul (Revista DAE 2009).

As prefeituras de Diadema, São Caetano, Barueri, Carapicuíba, Santo André e a de São Paulo têm contratos com a Sabesp para a compra da água de reuso. A diferença, nestes casos, é que o transporte do produto se faz através de caminhões-pipa que buscam a água de reuso em uma Estação de Tratamento até seus mais variados destinos (Revista DAE, 2009).

Atualmente, está em fase de implantação o *Projeto Aquapolo*, empreendimento que será responsável pela produção de água de reuso para fins industriais. A ação, inédita no mundo em tamanho e tecnologia empregada (ultrafiltração com osmose reversa), é fruto de parceria entre a Sabesp e a empresa Foz do Brasil e produzirá cerca de 1000 L/s, volume suficiente para abastecer municípios como Diadema e Santos. Deste total, 650 L/s serão destinados ao Polo Petroquímico do ABC Paulista e utilizados no resfriamento de caldeiras e manutenção de máquinas (adaptado de BOSIO, 2011).

3.2 Recomendações e Regulamentações para reuso

O desenvolvimento e a implementação de guias e regulamentações tiveram um papel fundamental no avanço e no

aperfeiçoamento da prática do reuso de água nos Estados Unidos e no mundo todo. Como exemplos de guias de referência mundial estão o *Guidelines for Water Reuse* da USEPA, publicado em setembro de 2004, e o *World Health Organization Guidelines for Water Reuse* com sua última edição publicada em 2006.

A USEPA, além de dividir o reuso em categorias, sugere os requisitos mínimos de qualidade da água de reuso para cada tipo de aplicação, assim como o tratamento requerido, conforme *Tabela 1*.

Tabela 1. Qualidade da água de reuso e tipos de tratamento sugeridos para cada categoria de reuso direto, segundo USEPA (2004).

(continua)

Categoria de reuso	Tratamento	Qualidade da água de reuso *
Reuso urbano irrestrito	Secundário Filtração Desinfecção	DBO ₅ ≤ 10 mg/L Fecais: ND/100mL Turbidez ≤ 2 FTU Cl ₂ residual mínimo: 1 mg/L pH: 6 a 9
Reuso urbano restrito	Secundário Desinfecção	DBO ₅ ≤ 30 mg/L SST ≤ 30 mg/L Fecais ≤ 200/100mL Cl ₂ residual mínimo: 1 mg/L pH: 6 a 9
Reuso agrícola - Culturas alimentares não processadas comercialmente	Secundário Filtração Desinfecção	DBO ₅ ≤ 10 mg/L Fecais: ND/100mL Turbidez ≤ 2 FTU Cl ₂ residual: 1 mg/L pH: 6 a 9
Reuso agrícola - Culturas alimentares processadas comercialmente	Secundário Desinfecção	DBO ₅ ≤ 30 mg/L SST ≤ 30 mg/L Fecais ≤ 200/100mL Cl ₂ residual mínimo: 1 mg/L pH: 6 a 9

Tabela 1. Qualidade da água de reuso e tipos de tratamento sugeridos para cada categoria de reuso direto, segundo USEPA (2004).

(conclusão)

Categoria de reuso	Tratamento	Qualidade da água de reuso *
Reuso agrícola - Culturas não alimentares	Secundário Desinfecção	DBO ₅ ≤ 30 mg/L SST ≤ 30 mg/L Fecais ≤ 200/100mL Cl ₂ residual mínimo: 1 mg/L pH: 6 a 9
Reuso recreacional irrestrito	Secundário Filtração Desinfecção	DBO ₅ < 10 mg/L Fecais: ND/100mL Turbidez < 2 FTU Cl ₂ residual mínimo: 1 mg/L pH: 6 a 9
Reuso recreacional restrito	Secundário Desinfecção	DBO ₅ < 30 mg/L SST < 30 mg/L Fecais < 200/100mL Cl ₂ residual mínimo: 1 mg/L
Reuso em construção	Secundário Desinfecção	DBO ₅ < 30 mg/L SST < 30 mg/L Fecais < 200/100mL Cl ₂ residual mínimo: 1 mg/L
Reuso ambiental	Variável, geralmente secundário e desinfecção	Variável, mas não deve exceder: DBO ₅ < 30 mg/L SST < 30 mg/L Fecais < 200/100mL
Reuso industrial	Secundário Desinfecção	Depende do tipo de uso, mas geralmente: DBO ₅ < 30 mg/L SST < 30 mg/L Fecais < 200/100mL Cl ₂ residual mínimo: 1 mg/L
Reuso em recarga de aquífero	Primário para infiltração e percolação; secundário p/ injeção	Variável, dependendo do local e dos usos da água.

Nos Estados Unidos, além das recomendações apresentadas pela USEPA, existem outras leis, a maioria em âmbito estadual, referindo-se diretamente ao reuso de águas. Neste contexto, o estado da Califórnia foi pioneiro ao desenvolver suas primeiras regulamentações em 1918, e hoje os critérios vigentes no estado, sob o “Título 22 do Código da Califórnia”, adotados em 1978 para reuso de águas residuárias, têm servido como base para padrões de reuso em outros estados e muitos países (adaptado de TOSETTO, 2005).

No Brasil, algumas iniciativas buscam regulamentar o uso racional dos recursos hídricos, bem como do reuso para fins não potáveis. O primeiro exemplo foi a norma técnica NBR 13696, de setembro de 1997. Na norma, o reuso é abordado como uma opção à destinação de esgotos de origem essencialmente doméstica ou com características similares.

Com o crescente interesse pelo tema, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), publicou a Resolução 54, em 2005, que estabelece os critérios gerais para a prática de reuso direto não potável de água. Nessa resolução, são definidas as cinco modalidades de reuso de água: para fins urbanos, fins agrícolas e florestais, fins ambientais, fins industriais e uso na aquicultura.

Em 2010, o CNRH publicou a Resolução 121, a qual estabelece as diretrizes e os critérios para a prática de reuso não potável para a modalidade agrícola e florestal. Entretanto, esta resolução ainda é pouco específica, sendo que não foram definidos critérios básicos de qualidade de água. De acordo com o texto, a aplicação de água de reuso para fins agrícolas e florestais não pode apresentar riscos ou causar danos ambientais e à saúde pública. Além disso, o produtor da água de reuso é o responsável pelas informações constantes da caracterização e monitoramento da qualidade desta água.

Segundo a NBR 13969 “o esgoto de origem essencialmente doméstica ou com características similares deve ser reutilizado para fins que exigem qualidade de água não potável, mas sanitariamente segura”. A norma classifica as águas e propõe a qualidade mínima para cada utilização, conforme tabela abaixo.

Tabela 2. Classificação, qualidade e utilização de água de reuso segundo NBR 13969/97.

Classe	Qualidade da água de reuso	Utilização
I	Turbidez < 5,0 Coliformes < 200 NMP/100 mL SDT < 200 mg/L pH: 6,0 – 8,0 Cloro residual: 0,5 – 1,5 mg/L	Lavagem de carros e outros usos que requerem o contato direto do usuário com a água, com possíveis aspirações de aerossóis, incluindo chafarizes.
II	Turbidez < 5,0 Coliformes < 500 NMP/100 mL Cloro residual > 0,5 mg/L	Lavagem de pisos, calçadas e irrigação dos jardins, manutenção dos lagos e canais e para fins paisagísticos.
III	Turbidez < 10,0 Coliformes < 500 NMP/100 mL	Reuso nas descargas de vasos sanitários

3.3 Tecnologias aplicadas ao tratamento terciário

O tratamento terciário de esgoto sanitário é definido como um tratamento adicional para remoção de substâncias remanescentes do tratamento secundário convencional. A escolha do método de tratamento terciário depende do uso potencial do efluente tratado, da natureza do esgoto (doméstico, industrial), da compatibilidade das várias operações e processos, da disponibilidade de meios de disposição dos contaminantes finais, da viabilidade ambiental e econômica de cada método (TCHOBANOGLIOUS e BURTON, 1991). Como alternativa, destacamos o tratamento físico-químico, com o uso da coagulação, floculação, filtração e desinfecção.

3.3.1 Coagulação/Floculação

A coagulação, usada na maioria das estações de tratamento, envolve a aplicação de produtos químicos para a precipitação de compostos em solução e desestabilização de suspensões coloidais de partículas sólidas que, de outra maneira, não poderiam ser removidas por sedimentação, flotação ou filtração (RICHTER, 2009). O processo ocorre através da neutralização das cargas elétricas das partículas em suspensão, normalmente negativas, por meio da adição de compostos químicos com cargas positivas. São utilizados, comumente, coagulantes químicos à base de sal de alumínio (Al^{3+}) ou de ferro (Fe^{3+}), tais como

sulfato de alumínio $[Al_2(SO_4)_3]$, cloreto férrico $[FeCl_3]$ e sulfato férrico $[Fe_2(SO_4)_3]$ (adaptado de SILVA FILHO, 2009 e TOSETTO, 2005).

Segundo RICHTER (2009), a coagulação pode ser considerada como um processo constituído de duas fases subseqüentes: a primeira: *a coagulação*, propriamente dita – envolve a adição de coagulantes químicos com a finalidade de reduzir as forças que mantém separadas as partículas em suspensão. A segunda fase da coagulação – *a floculação* – promove colisões entre as partículas previamente desestabilizadas na coagulação, formando partículas de maior tamanho, visíveis a olho nu: os flocos.

A coagulação é conduzida em câmaras de mistura rápida, que visam à homogeneização dos coagulantes e seus auxiliares. Esta mistura intensa é que assegura uma distribuição uniforme do coagulante na água, colocando-o em contato com as partículas existentes em suspensão, antes que a reação esteja terminada (LEME, 1979).

A velocidade de formação dos flocos depende, no início, da agitação térmica (movimento Browniano) e, ao atingirem um tamanho de cerca de 0,1 mm, depende também da agitação mecânica/hidráulica do meio. Evidentemente, essa agitação deve ser em nível moderado (mistura lenta), pois, do contrário, poderá provocar a desagregação dos flocos já formados, o que dificultará a sua remoção (CPRH, 2001).

Os sistemas mecanizados de floculação podem ter equipamentos com eixo vertical ou horizontal e podem possuir rotores de paletas giratórias paralelas ou perpendiculares ao eixo, ou rotores constituídos de turbinas com pás ou hélices. Na floculação hidráulica, a energia de agitação é conseguida com o uso de chicanas de fluxo horizontal ou vertical, meio granular fixo ou expandido e de fluxo helicoidal (adaptado de DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

Comparando-se os sistemas hidráulicos com os mecanizados para promover a floculação, os primeiros apresentam alguns inconvenientes, como: pouca flexibilidade em relação à variação da vazão, impossibilidade de variar ou ajustar o gradiente de velocidade e perda de carga relativamente alta. Por outro lado, os hidráulicos apresentam algumas vantagens, destacando-se: menores custos de implantação, operação e manutenção e não exigir pessoal qualificado para operação e manutenção (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

O mecanismo de coagulação/floculação é sensível a diversos fatores, a citar: tipo e dosagem de coagulante, pH do efluente, natureza das substâncias produtoras de cor e turbidez, entre outros (VAZ, 2009). O tipo e a dosagem ideal da quantidade de coagulante são definidos em função principalmente da viabilidade econômica e características do

efluente. Por esse motivo, testes de coagulação são extensivamente usados para determinar as dosagens químicas ótimas no tratamento. Esse teste de laboratório simula o processo de coagulação/floculação em jarros e pode ser conduzido numa variedade de condições.

A alcalinidade também possui importância indiscutível nos tratamentos químicos de água e efluentes. Quando a água não possui alcalinidade ideal para a coagulação, costuma-se adicionar álcalis como a cal virgem, cal hidratada e barrilha para promovê-la e mantê-la nos valores ideais (AZEVEDO NETTO, 1979).

3.3.2 Floculação em meio granular

Segundo RICHER (2009), os floculadores em meio granular podem ser uma alternativa de projeto simples e barata para pequenas estações de tratamento devido à sua compactidade e elevada eficiência.

A floculação em meio poroso consiste em passar a água em fluxo vertical ou horizontal, logo após ter recebido coagulantes, através de um meio granular contido em um tanque (*Figura 1*). A perda de carga caracteriza o escoamento como laminar e a eficiência é extraordinária, podendo flocular satisfatoriamente em alguns minutos (RICHTER e AZEVEDO NETTO, 1991).

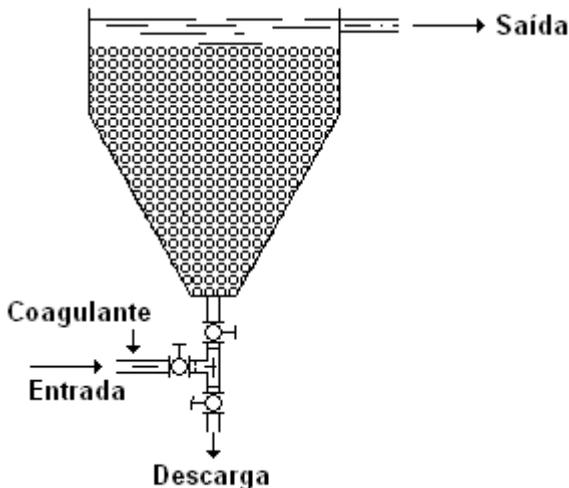


Figura 1. Floculador em meio poroso de fluxo ascendente.
(Fonte: DI BERNARDO e DANTAS, 2005)

Na escolha dos meios porosos para floculação em meio granular, deve-se considerar que o fluxo mantenha-se em regime laminar e que o volume dos poros seja suficientemente grande a fim de facilitar a limpeza do meio granular (adaptado de DI BERNARDO, 2003).

RAMOS (2000) apud WAGNER (1983) destaca o “floculador de seixos” com fluxo ascendente através de uma camada de 0,9 – 1,2 m de espessura com diâmetro dos seixos variando de 8 a 25 mm como uma das inovações de ETAs de pequeno porte. Segundo o autor, é um sistema de alta eficiência com período de floculação consideravelmente reduzido.

De acordo com DI BERNARDO e DANTAS (2005), muitas pesquisas sobre floculação em meio granular fixo foram realizadas com velocidade de aproximação entre 0,0015 e 0,010 m/s, ocorrendo retenção de grande quantidade de flocos no interior do meio granular. Em função disso, têm sido sugeridas velocidades maiores de aproximação. Porém, ainda há necessidade de pesquisas nesse campo.

Segundo RAMOS (2000), a floculação em meio granular manifesta uma série de vantagens em comparação com outros tipos de floculadores hidráulicos e mecanizados, podendo-se destacar:

- Possibilidade de redução do consumo de coagulantes e pré-alcalinizantes da água bruta;
- Redução dos custos de implantação devido à redução do período de detenção hidráulico necessário para o processo;
- Possibilidade de eliminação da etapa de decantação devido à ocorrência de retenção de flocos no próprio leito poroso do floculador; e,
- Redução nos custos operacionais e de manutenção, devido à inexistência de consumo de energia elétrica e equipamentos eletromecânicos.

RICHTER e AZEVEDO NETTO (1991) apresentaram um estudo em escala piloto de um floculador de pedras. A água bruta, afluente ao floculador, foi tomada da câmara de mistura rápida da ETA Iguaçu (Curitiba, PR, Brasil) com valores mais frequentes de turbidez e cor aparente em torno de 20 FTU e 70 uC, respectivamente. O floculador, de formato cilíndrico com 20 cm de diâmetro, foi constituído de uma camada de pedregulho com 2,10 m de altura, e operado em fluxo vertical ascendente, seguido de um filtro rápido descendente. O pedregulho utilizado tinha 6,7 mm de diâmetro médio, 0,33 de porosidade, coeficiente de uniformidade de 1,36 e fator de forma igual a 0,78. Foi realizada uma série de testes com tempo de floculação

variando de 1,5 a cerca de 8 min, com valor médio de 2,8 min, e um gradiente de velocidade médio de 85 s^{-1} . Os resultados obtidos evidenciaram a eficiência do floculador em meio granular, sendo superior tanto aos floculadores mecânicos oscilatórios, não compartimentados em série, da ETA Iguazu como aos ensaios de “jar-test”. Com 2,8 minutos de tempo médio de floculação, ao utilizar-se floculador de pedras, obteve-se uma remoção de turbidez como as indicadas na *Tabela 3*, em que apresentam-se também os resultados obtidos com o uso do floculador mecânico a 25 minutos de tempo médio de floculação, bem como dos ensaios de “jar-test” a 15 minutos de floculação. (TOSETTO 2005, apud RICHTER e AZEVEDO NETTO 1991).

Tabela 3. Valores médios de remoção de turbidez com utilização de floculador de pedras piloto, floculador mecânico e “jar-test”

Turbidez da água bruta (FTU)	Remoção de turbidez (%)		
	Floculador de pedras	Floculador mecânico	“jar-test”
20	88	85	70
50	93	92	72
100	96	95	93
200	97	97	96

3.3.3 Filtração em meio granular

A filtração é um processo físico-químico e, em alguns casos, biológico (filtros lentos) para a separação de impurezas em suspensão na água, mediante sua passagem por um meio poroso (RICHTER, 2009).

Segundo TOSETTO (2005) apud MANCUSO (2003), a filtração é um processo-chave na produção de efluente de alta qualidade, combinando mecanismos físicos e químicos de remoção de sólidos, sendo por isso normalmente usado como uma etapa final imediatamente antes da desinfecção e da disposição final ou reuso. O autor ainda reforça que o desempenho dos filtros está diretamente relacionado aos processos que os precedem, como a coagulação e a floculação, ou seja, que a eficiência da filtração depende, também, do tamanho e resistência dos flocos formados nas etapas anteriores.

Para DI BERNARDO e DANTAS (2005), o processo de filtração é resultado de três mecanismos distintos: transporte, aderência e desprendimento. Estes mecanismos são complexos e influenciados

principalmente por características físicas e químicas das partículas, da água e do meio filtrante, da taxa de filtração e do método de operação dos filtros.

Segundo o mesmo autor, os mecanismos de transporte são responsáveis por conduzir as partículas em suspensão para as proximidades da superfície dos coletores (grãos de antracito, areia ou outro material granular), as quais podem permanecer aderidas a estes por meio de forças superficiais, que resistem às forças de cisalhamento resultantes das características do escoamento ao longo do meio filtrante. Quando essas forças superam as forças de aderência, tem-se o desprendimento. Se a taxa de filtração, ou velocidade de aproximação, permanecer constante, a velocidade de escoamento nos poros, denominada velocidade intersticial, aumenta em decorrência das partículas retidas e causa o arrastamento das partículas para subcamadas inferiores (filtro descendente) do meio filtrante e surge na água filtrada, podendo ocasionar o fenômeno conhecido como transpasse.

De acordo com DI BERNARDO e DANTAS (2005), a retenção de impurezas no leito filtrante ocorre com ação de profundidade ou ação superficial. A filtração com ação de profundidade ocorre quando, em função da elevada uniformidade das partículas granulares, o efeito de estratificação do leito proporcionado pela retrolavagem torna-se menos intenso, fazendo com que a retenção das impurezas ocorra em todo o leito filtrante. Já em leitos formados com material desuniforme, a retrolavagem proporciona elevada estratificação fazendo com que a retenção concentre-se na parte superior do meio filtrante, colmatando o leito e diminuindo as carreiras de filtração.

3.3.3.1 Filtração direta descendente (FDD)

A filtração direta descendente surgiu da dificuldade de tratamento de águas com turbidez e cor relativamente baixa as quais apresentavam problemas no tratamento do tipo ciclo completo (difícil sedimentação, alto consumo de coagulantes e alcalinizante).

ARBOLETA (1992) recomenda que a água bruta para filtração direta possua as mesmas características das águas provenientes do sistema de decantação, isto é, uma turbidez inferior a 10 uT em 90% do tempo e preferencialmente menor que 5 uT e uma cor verdadeira menor do que 10 uC em 90% do tempo. Outros autores recomendam outros limites de parâmetros de qualidade de água para a filtração direta, porém somente estudos em escala piloto fornecerão informações seguras sobre a pertinência de um tratamento para uma determinada água. As *Tabelas*

4 e 5 resumem alguns limites de parâmetros sugeridos para a filtração direta.

Tabela 4. Resumo de limites para filtração direta (adaptado de CARRIÓN E ESPARZA, 1992).

Parâmetros	Filtração direta		
	Descendente	Ascendente	Ascendente / Descendente
Turbidez (FTU)	90% ≤ 30	90% ≤ 100	90% ≤ 200
	80% ≤ 20	80 ≤ 50	80% ≤ 100
	100% ≤ 50	Esporád.>200	Esporád.>200
Cor verdadeira (uC)	90% ≤ 40	100% ≤ 60	90% ≤ 100
	80% ≤ 20	90% ≤ 40	80% ≤ 50
NMP	Fecal/100 mL	MGM ≤ 100	MGM ≤ 100
	Coliformes	Total/100 mL	MGM ≤ 1000 ⁽¹⁾
Concentração de algas (mg/m ³)	90% ≤ 100	-	≤ 1000

MGM – média geométrica mensal.

(1) – se o valor de coliformes não for superado, esse valor pode ser aumentado.

Tabela 5. Resumo de limites para filtração direta descendente (adaptado GONÇALVES, 2003).

Parâmetro	Limite para filtração direta descendente
Cor verdadeira (uC)	90% ≤ 20
	95% ≤ 25
	100% ≤ 50
Turbidez (uT)	90% ≤ 10
	95% ≤ 25
	100% ≤ 100
Sólidos em suspensão (mg/L)	95% ≤ 25
	100% ≤ 100

A filtração direta descendente pode vir precedida do processo de floculação sendo que, a necessidade ou não deste processo, será determinado pela qualidade da água bruta, principalmente do tamanho das partículas, das características do meio filtrante e da taxa de filtração.

Comparado ao tratamento completo, a filtração direta descendente apresenta as seguintes vantagens (DI BERNARDO, 2003):

- custo da construção de 30% a 50% menor;
- redução dos custos de operação e manutenção, uma vez que se tem menor consumo de coagulante e de energia elétrica; são eliminados os equipamentos de remoção de lodo dos decantadores e, também, algumas vezes, os equipamentos de floculação;
- facilidade no tratamento de água bruta com baixa turbidez.

Dentre as desvantagens, destacam-se:

- necessidade de controle mais rigoroso da dosagem de produtos químicos aplicados, principalmente quando não se tem a pré-floculação;
- dificuldades no tratamento de água bruta com turbidez ou com cor verdadeira altas;
- a mudança na qualidade da água bruta afeta rapidamente a carreira de filtração;
- tempo de detenção total da água no sistema relativamente curto para oxidação de substâncias orgânicas presentes no afluente;
- o tempo de detenção em todo o tratamento é bastante curto, necessitando de ação rápida nas mudanças de dosagens de produtos químicos durante a mudança da qualidade da água bruta;
- período inicial de melhora da qualidade do efluente mais longo.

CUNHA (2008) apud BRITO (2006) afirma que, a filtração dos esgotos é, com filtros rápidos, semelhantes aos usados em sistemas de tratamento de água potável, diferenciando apenas a granulometria do material filtrante e a intensidade e frequência da lavagem. Nestes casos, são utilizados normalmente areias de grãos relativamente grandes, carvão antracito, pedras pomes e granulados plásticos. ZANETTI et al (2006), através de estudos com filtração direta de efluente secundário em filtro descendente de dupla camada, operando em taxa de filtração de $8,6 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$, atingiu remoções de 54,1% de coliformes totais, 52% de coliformes fecais e 51,5% de *E. Coli*.

3.3.3.2 Meio Filtrante

Teoricamente, o meio filtrante ideal é aquele em que o escoamento ocorre no sentido dos grãos maiores para os menores, para que todo o leito participe da filtração e propicie filtração mais longa. Na prática, para se aproximar da filtração ideal, a grande maioria dos filtros descendentes possui duas camadas filtrantes sendo os materiais mais utilizados a areia e o carvão antracito. Existe a tendência, em outros países, de se utilizar mais de duas camadas filtrantes, adicionando por exemplo a granada, formando leitos de múltipla camada (adaptado do GONÇALVES ,2003). Materiais com densidades diferentes podem ser utilizados, desde que, em função das granulometrias adotadas, apresentem velocidades mínimas de fluidificação iguais ou bem próximas.

3.3.3.3 Taxa de filtração

Segundo DI BERNARDO e DANTAS (2005), pode-se empregar na filtração direta descendente as mesmas taxas que se empregam na filtração de uma ETA com tratamento completo (120 a $600 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$), porém, isso só é possível se o material filtrante for especificado adequadamente, uma vez que a taxa de filtração está intimamente relacionada a granulometria do meio filtrante, à qualidade da água e às dosagens de produtos químicos. Na falta de dados experimentais de determinação da taxa de filtração a ser aplicada, a NBR 12216 sugere limites de $180 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ para filtros de camada simples (areia ou antracito) e $360 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ para filtros de camada dupla (areia e antracito).

A taxa de filtração também está relacionada à duração da carreira de filtração, isto é, para determinada especificação do material filtrante, quanto maior for a taxa de filtração para determinada qualidade de água bruta, menor será a carreira de filtração.

3.3.3.4 Características dos materiais filtrantes

O conhecimento das características granulométricas do meio filtrante é imprescindível para que se possa projetar um sistema de filtração. A ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – dispõe de normas com especificação e métodos de ensaio para areia, antracito e pedregulho.

A análise granulométrica é feita pela passagem de uma amostra seca e representativa do material granular através de uma série de peneiras com aberturas conhecidas. As quantidades retidas em cada peneira permitem a construção da curva granulométrica conforme a *Figura 2*. No eixo das abcissas tem-se o tamanho das malhas em escala logarítmica e no eixo das ordenadas, a porcentagem do material que passa, em escala aritmética.

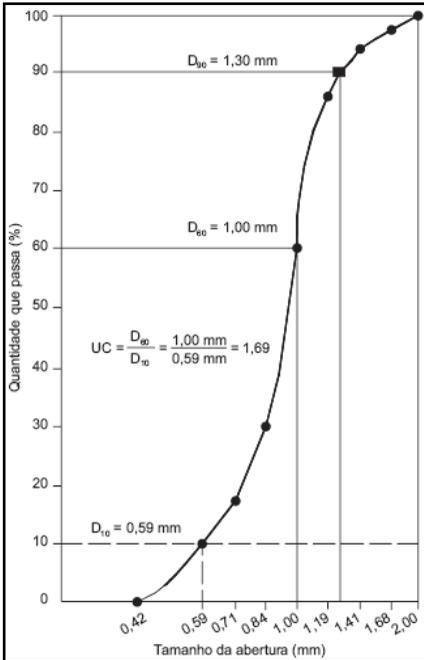


Figura 2. Curva típica de distribuição granulométrica de materiais filtrantes (FONTE: DI BERNARDO e DANTAS, 2005)

A partir da curva de distribuição granulométrica são definidos os seguintes parâmetros que caracterizam o meio filtrante.

Tamanho efetivo (d10)

Por definição, o tamanho efetivo é a abertura da malha, em milímetros, da peneira que deixa passar 10% em peso da amostra.

Coefficiente de Uniformidade

Por definição, é a relação entre a abertura da malha da peneira em milímetros, através da qual passam 60% em peso de uma amostra, e o tamanho efetivo da mesma.

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

Equação 1

Esse parâmetro tem fundamental importância na filtração, pois a uniformidade granulométrica influencia diretamente na estratificação do leito. Quanto mais próximo da unidade, mais uniforme é o material granular, o que proporciona filtração com ação de profundidade diminuindo a colmatação do leito e aumentando a carreira de filtração.

Forma e Geometria dos Grãos

A forma e a geometria dos grãos exercem grande influência na perda de carga no meio filtrante limpo, na velocidade mínima de fluidificação e no comportamento da expansão durante a lavagem. Quanto mais irregular a forma geométrica dos grãos, melhor será o desempenho durante a filtração, enquanto grãos de forma arredondada apresentam maior eficiência durante a lavagem, além de perda de carga final entre 20% e 30% inferior àquela desenvolvida em grãos de forma irregular.

Porosidade

A porosidade é definida como a relação entre o volume de vazios e o volume total do meio filtrante. É um parâmetro muito importante na determinação da velocidade de água requerida para lavagem do meio filtrante, na perda de carga no meio filtrante fixo e na capacidade de retenção de impurezas do meio filtrante.

Massa Específica

Sua determinação é fundamental no cálculo de perda de carga, na fluidificação e na expansão do meio filtrante. É também fator determinante na velocidade ascensional da água para fluidificar as partículas do leito.

Comumente também é citada a massa específica aparente, valor esse utilizado para o cálculo do volume de material a ser adquirido. É definido como:

$$\rho_{ap} = \rho_s (1 - \varepsilon)$$

Equação 2

Dureza dos Grãos

A dureza dos grãos está relacionada com a resistência mínima à abrasão, pois durante a fluidificação e a expansão do meio filtrante, decorrentes da lavagem, pode haver desgaste dos grãos, originando maior quantidade de material fino e alterando sua curva granulométrica, o que pode trazer prejuízos à filtração. Quando a lavagem dos filtros é realizada com ar, o efeito abrasivo entre os grãos aumenta, possibilitando maior redução de seus tamanhos, especialmente quando se tem antracito.

3.3.4 Desinfecção

Os processos de desinfecção podem ser definidos como aqueles nos quais se deseja inativar ou destruir os organismos patogênicos e outros microrganismos indesejados. A utilização da desinfecção como uma medida de controle de microrganismos teve início no século XX e sua importância para a saúde pública pode ser vista através do controle de doenças como a febre tifóide (MONTEIRO 2005).

Os processos de desinfecção, segundo DI BERNARDO e DANTAS (2005), sejam eles artificiais ou naturais, utilizam agentes físicos e químicos para inativar os organismos-alvo, isoladamente ou de forma combinada. Existem três mecanismos principais de inativação de organismos patogênicos por agentes químicos:

- Destruição ou desarranjo estrutural da organização celular;
- Interferência no metabolismo energético, tornando as enzimas não funcionais;
- Interferência na biossíntese e no crescimento, pelo prejuízo à síntese de proteínas, ácidos nucleicos, coenzimas ou parede celular.

A eficácia relativa de cada desinfetante químico é geralmente relacionada pelo produto da concentração do agente desinfetante pelo tempo de contato, *C.t*. Os valores de *C.t* são função da temperatura, pH e nível de desinfecção desejado. Na literatura estão disponíveis algumas tabelas com estes valores, como a *Tabela 6*, a seguir.

Tabela 6. Faixa de variação de *C.t* para desinfecção com cloro.

Microorganismos	Cloro livre pH 6 a 7
<i>E. Coli</i>	0,034 – 0,05
<i>Pólio l</i>	1,1 – 2,5
<i>Rotavírus</i>	0,01 – 0,05
<i>Cistos de G. lamblia</i>	47 – 150
<i>Criptosporídium</i>	7200

Fonte: USEPA, 2004 (adaptado); "C" em mg/L e "t" em min.

Entre os agentes de desinfecção, o mais largamente empregado é o cloro, apresentando como vantagens: baixo custo; fácil aplicação; boa eficiência; deixa residual na solução; mantém a rede desinfetada; é facilmente determinável. Os principais compostos a base de cloro utilizados na desinfecção de esgotos são o cloro, nas suas formas gasosa e de hipoclorito, e o dióxido de cloro. Comercialmente, o hipoclorito de cálcio é encontrado na forma sólida sendo relativamente estável na forma seca e teor de cloro ativo em torno de 70% (m/m). Já o hipoclorito de sódio é encontrado na forma líquida, em concentrações que usualmente variam de 1 a 16% (m/m) (GONÇALVES, 2003).

Em processos de tratamento de esgotos, em geral, bactérias e vírus são inativados pela ação de desinfetantes, enquanto cistos de protozoários e ovos de helmintos são removidos por filtração ou sedimentação.

Segundo GONÇALVES (2003), os coliformes servem como indicadores da inativação das bactérias patogênicas. Portanto, na aferição da qualidade bacteriológica do efluente tratado, a ausência dos coliformes já seria um indicador adequado e suficiente da eficiência do tratamento.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

4.1.1 Afluente ao tratamento terciário

O afluente utilizado nos experimentos é esgoto sanitário tratado (EST) proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) do loteamento Ayrton Senna, bairro Renascer na cidade de Criciúma/SC.

A ETE é constituída das seguintes unidades básicas de processo: (1) gradeamento; (2) caixa de areia; (3) processo biológico de lodo ativado em batelada (SBR); (4) leito de secagem de lodo. A *Figura 3* apresenta o fluxograma de tratamento existente bem como a proposição de tratamento para produção de água de reuso.

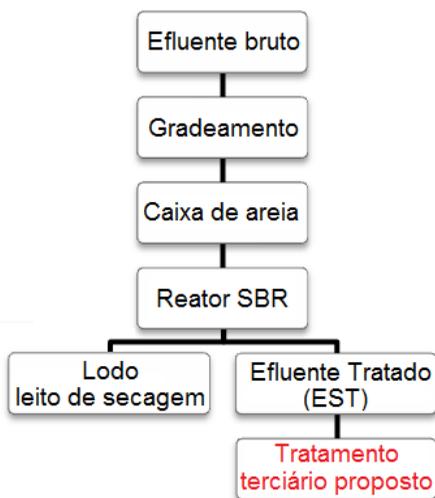


Figura 3. Fluxograma do tratamento de esgoto sanitário pelo processo SBR típico e proposição de tratamento para produção de água de reuso.

4.1.2 Meio Granular de Floculação

As amostras de carvão mineral utilizadas foram fornecidas pela Carbonífera Criciúma S.A (Unidade Mineira II - Forquilha/SC).

O carvão é proveniente da camada geológica Barro Branco, seco em secador rotativo a 200°C com tempo de residência aproximado de 20

minutos. A *Tabela 7* apresenta as características do carvão mineral utilizado no processo de floculação em meio granular.

Tabela 7. Caracterização do carvão mineral utilizado na floculação em meio granular.

	Parâmetro	Valor
Faixas Granulométricas (mm)		6,35 – 9,52
		10,0 – 20,0
		20,0 – 30,0
Análise imediata	Carbono fixo (%)	52,0
	Cinzas (%)	31,0
	Matéria Volátil (%)	17,0
Ponto de Carga Zero		6,35

4.1.3 Meio Granular de Filtração

Os meios filtrantes utilizados neste trabalho estão listados na *Tabela 8* bem como suas características, fornecidas pelos fabricantes.

Tabela 8. Caracterização dos meios filtrantes utilizados nos experimentos.

Material	Caracterização	Especificações
Carbotrat Premium^a	NBR 14.234	Tamanho efetivo, mm = 0,95
		Coefficiente de uniformidade = 1,40
		Tamanho do menor grão, mm = 0,50
		Tamanho do maior grão, mm = 2,00
		Massa específica real, g/cm ³ = 1,63
		Fe ₂ O ₃ na superfície, % = 1,5 – 2,5
Areia lavada^b	NBR 11.799	Tamanho efetivo, mm = 0,45
		Coefficiente de uniformidade = 1,61
		Solubilidade em HCl, % massa = 1,12
		Tamanho do menor grão, mm = 0,33
		Tamanho do maior grão, mm = 1,00
		Massa específica real, g/cm ³ = 2,81
Camada torped^b	NBR 11.799	Solubilidade em HCl, % massa = 0,90
		Tamanho do menor grão, mm = 2,00
		Tamanho do maior grão, mm = 3,17
		Massa específica real, g/cm ³ = 2,81

^a Fornecido por Carbonífera Criciúma S.A.; ^b Fornecido por Clarifil Rheiss Saneamento Ambiental Ltda.

4.1.4 Sulfato de Alumínio

A especificação do coagulante químico utilizado nos experimentos está apresentada na tabela abaixo:

Tabela 9. Especificação do sulfato de alumínio.

Parâmetro	Valor
Estado físico	Líquido
Cor	Marrom claro
Odor	Inodoro
pH	1,5 – 3,0
Massa específica (g/cm ³)	1,3 – 1,35
Teor de Al ₂ O ₃ (% massa/massa)	7,5 – 9,0
Teor de Al ₂ (SO ₄) ₃ (% massa/massa)	25 – 30
Teor máximo de Fe ₂ O ₃ (% massa/massa)	< 1,2
Acidez livre máxima (H ₂ SO ₄) (%)	<0,5

Especificação fornecida por Suall Indústria e Comércio Ltda.

4.2 Métodos

4.2.1 Caracterização das Águas

Os parâmetros físico-químicos de qualidade da água foram determinados no laboratório da Carbonífera Criciúma S.A e as metodologias de análise seguiram as orientações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA, WEF, 1998), conforme *Tabela 10*.

Tabela 10. Métodos de análise dos parâmetros físico-químicos de qualidade da água.

(continua)

Parâmetro	Método Equipamento
pH	4500-H ⁺ B. Método eletrométrico pHmetro modelo DM-22 marca Digimed.
Amônia (mg/L)	4500 – NH ₃ C. – Método titulométrico Espectrofotômetro digital GENESYS 10UV
Cor verdadeira (mg/L Pt-Co)	2120 C. – Método Espectrofotométrico Espectrofotômetro digital GENESYS 10UV

Tabela 10. Métodos de análise dos parâmetros físico-químicos de qualidade da água.

(conclusão)

Parâmetro	Método Equipamento
DQO (mg O ₂ /L)	5220 D. – Método colorimétrico de refluxo fechado Digestor Alfakit Espectrofotômetro digital GENESYS 10UV
DBO ₅ (mg/L)	5210. B. – Teste de DBO 5 dias Incubadora marca Marconi modelo MA415/S Oxímetro marca Orion
Nitrato (mg/L)	4500 – NO ₃ ⁻ B. Método espectrofotométrico Espectrofotômetro digital GENESYS 10UV
Sólidos dissolvidos (mg/L)	2540 C. Sólidos dissolvidos totais (180°C)
Sólidos suspensos (mg/L)	2540 D. Sólidos em suspensão (103 – 105°C)
Turbidez (FTU)	2130 B. Método Nefelométrico Espectrofotômetro digital GENESYS 10UV
Absorção de UV por constituintes orgânicos (UV _{254nm})	5910 B. Método de Absorção Ultravioleta Espectrofotômetro digital GENESYS 10UV

A quantificação de coliformes totais foi realizada pelo Laboratório de Microbiologia do Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas – IPAT da Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC. A metodologia de análise seguiu as orientações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA, WEF, 1998), de acordo com o método 9221 – Contagem de coliformes totais.

4.2.2 Ensaio de Coagulação em Jar Test

Os ensaios foram realizados num aparelho da marca PoliControl. Este aparelho de *Jar-Test* opera com seis recipientes de 1 litro, agitados por pás e com velocidade de rotação regulável.

O ensaio foi desenvolvido fixando-se o pH na faixa desejada e variando-se a concentração de sulfato de alumínio [Al₂(SO₄)₃],

coagulante escolhido pelo fato da CASAN já o utilizar na regional de Criciúma.

Após o ajuste de pH, os jarros sofreram agitação intensa (mistura rápida) de 150 rpm, correspondente a um gradiente de velocidade (G) de 150 s^{-1} por 3 min. Em seguida a rotação foi diminuída simulando uma mistura lenta, na qual se deu o processo de floculação. O tempo de floculação foi de 5 minutos e o gradiente de velocidade de 50 s^{-1} .

Por fim, a solução foi deixada em repouso por 90 minutos para que ocorresse a decantação dos flocos formados e, decorrido esse tempo, o sobrenadante foi analisado conforme as metodologias já apresentadas.

4.2.3 Floculação em meio granular (FMG)– Seleção do tamanho de partículas

Foi construída uma coluna em RPVC (PVC reforçado com fibra de vidro e resina poliéster) com diâmetro interno de 150 mm e altura livre disponível de 1500 mm, que operava com o escoamento em fluxo ascendente.

O EST era acondicionado em tanque de homogeneização com capacidade de 200 L, provido de misturador elétrico (1HP) com inversor de frequência para regulagem da rotação do misturador.

A solução de coagulante era previamente preparada e armazenada em tanque de 20 L. A dosagem era feita em linha através de bomba peristáltica marca Masterflex, modelo 7519-10. Considerou-se a realização da mistura rápida na própria tubulação onde o coagulante foi injetado. No entanto, o gradiente de velocidade e o tempo de mistura não foram determinados.

O pH da solução era ajustado diretamente no tanque de homogeneização. O bombeamento do EST era realizado via bomba dosadora marca Masterflex, modelo 7519-10.

A retrolavagem era realizada com água potável valendo-se da pressão de linha existente no local, regulada por registro tipo esfera (válvula nº 2 na *Figura 4*).

A *Figura 4* mostra um esboço do aparato experimental utilizado.

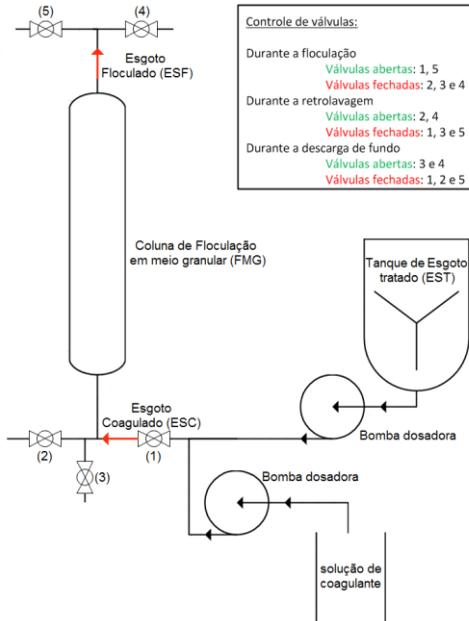


Figura 4. Aparato experimental utilizado na floculação em meio granular (FMG)

Para cada granulometria de sólido (vide item 4.1.2), avaliou-se a carreira de floculação e os principais parâmetros de qualidade. O fluxo utilizado foi de $48 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ em sentido ascendente. A operação do sistema com este fluxo, menor do que sugerido pela literatura tem como objetivo aumentar a retenção de flocos na unidade de FMG.

De maneira a visualizar a eficiência do processo de FMG, foram realizados paralelamente, testes convencionais de coagulação em Jar-Test conforme procedimento de jarros descrito no item 4.2.2.

A duração da carreira de floculação não foi pré-definida, mas foi determinado que, atingindo-se uma diminuição de vazão de 30% em relação à inicial, a carreira seria interrompida e a retrolavagem iniciada. Entretanto, observou-se durante os primeiros testes que a vazão volumétrica permanecia aproximadamente constante, indicando que a evolução da perda de carga causada pela presença dos sólidos suspensos era lenta. Desta maneira, todas as carreiras de floculação foram encerradas devido à deterioração da qualidade do efluente floculado (fenômeno de transpasse).

A lavagem do meio granular de floculação era realizada por descargas de fundo, de forma que os sólidos retidos fossem arrastados por gravidade, e por retrolavagem com água potável. Para cada lavagem, era realizada uma descarga de fundo que durava cerca de 30 segundos e retrolavagem com taxa média de $670 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$ durante 10 – 15 minutos ou até que a água ficasse visualmente clarificada. Esta taxa de lavagem é compatível com as utilizadas em sistemas de retrolavagem de filtração.

4.2.4 Filtração Descendente (FRD)

Os ensaios de filtração foram conduzidos em fluxo descendente sendo que a unidade FMG operava sob as condições ótimas previamente definidas. O ESF era encaminhado ao Filtro Rápido Descendente (FRD) composto pelo compósito adsorvente Carbotrat Premium e areia. As taxas de filtração testadas foram de $136,3 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$ e $226,8 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$.

Para tanto, tínhamos disponíveis duas colunas de filtração com 1,0 m de altura cada e diâmetros internos de 8,9 e 6,9 cm.

A lavagem era realizada com água potável a uma taxa média de $1086,5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$ durante 10 minutos.

4.2.5 Desinfecção

Amostras coletadas no final do circuito completo de tratamento foram submetidas a testes de desinfecção.

Foram efetuados ensaios de oxidação variando a dosagem do cloro (2 e 3 mg Cl_2/L) para um tempo de contato de 120 min. Os ensaios foram realizados em Jar Test e o gradiente de velocidade foi mantido em torno de 100 s^{-1} . Os parâmetros de controle foram residual de cloro e coliformes totais.

A solução de cloro foi preparada a partir do produto comercial hipoclorito de cálcio granulado [$\text{Ca}(\text{ClO})_2$] com concentração de 1 g Cl_2/L .

Com os parâmetros ótimos de projeto, avaliou-se também a remoção de coliformes totais de cada etapa do sistema.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A qualidade da água de reuso a ser alcançado no final do processo proposto é aquela estabelecida na NBR 13.969/97 para águas de Classe I, com exceção dos sólidos dissolvidos totais, parâmetro não monitorado ao longo deste trabalho. Estes parâmetros são:

Turbidez < 5,0 FTU

Coliformes < 200 NMP/100mL

pH entre 6,0 e 8,0

Cloro residual entre 0,5 e 1,5 mg/L.

5.1 Características do EST

Foram realizadas 12 coletas de efluente de saída do SBR, cujos extremos de características são mostradas na *Tabela 11*.

Tabela 11. Caracterização do EST.

Parâmetro	Intervalo de valores
pH	6,13 – 7,34
Amônia, mg/L	2,31 – 35,31
Cor verdadeira, mg/L Pt-Co	117,87 – 523,33
DQO, mg O ₂ /L	79,36 – 152,41
DBO ₅ , mg/L	14 – 64
Nitrato, mg/L	0,00 – 15,95
Sólidos dissolvidos, mg/L	360 – 416
Sólidos suspensos, mg/L	44 – 385
Turbidez, FTU	26,80 – 141,2
Coliformes totais (NMP/100mL)	$1,8 \times 10^4$ – $1,6 \times 10^6$
UV _{254nm}	0,488 – 1,011

Ressalta-se a grande variação de qualidade do efluente, principalmente nos valores de cor verdadeira e turbidez. Isto se deve a problemas operacionais com o sistema de aeração do SBR durante o período em que foram realizadas as coletas.

5.2 Ensaio de Coagulação

A primeira bateria de testes de coagulação-floculação-decantação serviu para determinar o pH que seria empregado nos experimentos subsequentes. Para tanto, foi realizado uma coleta de esgoto secundário,

o qual apresentou turbidez de 62,35 FTU, cor verdadeira de 464,61 mg/L Pt-Co e UV_{254nm} de 0,761 nm.

Os ensaios foram realizados para 6 diferentes pHs e concentrações de sulfato de alumínio variando entre 0 e 50 mg/L. Estes testes foram nomeados de T1 a T6, e seus resultados permitiram a construção dos gráficos apresentados pelas *Figuras 5 a 7*, a seguir.

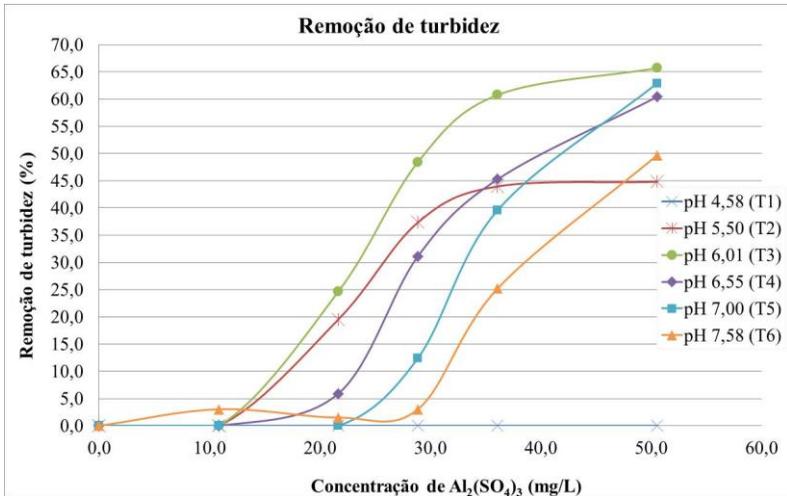


Figura 5. Remoção de turbidez para diferentes pHs em Jar Test.

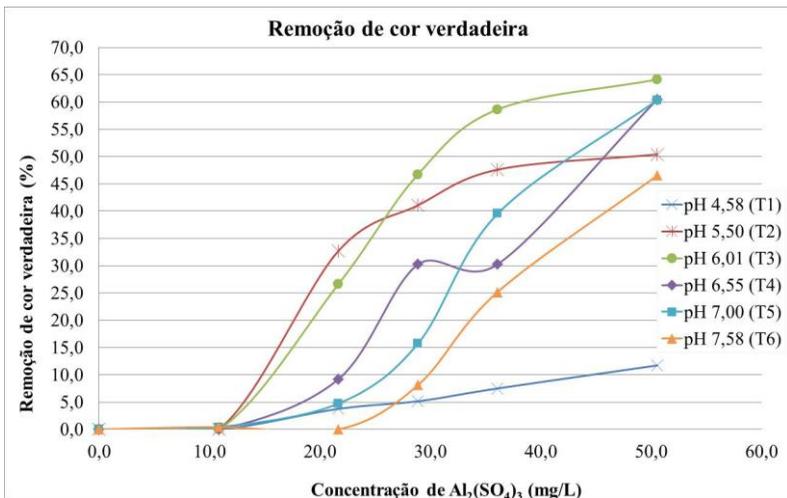


Figura 6. Remoção de cor verdadeira para diferentes pHs em Jar Test.

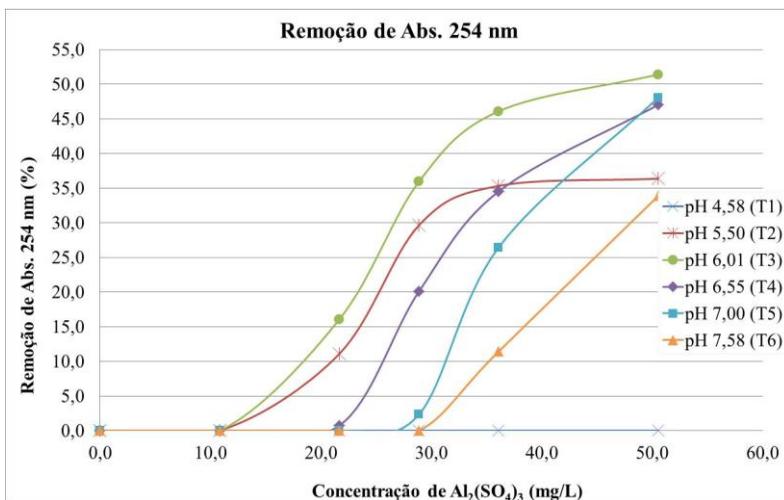


Figura 7. Remoção da absorvância em 254 nm para diferentes pHs em Jar Test.

As Figuras 5 a 7 mostram que os maiores percentuais de remoção de turbidez, cor verdadeira e absorvância em 254 nm foram alcançados para a maior dosagem de sulfato de alumínio utilizada nos diferentes ensaios (50 mg/L de $Al_2(SO_4)_3$) e em pH = 6,0. Entretanto, as diferenças de remoção entre os pHs 6,0 (T3), 6,5 (T4) e 7,0 (T5) são muito pequenas, sugerindo a faixa ótima de pH de operação de 6 a 7. Estes resultados caracterizam o mecanismo de coagulação por varredura que, conforme afirmam AMIRTHARAJAD e MILLS (1982), as condições ótimas para coagulação por arrasto são obtidas com pH entre 6,0 e 8,0 com doses de sulfato de alumínio entre 20 e 60 mg/L.

Avaliando estes resultados e, sabendo-se do caráter ácido do sulfato de alumínio, definiu-se a faixa de pH de operação entre 6,5 – 7,0 para evitar uma segunda correção de pH, após filtração ou desinfecção.

Definido a faixa de pH ótima de operação, passamos à segunda bateria de testes de coagulação (T7 – T15). O objetivo desta segunda etapa é determinar a dosagem ótima de coagulante e monitorar o comportamento do processo de coagulação-floculação-decantação diante das possíveis variações de qualidade do EST. Cada ensaio realizado corresponde a uma nova coleta de EST em dias diferentes.

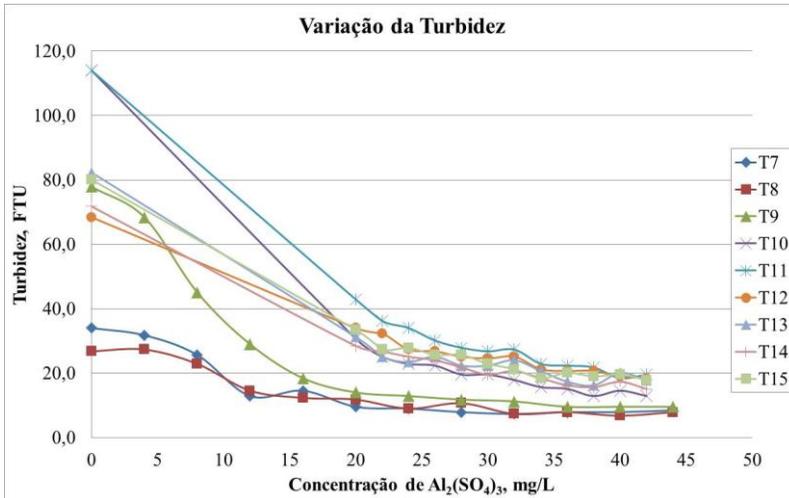


Figura 8. Comportamento da turbidez em Jar Test no pH ótimo.

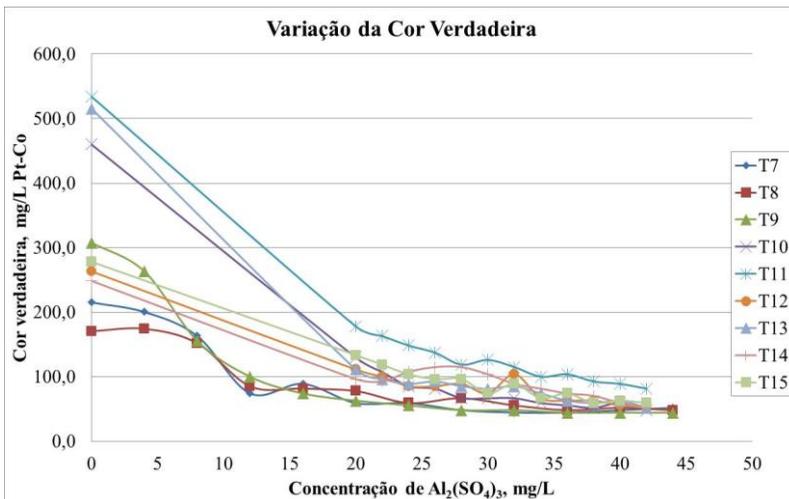


Figura 9. Comportamento da cor verdadeira em Jar Test no pH ótimo.

Analisando a *Figura 8*, observa-se que, independentemente da turbidez inicial do EST, a remoção de turbidez tende a estabilizar a partir de dosagens maiores do que 25 mg/L. Ademais, o ponto ótimo para a dosagem de coagulante encontra-se acima de 30mg/L, cujos valores de turbidez na água decantada ficaram entre 10 e 25 FTU. O comportamento do parâmetro cor verdadeira é semelhante ao da

turbidez, ficando entre 50 e 125 mg/L Pt-Co, conforme a *Figura 9*. Os resultados ressaltam que somente o processo de coagulação-floculação-decantação não garante a qualidade necessária para água de reuso no quesito turbidez, a qual deve ser $\leq 5,0$ FTU, conforme estipulado anteriormente. É, portanto, essencial à etapa de filtração terciária no processo.

5.3 Floculação em Meio Granular (FMG) – Efeito da granulometria e distribuição granulométrica do leito

Ao todo foram testadas 3 granulometrias distintas (veja *Tabela 7*, item 4.1.2), dispostas em 4 configurações. Procedeu-se, com cada configuração, um teste com o intuito de observar o tempo de carreira de floculação e avaliar a turbidez, cor verdadeira e absorvância em 254 nm finais. Estes ensaios estão nomeados como T16 a T19 e serão discutidos adiante. Além disso, com o intuito de proporcionar maior retenção de flocos na unidade de FMG, o sistema operou com fluxo de $48 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, valor este menor que os sugeridos pela literatura.

Antes de cada teste de FMG, um ensaio de Jar Test foi realizado para obter a dosagem ótima de coagulante a ser aplicada na FMG, bem como comparação de resultados de ambas as metodologias. Estes foram nomeados como T16.1 a T19.1 e seus resultados estão disponíveis no *Anexo B*.

Para o primeiro teste (T16), 2 faixas granulométricas foram preparadas, 10 a 20mm e 20 a 30 mm. Os principais dados deste experimento estão apresentados na *Tabela 12*, enquanto a disposição granulométrica é mostrada na *Figura 10*.

Tabela 12. Condições experimentais do ensaio de FMG com granulometria entre 10 e 30 mm (T16)

Turbidez inicial:	82,33	FTU
Cor verdadeira inicial:	515,57	mg Pt-Co/L
UV _{254nm} inicial:	0,603	nm
Dosagem de coagulante:	38	mg Al ₂ (SO ₄) ₃ /L
pH de coagulação:	6,83	
Granulometria:	10 a 30	mm
Altura do leito:	1,50	m
Fluxo de operação:	48,0	$\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$
Tempo de detenção total:	27,7	min

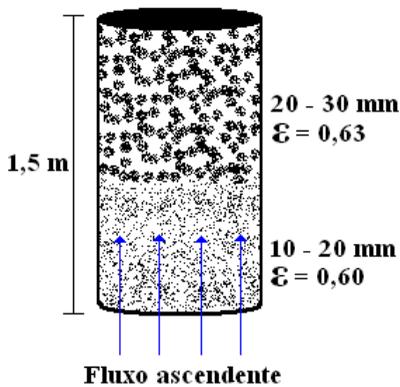


Figura 10. Características operacionais e configuração do FMG (T16), (ϵ = porosidade do leito).

As Figuras 11, 12 e 13 mostram o ESF no que diz respeito à remoção de turbidez, cor verdadeira e absorvância em 254 nm, respectivamente. Os resultados obtidos foram aquém do esperado, proporcionando remoção de contaminantes inferior ao Jar Test. Além disto, percebeu-se um transpasse mais intenso de flocos a partir de 4 horas de floculação, o que foi comprovado pelas análises físico-químicas e facilmente identificado nos gráficos a seguir.

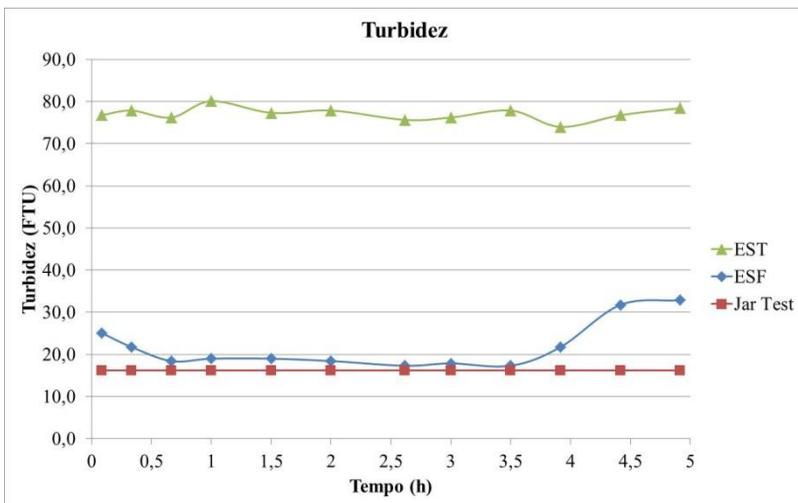


Figura 11. Comportamento da turbidez durante o ensaio T16 da FMG.

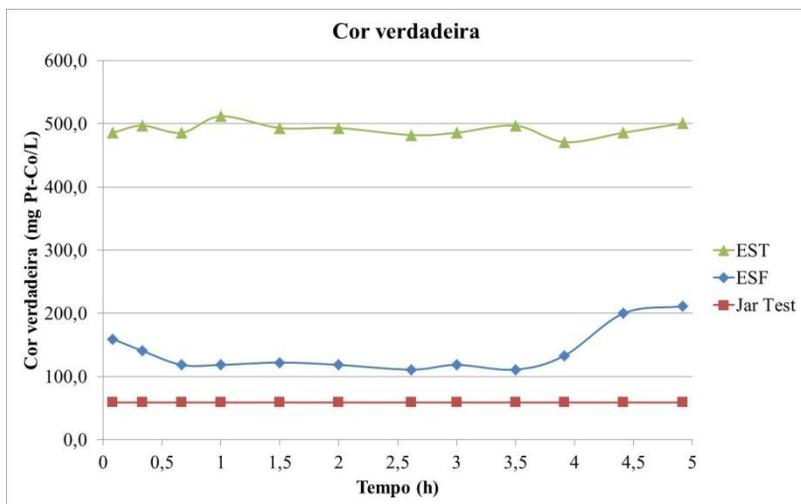


Figura 12. Comportamento da cor verdadeira durante o ensaio T16 da FMG.

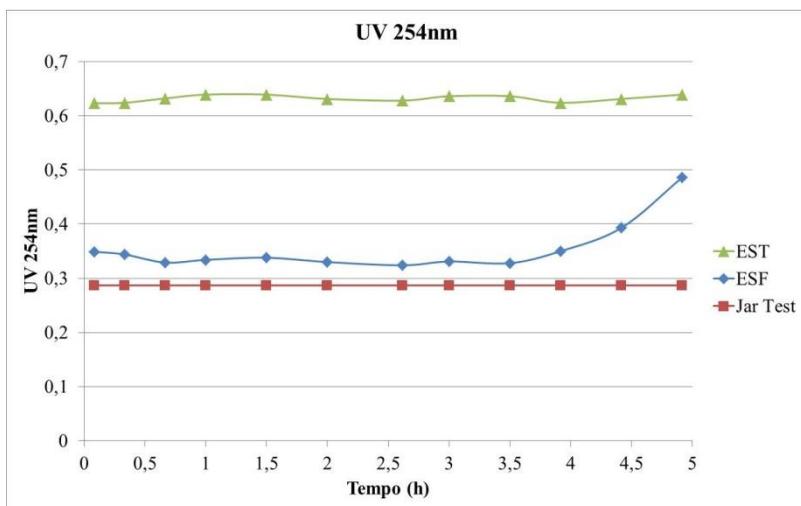


Figura 13. Comportamento da absorvância em 254 nm durante o ensaio T16 da FMG.

Durante o primeiro teste, aparentemente houve boa formação de flocos, porém uma baixa retenção destes no FMG, o que foi observado pela vazão que permaneceu praticamente inalterada durante toda a carreira de floculação. Como o EST tinha carga poluidora alta (turbidez

≈ 82 FTU e cor verdadeira ≈ 515 mg Pt-Co/L), seria necessário aumentar a detenção dos flocos no floculador para evitar sobrecarga no processo seguinte, a filtração. Com este objetivo, foi realizado o ensaio utilizando somente a menor faixa granulométrica (10 a 20 mm), resultando em leito com menor porosidade. Na *Tabela 13* estão apresentados os principais dados do segundo experimento enquanto a disposição granulométrica é mostrada na *Figura 14*.

Tabela 13. Condições experimentais do ensaio de FMG com granulometria entre 10 e 20 mm (T17).

Turbidez inicial:	76,12	FTU
Cor verdadeira inicial:	547,12	mg Pt-Co/L
UV _{254nm} inicial:	0,637	nm
Dosagem de coagulante:	42	mg Al ₂ (SO ₄) ₃ /L
pH de coagulação:	7,01	
Granulometria:	10 a 20	mm
Altura do leito:	1,50	m
Fluxo de operação:	48,0	m ³ /m ² .dia
Tempo de detenção total:	27,0	min

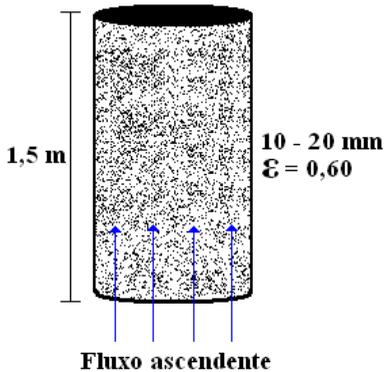


Figura 14. Características operacionais e configuração do FMG (T17), (ϵ = porosidade do leito).

A seguir são apresentados os gráficos de desempenho da carreira de floculação em relação aos parâmetros turbidez, cor verdadeira e absorvância em 254 nm.

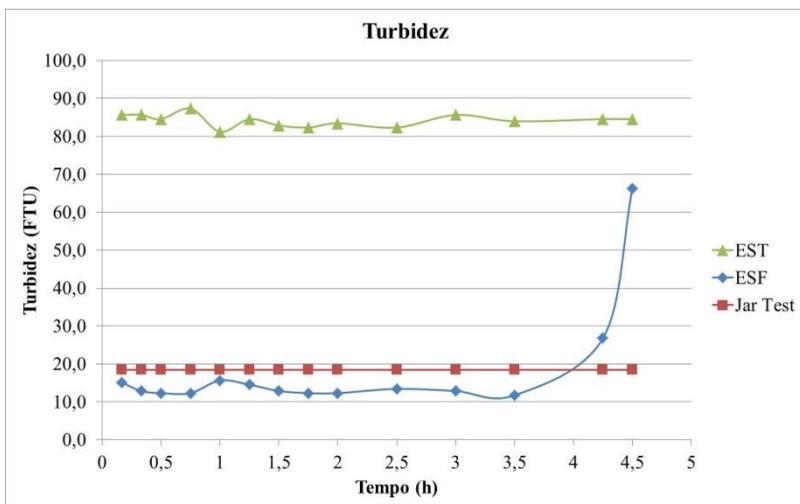


Figura 15. Comportamento da turbidez durante o ensaio T17 da FMG.

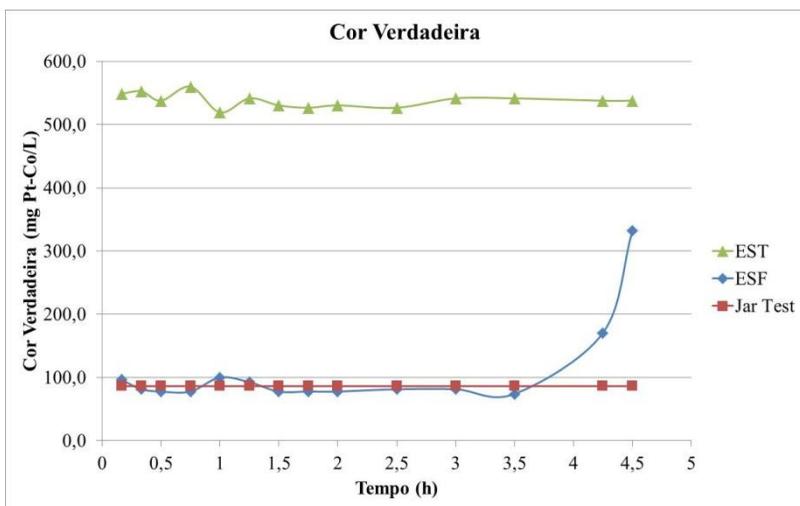


Figura 16. Comportamento da cor verdadeira durante o ensaio T17 da FMG.

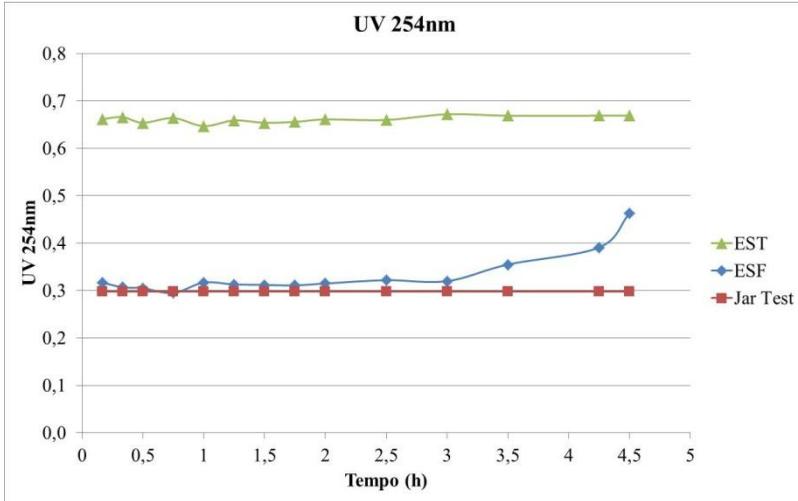


Figura 17. Comportamento da absorbância em 254 nm durante o ensaio T17 da FMG.

Observa-se na *Figura 15* uma melhor performance da FMG em relação aos ensaios de Jar Test, sendo que a turbidez do ESF permaneceu constante em torno de 12 FTU durante aproximadamente 4 horas e, após este período, ocorreu o transpasse. Entretanto, a remoção de cor foi apenas equivalente aos ensaios de Jar Test enquanto o parâmetro UV_{254nm} , mostrou-se inferior àquele obtido na decantação em Jar Test (*Figuras 16 e 17, respectivamente*).

De forma geral, apesar da evolução na remoção de turbidez em relação ao T16, a curta duração da carreira de floculação bem como a baixa remoção dos outros contaminantes monitorados permitiu descartar a utilização desta configuração no restante dos estudos.

A terceira configuração granulométrica testada no floculador (T18) foi composta pelas seguintes granulometrias, 10 a 20 mm e 6,35 a 9,52 mm, sendo que as características deste ensaio são mostradas na *Tabela 14* enquanto a disposição granulométrica é apresentada na *Figura 18*.

Tabela 14. Condições experimentais do ensaio de FMG com granulometria entre 6,35 e 20 mm (T18).

Turbidez inicial:	71,78	FTU
Cor verdadeira inicial:	475,99	mg Pt-Co/L
UV _{254nm} inicial:	0,540	nm
Dosagem de coagulante:	40	mg Al ₂ (SO ₄) ₃ /L
pH de coagulação:	6,71	
Granulometria:	6,35 a 20	mm
Altura do leito:	1,50	m
Fluxo de operação:	48,0	m ³ /m ² .dia
Tempo de detenção total:	26,1	min

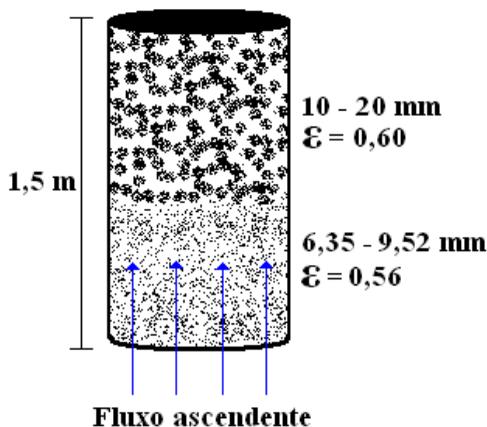


Figura 18. Características operacionais e configuração do FMG (T18), (ϵ = porosidade do leito).

A *Figura 19*, a seguir, apresenta o comportamento da composição aplicada no T18 quanto à remoção de turbidez, a qual resultou em 86% de remoção média do ESF contra 75,9% dos ensaios de Jar Test. Podemos perceber também que a carreira de floculação aumentou para 11 horas, valor este comparado as carreiras de filtração usuais. Para este caso, a carreira também foi encerrada devido à deterioração da qualidade do ESF.

Apesar destes ótimos resultados, a remoção de cor verdadeira e absorvância em 254 nm foi apenas equivalente ao processo de decantação (*Figuras 20 e 21*).

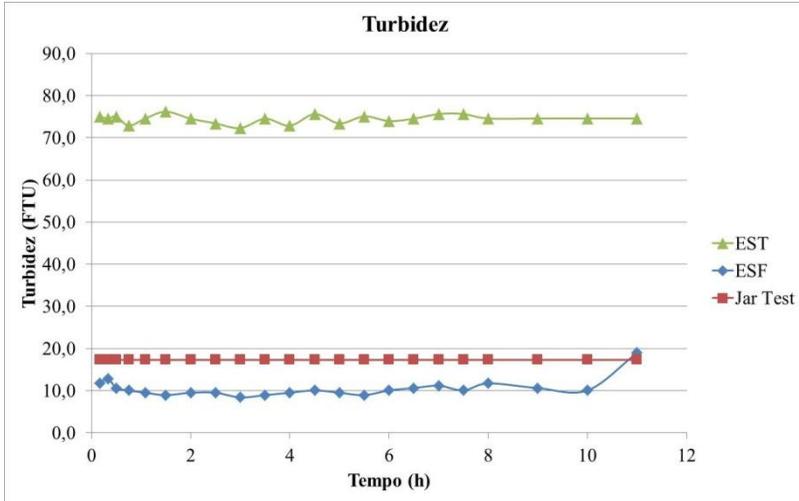


Figura 19. Comportamento da turbidez durante o ensaio T18 da FMG.

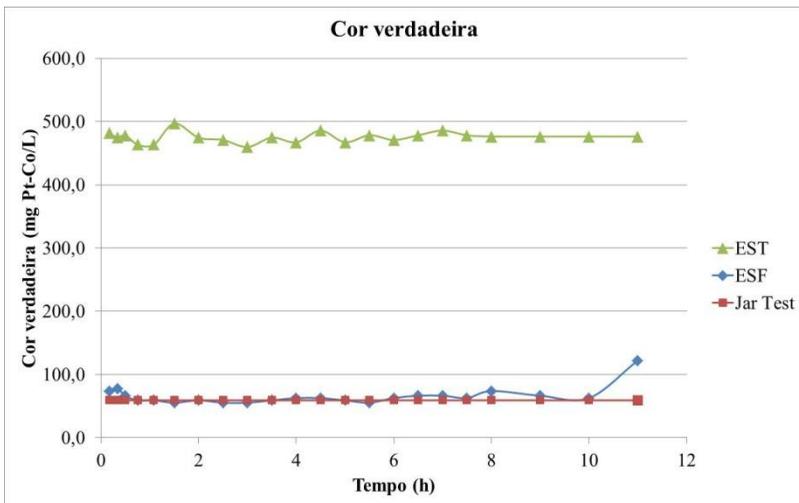


Figura 20. Comportamento da cor verdadeira durante o ensaio T18 da FMG.

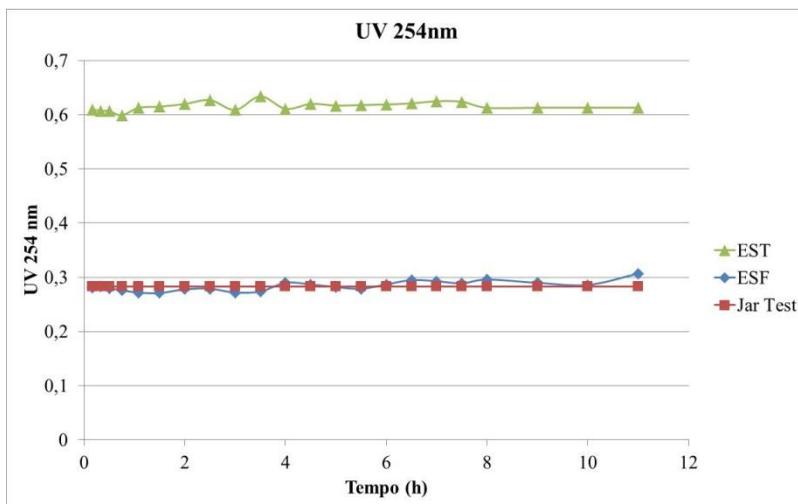


Figura 21. Comportamento da absorvância em 254nm durante o ensaio T18 da FMG.

No quarto e último teste aplicado (T19) foi utilizada a faixa granulométrica de 6,35 a 9,52 mm. As principais condições do experimento seguem na *Tabela 15* e na *Figura 22*.

Tabela 15. Condições experimentais do ensaio de FMG com granulometria entre 6,35 e 9,52 mm (T19).

Turbidez inicial:	80,11	FTU
Cor verdadeira inicial:	497,02	mg Pt-Co/L
UV _{254nm} inicial:	0,683	nm
Dosagem de coagulante:	36	mg Al ₂ (SO ₄) ₃ /L
pH de coagulação:	6,90	
Granulometria:	6,35 a 9,52	mm
Altura do leito:	1,50	m
Fluxo de operação:	48,0	m ³ /m ² .dia
Tempo de detenção total:	25,2	min

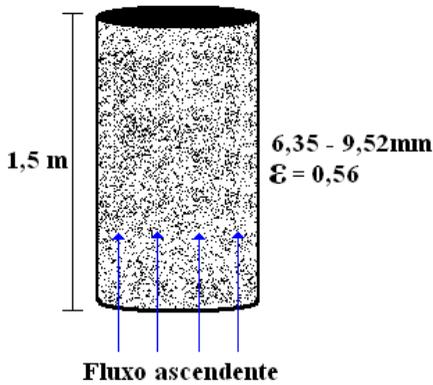


Figura 22. Características operacionais e configuração do FMG (T19), (ϵ = porosidade do leito).

Os gráficos mostrados nas *Figuras 23, 24 e 25* permitem concluir que houve uma remoção de turbidez e cor verdadeira superiores na FMG frente aos ensaios de Jar Test e um desempenho semelhante das duas tecnologias no parâmetro UV_{254nm} . Além disso, fica claro que a carreira de floculação foi encerrada devido ao transpasse por volta das 5,5 h de operação.

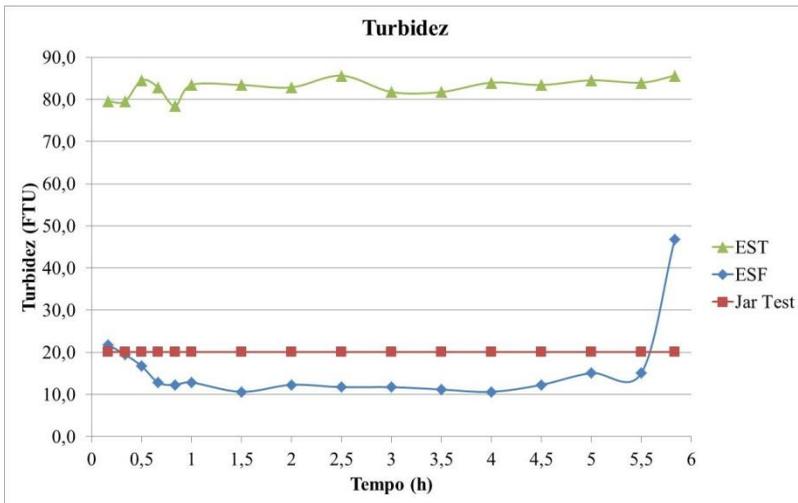


Figura 23. Comportamento da turbidez durante o ensaio T19 da FMG.

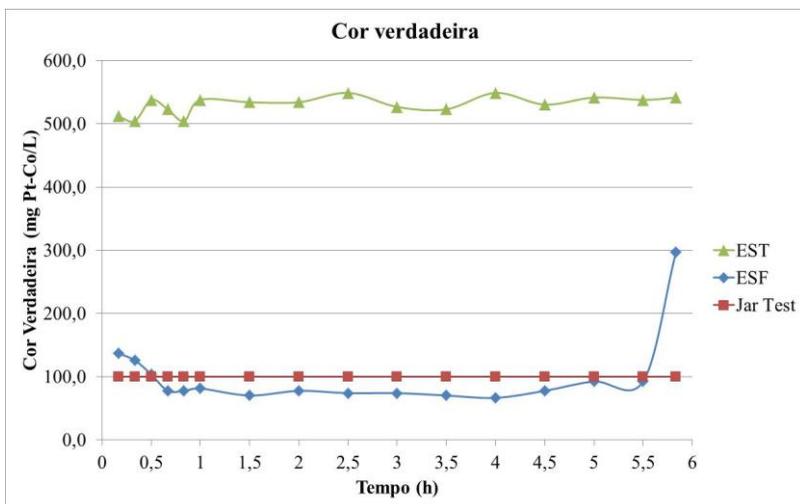


Figura 24. Comportamento da Cor Verdadeira durante o ensaio T19 da FMG.

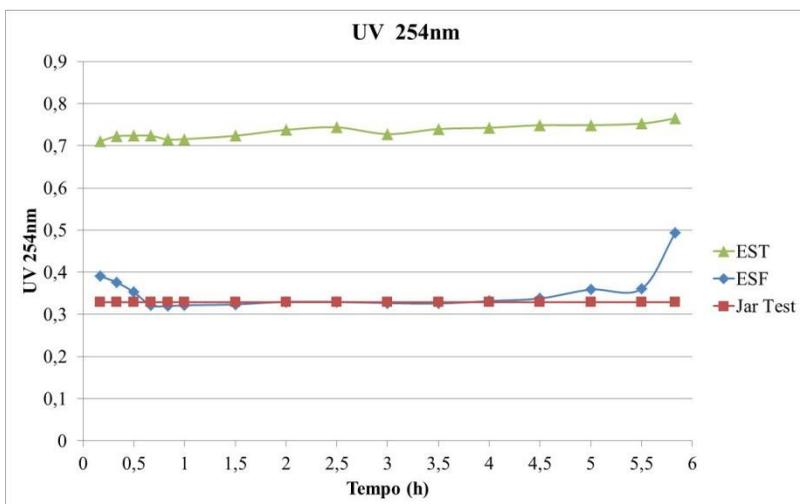


Figura 25. Comportamento da absorvância em 254nm durante o ensaio T19 da FMG.

A *Figura 26* apresenta de forma resumida os resultados alcançados pela FMG.

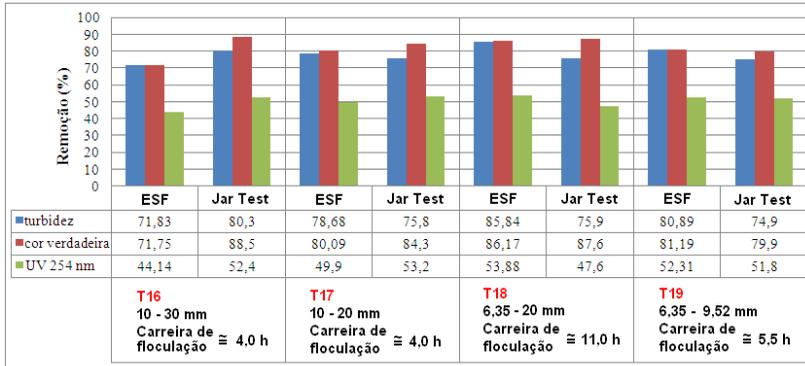


Figura 26. Quadro comparativo dos experimentos de FMG.

Os resultados da FMG, resumidos no quadro da Figura 26, permite-nos concluir que:

- O arranjo granulométrico que apresentou melhor desempenho foi o de 75 cm da granulometria 6,35 a 9,52mm e 75 cm da faixa de 10 a 20 mm (T18).
- Para o T18, a remoção média de turbidez e absorbância em 254 nm foram superiores para o processo de FMG frente ao processo de coagulação, floculação e decantação (ensaios de Jar Test).
- Turbidez do ESF entre 10 e 15 FTU foram alcançadas, valores estes compatíveis para aplicação da filtração direta descendente.
- Carreiras de floculação de 11 horas foram obtidas permitindo lavagens em intervalos de tempo compatíveis aos aplicados em sistemas de filtração.
- Em nenhum momento a turbidez ficou abaixo de 5 FTU, ratificando a necessidade do processo de filtração para o reuso deste efluente.

5.4 Filtração Rápida Descendente (FRD)

Para a determinação das melhores condições de filtração, foram realizados 3 testes. Para cada teste de filtração, fez-se, previamente, um ensaio de coagulação em Jar Test para determinar o ponto ótimo de coagulante a ser dosado, operando-se nesta condição o sistema completo, ou seja, coagulação em linha, FMG seguida por FRD. A *Tabela 16* apresenta as nomenclaturas designadas para os experimentos enquanto os parâmetros de operação constam na *Tabela 17*.

Tabela 16. Identificação dos experimentos realizados no estudo da FRD.

Dosagem ótima de coagulante (CJT) (resultados no anexo B)	Floculação em meio granular (FMG) (resultados no anexo B)	Filtração rápida descendente (FRD)
T20.1	T20.2	T20
T21.1	T21.2	T21
T22.1	T22.2	T22

Tabela 17. Parâmetros de operação aplicados no processo de FRD.

Teste	Altura e composição da camada	Tempo de residência em cada elemento (min)	Taxa de filtração (m³/m².dia)	Conc. de Al₂(SO₄)₃ (mg/L)
T20	250 mm areia	0,65	≈ 227,0	24,0
	500 mm CP	1,45		
T21	750 mm CP	2,18	≈ 227,0	38,0
T22	750 mm CP	3,72	≈ 136,0	30,0

Os testes T20 e T21 diferem-se basicamente pela composição do meio granular, sendo o primeiro composto por um leito de dupla camada e o segundo por uma camada simples. O objetivo foi identificar a maior remoção de contaminantes dentre as duas opções. Os resultados atingidos pelo processo de filtração destes dois experimentos podem ser observados pelas *Figuras 27, 28 e 29*.

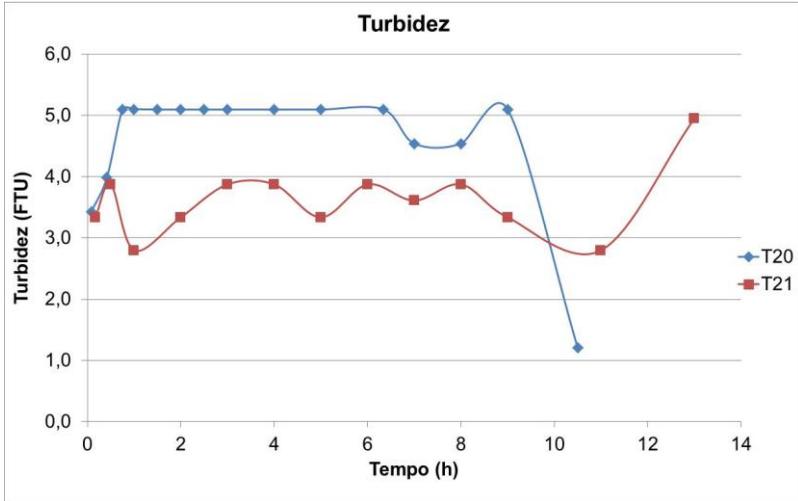


Figura 27. Comportamento da turbidez nos testes de FRD – T20 e T21.

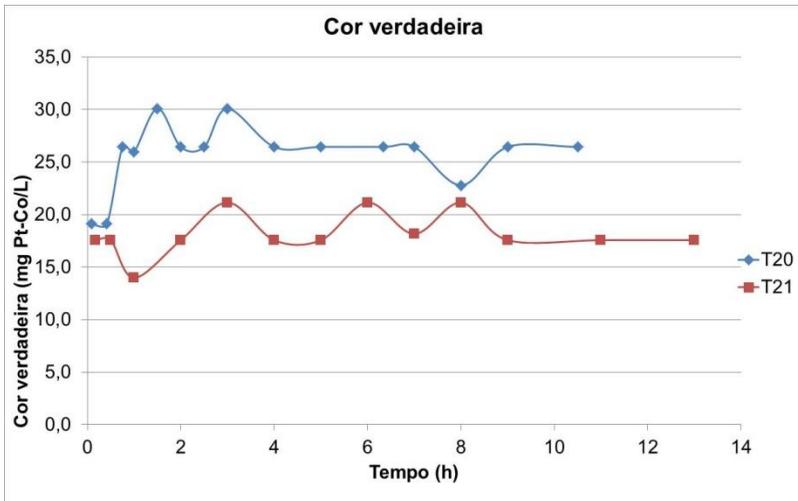


Figura 28. Comportamento da cor verdadeira nos testes de FRD – T20 e T21.

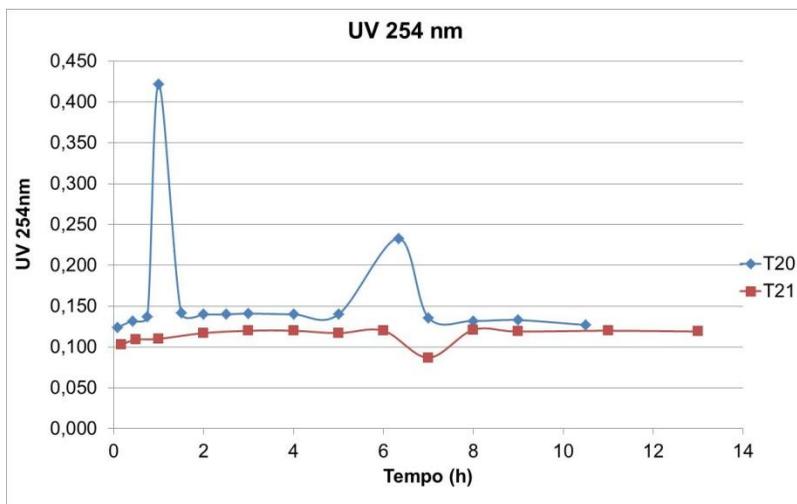


Figura 29. Comportamento da absorvância em 254 nm nos testes de FRD – T20 e T21.

Em função de uma qualidade inferior do ESF, proveniente do FMG, o teste T20 obteve turbidez média de 4,58 FTU, levemente abaixo do valor máximo desejado (5 FTU), enquanto o teste T21 apresentou melhores resultados de água de reuso com turbidez média de 3,5 FTU. As duas carreiras de filtração tiveram que, por falta de ESF, ser encerradas antes de ocorrer o transpasse ou diminuição de vazão. Cabe ressaltar ainda, que a remoção de contaminantes do teste T20 foi maior se comparada com o T21, conforme tabela resumo abaixo:

Tabela 18. Comparativo de remoção de contaminantes dos testes T20 e T21.

Teste	Remoção média de turbidez (%)	Remoção média de Cor verdadeira (%)	Remoção média de UV _{254 nm} (%)	Carreira de filtração (h)
T20	55,63	31,32	23,15	> 10,5
T21	48,41	29,42	19,94	> 13,0

Os resultados de remoção vão ao encontro dos estudos desenvolvidos por CONLEY e PITMAN (1960) que mostraram que, ao utilizar uma camada de antracito disposta sobre a areia formando leito de dupla camada, diminui-se o inconveniente da estratificação do leito

proporcionando uma perda de carga inferior aos filtros de camada simples, além da melhora na qualidade da água gerada. Sendo assim, sugere-se que a maior remoção observada no teste T20 deve-se aos benefícios proporcionados pela dupla camada granular.

Com o intuito de avaliar a remoção dos contaminantes em função do tempo de contato com o CP, realizamos um terceiro teste com tempo de residência 70% maior que no T21, obtido pela diminuição da taxa de filtração.

Os dados comparativos entre os dois tempos de contato e a mesma composição granular estão abaixo, nas *Figuras 30, 31 e 32*, as quais mostram o desempenho da filtração na remoção de turbidez, cor verdadeira e UV_{254nm} , respectivamente.

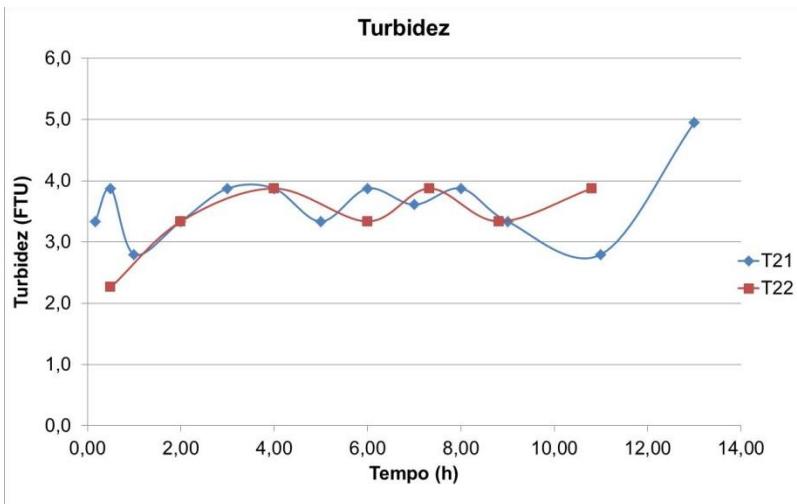


Figura 30. Comportamento da turbidez nos testes de FRD – T21 e T22.

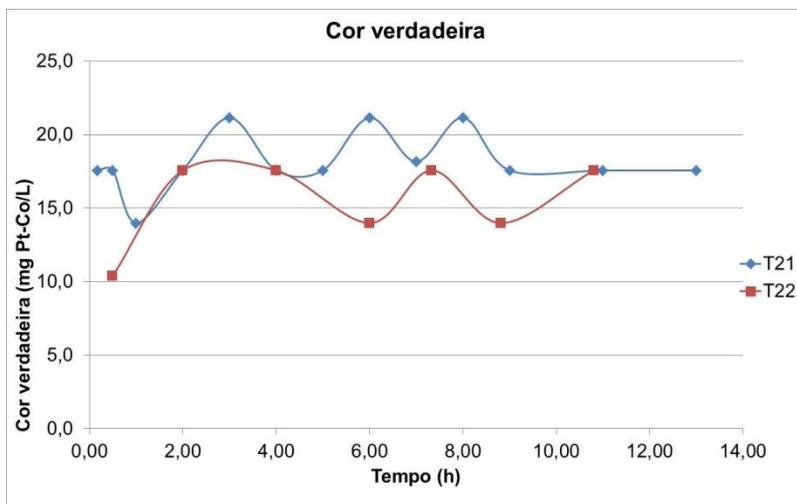


Figura 31. Comportamento da cor verdadeira nos testes de FRD – T21 e T22.

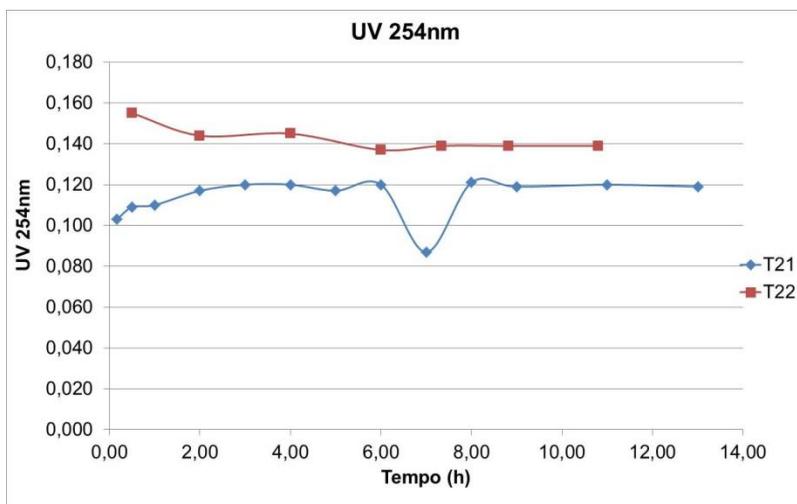


Figura 32. Comportamento da absorvância em 254 nm nos testes de FRD – T21 e T22.

A Tabela 19, abaixo, compara as remoções de turbidez, cor verdadeira e UV_{254nm} para ambos os testes.

Tabela 19. Comparativo de remoção de contaminantes dos testes T21 e T22.

Teste	Remoção média de turbidez (%)	Remoção média de Cor verdadeira (%)	Remoção média de UV _{254 nm} (%)	Tempo de contato (min)
T21	48,41	30,42	19,94	2,18
T22	37,33	33,80	10,28	3,72

Podemos perceber pelos *Gráficos 30, 31 e 32* e pela *Tabela 19* que, mesmo com o aumento do tempo de contato do ESF com CP, os resultados alcançados no T22 são muito semelhantes ao T21, demonstrando que um tempo de contato maior não implica em uma capacidade de remoção mais acentuada. Cabe ressaltar que o ESF utilizado nos dois experimentos, provenientes da FMG, tinha características similares, conforme *Tabela 20*, abaixo:

Tabela 20. Dados do ESF utilizado nos testes T21 e T22.

Teste	Turbidez média (FTU)	Cor verdadeira média (mg Pt-Co/L)	UV _{254 nm} média (nm)
T21.2	7,87	25,93	0,144
T22.2	5,72	28,31	0,159

Estes resultados sugerem que a capacidade de remoção de contaminantes não está intimamente ligada ao tempo de contato com o sólido, mas sim pela altura da camada. Verifica-se, ainda, que as taxas de filtração trabalhadas não são determinantes na qualidade final do efluente. Entretanto, isto não significa que poderíamos aumentar a taxa para valores acima de 227 m³/m².dia sem prejuízos para a qualidade do filtrado.

Vale ressaltar que o teste 22 também foi paralisado por falta de ESF no tempo de 11 horas de filtração.

Concluimos que, dentro dos critérios estudados, as melhores condições são a formação de um leito de dupla camada com altura de areia de 250 mm e CP de 750 mm operando com taxa de filtração de 227 m³/m².dia. Os resultados demonstram que as carreiras de filtração devem ser superiores há 11 horas proporcionando turbidez menor que 5,0 FTU, como almejado.

5.5 Desinfecção

A classificação dos coliformes segundo SILVA (1997) apresenta o grupo de Coliformes totais que inclui as bactérias na forma de bastonetes Gram-negativos, não esporogênicos, aeróbios ou aeróbios facultativos, capazes de fermentar a lactose com produção de gás, em 24 a 48 horas a 35 °C. Apresenta-se cerca de 20 espécies, dentre as quais encontram-se tanto bactérias originárias do trato intestinal de humanos e outros animais de sangue quente.

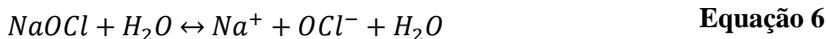
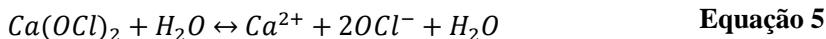
Em processos de tratamento de esgotos, em geral, bactérias e vírus são inativados pela ação de desinfetantes, enquanto cistos de protozoários e ovos de helmintos são removidos por filtração ou sedimentação. Além disso, a eficácia relativa de cada desinfetante químico é geralmente relacionada pelo produto da concentração do agente desinfetante pelo tempo de contato, “*C.t*” (GONÇALVES, 2003).

Na utilização do cloro, quando este é adicionado a uma água quimicamente pura, ocorrem as seguintes reações:



A pH 5 ou abaixo, o residual é devido apenas ao HClO (ácido hipocloroso). A pH 7,5, as concentrações de HClO e OCl⁻ (íon hipoclorito) são praticamente iguais, e a pH 10 ou superior, todo o residual de cloro passa a ser devido somente ao OCl⁻ (RICHTER, 2009).

O cloro também pode ser aplicado sob as formas de hipoclorito de cálcio e hipoclorito de sódio, os quais, em contato com a água, se ionizam conforme as reações:



Ao longo deste trabalho, para verificar a eficiência na inativação dos microrganismos por desinfecção, foram realizados testes com concentrações iniciais de 2,0 e 3,0 mg Cl₂/L e tempo de contato de 120 minutos, proporcionado “*C.t*” compatíveis com a literatura, conforme já discutido no item 3.3.4. O efluente utilizado (ESFF) é o proveniente do sistema de filtração onde se avaliou a remoção de coliformes totais.

As Figuras 33 e 34 mostram a variação do cloro em função do tempo de contato e o efeito da dosagem de hipoclorito no pH da solução, respectivamente.

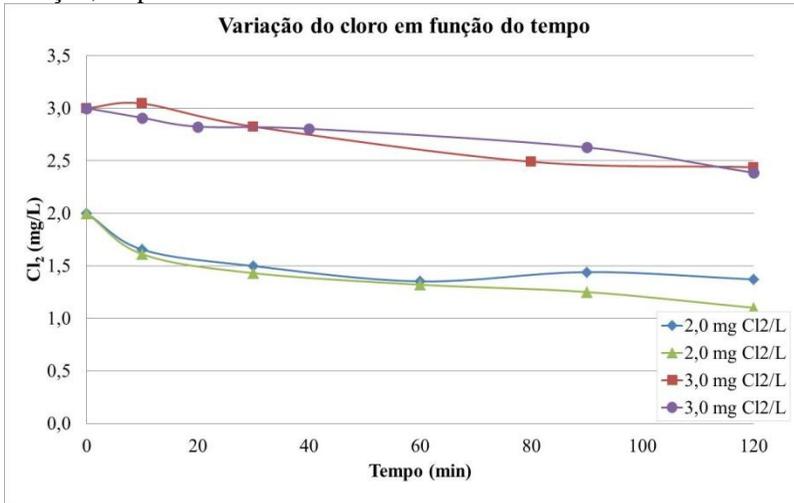


Figura 33. Variação do residual de cloro em função do tempo de contato.

A Figura 33 apresenta curvas com perfis descendentes indicando consumo de cloro. Este consumo ao longo do tempo é conhecido como demanda de cloro, ocasionada, provavelmente, pela presença de microrganismos e compostos amoniacais no efluente. Para dosagens iniciais de 3,0 mg Cl₂/L, o residual de cloro mostrou-se elevado, em torno de 2,4 mg/L, enquanto que as dosagens de 2,0 mg/L apresentaram residual médio de 1,25 mg/L. Vale salientar que um possível excesso de cloro também ocasiona aumento de custo do processo.

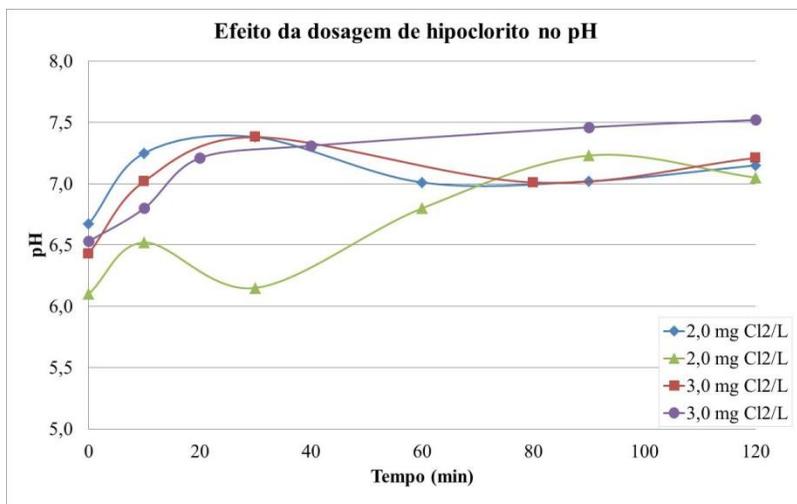


Figura 34. Efeito da dosagem de hipoclorito de cálcio no pH.

A *Figura 34* mostra que o pH da solução é influenciado pela característica básica do hipoclorito de cálcio, sugerindo que, na maioria das vezes, não teremos necessidade de correção de pH no final do processo.

As *Figuras 35 e 36*, abaixo, mostram a evolução na remoção de coliformes em cada etapa do tratamento, que são sumarizadas na *Tabela 21*. Estes gráficos mostram que, para todos os testes realizados, conseguimos eliminar completamente os coliformes totais das amostras, resultados excelentes para nossos objetivos.

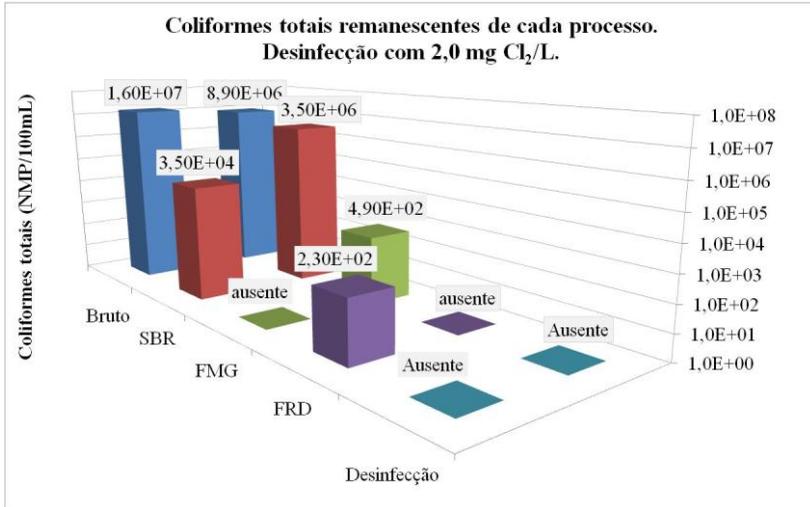


Figura 35. Desempenho de cada tecnologia empregada no processo na remoção de coliformes totais (desinfecção com 2,0 mg Cl₂/L). Gráficos em escala logarítmica.

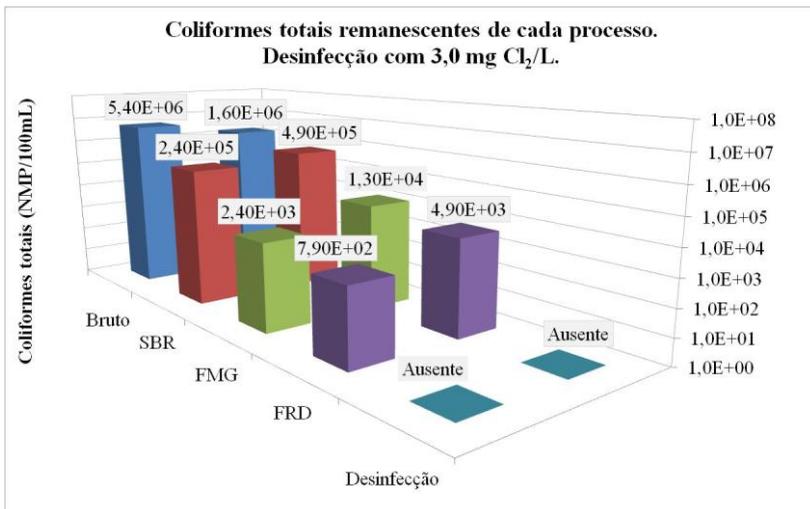


Figura 36. Desempenho de cada tecnologia empregada no processo na remoção de coliformes totais (desinfecção com 3,0 mg Cl₂/L). Gráficos em escala logarítmica.

Tabela 21. Contagem de coliformes totais em cada etapa do tratamento.

Dosagem de cloro	Coliformes totais (NMP/100 mL)						
	SBR/EST	FMG	Remoção	FRD	Remoção	Desinfecção	Remoção
2,0 mg/L	3,50E+06	4,90E+02	99,99%	1,00E+00	0,01%	0,00E+00	0,00%
	3,50E+04	0,00E+00	100,00%	2,30E+02	0,00%	0,00E+00	0,00%
3,0 mg/L	4,90E+05	1,30E+04	97,35%	4,90E+03	1,65%	0,00E+00	1,00%
	2,40E+05	2,40E+03	99,00%	7,90E+02	0,67%	0,00E+00	0,33%

Observa-se a grande contribuição do processo de floculação em meio granular na remoção da contagem de coliformes totais, (acima de 99% em todos os testes) o que acaba não sobrecarregando a filtração e a desinfecção. Esta remoção influencia diretamente na quantidade necessária de desinfetante a ser utilizado impactando diretamente nos custos de processo.

A filtração teve uma participação modesta na remoção da contagem de coliformes totais, com valores da ordem de 10^3 NMP/100mL. Entretanto, estudos mostram o bom desempenho da filtração na remoção de microrganismos patogênicos. TOSETTO (2005), através de estudos de filtração direta de esgoto com pré-floculação, atingiu remoções médias de: 60,0% para coliformes totais, 63,2% para *E. coli*, 80,9% para *Giardia spp* e 100% para *Cryptosporidium spp*. ZANETTI et al (2006), operando um filtro piloto de dupla camada (antracito e areia), com taxa de filtração de 206,4 $m^3/m^2.dia$ removeu 54,1% de coliformes totais, 52% de coliformes fecais e 51,5% de *E. Coli*.

5.6 Dimensionamento de uma Estação de Reuso de Esgoto Sanitário - ETER

Para as informações subsequentes, entende-se “Estação de Tratamento de Esgoto para Reuso” como “ETER”.

A unidade de tratamento para a obtenção de água de reuso contempla as seguintes unidades: tanque de homogeneização (ou amortecimento), correção de pH, coagulação em linha, floculação em meio granular de fluxo ascendente, filtração descendente em leito de dupla camada, desinfecção. Propõe-se que a ETER seja instalada em unidades de produção de esgoto secundário capazes de fornecer água

tratada em qualidade semelhante ou superior a água de estudo. A *Figura 37* mostra um layout de uma planta de tratamento secundário por reator SBR onde se propõe a instalação de uma unidade de tratamento terciário para reuso.

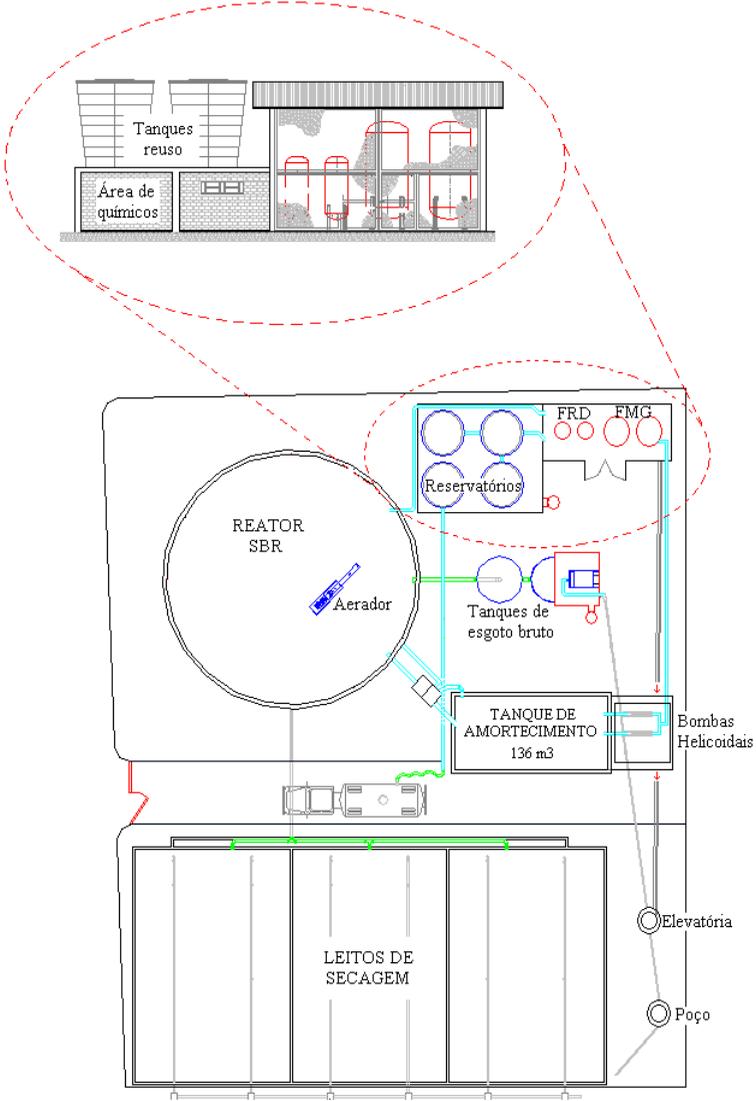


Figura 37. Layout geral da planta de reuso de esgoto.

A unidade proposta tem capacidade nominal de 187,5 m³/dia e é adequada para a produção de água de reuso para uma comunidade de 2.500 habitantes, cujas características médias são mostradas na *Tabela 22*.

Tabela 22. Dados de projeto da Estação de água de reuso proposta neste estudo.

Dados populacionais	
População total	2.500 Habitantes
Consumo per capita	200 L/hab.dia
Coefficiente de retorno	80%
Caracterização Quali-Quantitativa dos Esgotos Sanitários	
Vazão média	300,0 m ³ /dia
Vazão média de Infiltração	74,31 m ³ /dia (20 %)
Vazão média total	374,31 m ³ /dia
Vazão do Pico	7,11 L/s
Carga orgânica de DBO ₅	135,0 kg/dia (54,0 g/hab.dia)
Carga orgânica de DQO	275,0 kg/dia (110,0 g/hab.dia)
Carga de SST	150,0 kg/dia (60,0 g/hab.dia)
Carga de N _t	25,0 kg/dia (10,0 g/hab.dia)
Carga de P _t	5,0 kg/dia (2,0 g/hab.dia)

O conceito do projeto de reuso prevê uma estação programada para tratar 50% da vazão média diária gerada por esta comunidade, a qual pode facilmente ser ampliada, caso necessário. Os dados de projeto da ETER são mostrados na *Tabela 23*.

Tabela 23. Dados de projeto da estação de reuso.

Vazão máxima de esgoto tratado diariamente na ETE:	375,0 m ³ /dia
Bateladas diárias no reator SBR:	3,0 bateladas/dia
Quantidade a ser tratada na ETER:	50% do volume diário
Vazão máxima diária na ETER:	187,5 m ³ /dia
	22 h/dia
Regime de funcionamento da ETER	7 dias/semana
	4 semanas/mês
Vazão da ETER:	≈ 8,5 m ³ /h
Volume mensal de água de reuso:	5.250 m ³ /mês

5.6.1 Tanque de amortecimento

Como os descartes de esgoto tratado provenientes do SBR geram um volume de aproximadamente 125 m³/descarte, faz-se necessário a implantação de um tanque de amortecimento e homogeneização. O formato do tanque proposto é retangular, com dimensões de 4,75 x 11,00 m e altura de 2,60m. As dimensões de largura e comprimento são definidas considerando o espaço existente no local. O volume útil calculado é de 136m³ (vide memorial de cálculo no Anexo A). O efluente chega ao tanque de amortecimento por gravidade.

O bombeamento para o processo dar-se-á por meio de 2 bombas helicoidais, operando em paralelo, com vazão de operação de 4,3 m³/h cada.

5.6.2 Preparo e dosagem de produtos químicos

Os produtos químicos utilizados na ETER serão sulfato de alumínio, soda cáustica líquida e hipoclorito de sódio. Os cálculos, constantes no anexo A, são baseados no consumo médio de cada reagente químico durante os experimentos e estão sumarizados na *Tabela 24*.

Tabela 24. Dados da unidade de floculação em meio granular.

Parâmetro	Sulfato de alumínio	Soda cáustica	Hipoclorito de cálcio
Concentração da solução utilizada:	10 %	10 %	125 g Cl ₂ /L
Quantidade média gasta por litro de efluente:	35 mg/L	15 mg/L	2 mg Cl ₂ /L
Volume gasto por hora:	4,63 L/h*	0,85 L/h*	0,14 L/h*
Volume gasto por mês:	3056 L/mês	561 L/mês	93 L/mês
Volume útil definido para o tanque de preparo:	600 L	600 L	Bombonas de 60 Kg
Frequência de preparo:	5,1 dias	32 dias	15,6 dias

* cálculo apresentado no Anexo A.

O hipoclorito de sódio é o produto mais adequado para cloração em sistemas simples e de pequeno porte em virtude da facilidade de aplicação em pequenas vazões operacionais, do baixo risco de manuseio e armazenamento e do baixo custo (GONÇALVES, 2003). Em geral, o

hipoclorito de sódio 10% é fornecido em bombonas de 60 Kg (48L) ou a granel em carro-tanque. Neste trabalho, propõe-se o uso de bombonas de 60 Kg e dosagem direta, sem a necessidade de um tanque específico de diluição e preparação.

Propõe-se o uso de soda cáustica 50%, adquirida em bombonas de 50 Litros. A preparação será em tanque agitado com volume útil de 600L e diluição da mistura com água de reuso tratada. Bomba dosadora com capacidade de 0,85 L/h, conforme cálculo do *Anexo A*. A especificação completa do tanque de preparo, do misturador e da bomba dosadora da soda estão disponíveis no *Anexo C*.

O sulfato de alumínio 9% será adquirido em bombonas de 50 Litros. A preparação será em tanque agitado com volume útil de 600L e diluição da mistura com água de reuso tratada. Bomba dosadora com capacidade de 4,63 L/h, conforme cálculo do *Anexo A*. A especificação completa do tanque de preparo, do misturador e da bomba dosadora de sulfato estão disponíveis no *Anexo C*.

5.6.3 Floculador em meio granular

Para o dimensionamento do floculador foram levados em consideração os parâmetros de projeto discutidos anteriormente, bem como demais cálculos necessários constantes no memorial de cálculos e apresentados nas *Tabelas 25 e 26*. A água utilizada nas retrolavagens é proveniente dos tanques de água de reuso da própria estação.

Tabela 25. Características do material granular de floculação.

Camadas	Material	Altura de camada
Superior	Carvão mineral 10 – 20 mm	0,75 m
Inferior	Carvão mineral 6,4 – 9,5 mm	0,75 m
Suporte	Pedregulho 1/8” – 1/4”	0,30 m

Tabela 26. Dados da unidade de floculação em meio granular.

Parâmetro	Valor
Vazão de entrada na ETER	8,5 m ³ /h
Taxa máxima no floculador	48,0 m ³ /m ² .dia
Sentido de escoamento durante a floculação	Ascendente
Unidades de floculação em paralelo	2,0 unidades
Diâmetro interno *	1,65 m
Área de escoamento *	2,13 m ²
Altura interna definida	3,0 m
Taxa de retrolavagem	670 m ³ /m ² .dia
Vazão de retrolavagem	60 m ³ /h
Tempo de retrolavagem	10 – 15 min
Sentido de escoamento durante a retrolavagem	Descendente e ascendente

* Cálculos no Anexo A.

Para retrolavagem faz-se necessário uma bomba centrífuga horizontal com vazão nominal de 60 m³/h (vide especificação completa no *Anexo C*).

5.6.4 Filtros descendentes

Para o dimensionamento do sistema de filtração foram levados em consideração os parâmetros de projeto discutidos anteriormente, bem como demais cálculos necessários constantes no memorial de cálculos e apresentados nas *Tabelas 27 e 28*. A água utilizada nas retrolavagens é proveniente dos tanques de água de reuso da própria estação.

Tabela 27. Características dos materiais filtrantes adotados.

Camadas	Material	Altura de camada
Superior	Carbotrat premium, TE 1,00 mm	0,90 m
Inferior	Areia lavada, TE 0,50mm	0,25 m
Suporte	Pedregulho médio	0,25 m

Tabela 28. Dados de projeto das unidades de filtração descendente.

Parâmetro	Valor
Vazão de entrada na ETER	8,5 m ³ /h
Taxa máxima de filtração	227 m ³ /m ² .dia
Sentido de escoamento da filtração	Descendente
Unidades filtrantes em paralelo	2,0 unidades
Diâmetro interno *	0,80 m
Área total de cada unidade *	0,45 m ²
Taxa de retrolavagem	1058 m ³ /m ² .dia
Vazão de lavagem *	20 m ³ /h
Expansão na retrolavagem	30 – 40%
Tempo de lavagem	10 – 15 min
Sentido de escoamento durante a retrolavagem	Ascendente

* Cálculos no Anexo A.

Para retrolavagem, faz-se necessária bomba centrífuga com vazão nominal de 20,0 m³/h. (vide especificação completa no *Anexo C*).

5.6.5 Reservatórios de água de reuso

Para estocagem de água de reuso foi adotado um volume de 80 m³, utilizando-se de 4 reservatórios redondos de fibra com capacidade de 20 m³ cada. Este volume nos imprime um tempo máximo de estocagem de aproximadamente 9,0 horas, considerando a capacidade máxima de tratamento da estação.

5.6.6 Custos estimados de implantação e operação

As *Tabelas 29, 30 e 31* apresentam, respectivamente, estimativas de custos de implantação, de operação da planta e de depreciação mensal da estação de reuso de esgoto sanitário.

Tabela 29. Custos estimados de implantação de uma ETER.

Equipamento/Projeto/ Obra/Instalação	Quant.	R\$/unidade	R\$ total
Tanque de preparo para de produtos químicos	2 unid.	750,00	1.500,00
Misturador rápido vertical com motor 0,75 cv	2 unid.	2.057,00	4.114,00
Bomba helicoidal 4,3 m ³ /h (adutora)	2 unid.	5.790,00	11.580,00
Bomba centrífuga 60 m ³ /h (retrolavagem)	1 unid.	4.123,53	4.123,53
Bomba centrífuga 20 m ³ /h (retrolavagem)	1 unid.	2.123,10	2,123,10
Controlador de pH	1 unid.	3.025,00	3.025,00
Sonda de pH	1 unid.	2.420,00	2.420,00
Unidade filtrante, Ø 0,90m	2 unid.	13.240,00	26.480,00
Unidade filtrante, Ø 1,65m	2 unid.	28.380,00	56.760,00
Bomba dosadora (hipoclorito)	1 unid.	1.960,00	1.960,00
Bomba dosadora (sulfato)	1 unid.	2.027,00	2.027,00
Bomba dosadora (soda)	1 unid.	1.960,00	1.960,00
Carvão para FMG	6,41 m ³	500,00	3.205,00
Carvão para FRD	0,79 m ³	800,00	632,00
Areia para FRD	0,22 m ³	280,00	61,60
Seixos para FRD	0,22 m ³	280,00	61,60
Projeto elétrico	1 unid.	4.000,00	4.000,00
Projeto estrutural	1 unid.	8.000,00	8.000,00
Projeto processo mecânico	1 unid.	21.000,00	21.000,00
Obra civil (tanque de amortecimento)	1 unid.	121.082,40	121.082,40
Obra civil (área de químicos)	1 unid.	152.025,60	152.025,60
Tubulações	1 unid.	22.000,00	22.000,00
Instalações elétricas	1 unid.	32.000,00	32.000,00
Montagem mecânica	1 unid.	15.000,00	15.000,00
Total (R\$)			495.017,73

Tabela 30. Estimativa de custos mensal de operação da ETER.

Variável avaliada	Valor (R\$)	
Soda cáustica 10%	Consumo (L)	561,0
	Preço unitário (R\$/L)	0,24
	Custo mensal (R\$)	134,64
Sulfato de alumínio 10%	Consumo (L)	3.056,0
	Preço unitário (R\$/L)	0,6
	Custo mensal (R\$)	1800,00
Hipoclorito de sódio	Consumo (L)	93
	Preço unitário (R\$/L)	0,3
	Custo mensal (R\$)	28,0
Energia elétrica	Consumo mensal	5.082,3
	Preço unitário (R\$/unid)	0,25
	Custo mensal (R\$)	1.270,57
Análises químicas	Consumo (unid)	30
	Preço unitário (R\$/unid)	50,00
	Custo mensal (R\$)	1500,00
Mão de obra + manutenção	Custo mensal (R\$)	10.000,00
Custo total mensal (R\$)		14.733,21

Tabela 31. Depreciação baseada na instrução normativa nº 162 de 31/12/1998 da Secretaria da Receita Federal.

(continua)

Equipamento ou material permanente	Valor total (R\$)	Taxa anual de depreciação	Depreciação (R\$/mês)
Tanques de preparo para de produtos químicos	1.500,00	10 %	12,50
Misturador rápido vertical com motor 0,75 cv	4.114,00	10 %	34,28
Bomba helicoidal 4,3 m ³ /h (adutora)	11.580,00	10 %	96,50

Tabela 31. Depreciação baseada na instrução normativa nº 162 de 31/12/1998 da Secretaria da Receita Federal.

(conclusão)

Equipamento ou material permanente	Valor total (R\$)	Taxa anual de depreciação	Depreciação (R\$/mês)
Bomba centrífuga 60 m ³ /h (retrolavagem)	4.123,53	10 %	34,36
Bomba centrífuga 20 m ³ /h (retrolavagem)	2,123,10	10 %	17,69
Controlador de pH	3.025,00	10 %	25,21
Sonda de pH	2.420,00	10 %	20,17
Unidade filtrante, Ø 0,90m	26.480,00	10 %	220,67
Unidade filtrante, Ø 1,65m	56.760,00	10 %	473,00
Bomba dosadora (hipoclorito)	1.960,00	10 %	16,33
Bomba dosadora (sulfato)	2.027,00	10 %	16,89
Bomba dosadora (soda)	1.960,00	10 %	16,33
Obra civil (tanque de amortecimento)	121.082,40	4 %	403,61
Obra civil (área de químicos)	152.025,60	4 %	506,75
Tubulações	22.000,00	10 %	183,33
Instalações elétricas	32.000,00	10 %	266,67
Total mensal:			2.344,29

Seguem abaixo, nas *Tabelas 32 e 33*, estimativas de custo por metro cúbico de água de reuso produzida e os preços praticados atualmente na venda de água potável e de reuso.

Tabela 32. Estimativa do preço de produção por unidade de volume.

Volume produzido	8,5	m ³ /h
	22	h/ dia
	30	dias/mês
	5.610	m³/mês
Volume gasto nas retrolavagens dos FMG	60	m ³ /h
	10	minutos/retrolavagem
	2	Retrolavagens/dia
	2	unidades de FMG
	30	dias/mês
	- 1.100	m³/mês
Volume gasto nas retrolavagens dos FRD	20	m ³ /h
	10	minutos/retrolavagem
	2	retrolavagens/dia
	2	unidades de FMG
	30	dias/mês
	- 400	m³/mês
Volume aproveitado	4.110	m ³ /mês
Preço unitário de produção ⁽¹⁾	4,15	R\$/m³

⁽¹⁾ incluindo depreciação mensal.

Tabela 33. Preços praticados atualmente para água de reuso e potável.

Empresa	Tipo de água	Quantidade	Valor (R\$/m ³)	Observações
Casan	Potável	> 10 m ³ /mês	6,32	Tarifa industrial
Sabesp	Potável	> 50 m ³ /mês	6,83 – 11,82	Tarifa industrial
Sabesp	Reuso	-	0,88 – 2,99	Valores variáveis conforme qualidade da água fornecida

Analisando o preço unitário final da água de reuso produzida (R\$ 4,15/m³), percebemos a necessidade de ajustes de processo para

minimizar custos e aumentar a competitividade, já que este valor está cerca de 39% superior ao maior valor de venda de água de reuso produzida e fornecida pela SABESP (R\$ 2,99/m³ – *Tabela 33*). Entretanto, vale salientar que a água de reuso produzida pelo processo estudado tem valor inferior a água potável produzida pela CASAN e SABESP (*Tabela 33*), tornando-se uma opção para substituir a água potável nos casos em que a água de reuso atenda aos parâmetros de qualidade necessários (Ex. descarga de vasos sanitários, irrigação de jardins, lavagem de calçadas, entre outras).

Para minimização de custos, pode-se aumentar o volume de produção de água de reuso o que diminui os custos fixos por metro cúbico de água gerada. Além disso, devem-se aperfeiçoar os processos de retrolavagem já que estes consomem cerca de 26% do total de água de reuso produzida na ETER. Aprimorar o controle dos processos de tratamento da ETE secundária (EX: reator SBR) permitirão a entrada de um afluente de melhor qualidade na ETER o que, fatalmente, diminuirá quantidade de produtos químicos utilizados, reduzirá a quantidade de lodo gerado e aumentará os períodos entre as retrolavagens.

Para referências futuras, destaco a cotação do dólar americano em 16/12/2011 → US\$ 1,00 = R\$ 1,856.

6. CONCLUSÕES

Com base no trabalho desenvolvido, conclui-se que:

O efluente proveniente do reator SBR, utilizado nos experimentos, apresenta qualidade inferior ao usualmente obtido por este processo sendo necessário, portanto, ajustes no tratamento.

A faixa de pH ótima para coagulação é ampla, entre 6,0 a 7,0, sendo utilizado entre 6,5 e 7,0 nos experimentos evitando uma segunda correção de pH no final do processo.

A faixa de dosagem ótima para o sulfato de alumínio encontra-se entre 25 e 50 mg/L, sendo a média aplicada nos experimentos de 35 mg/L.

O processo de floculação em meio granular se mostrou mais eficiente do que a combinação de coagulação-floculação-decantação.

A combinação das faixas granulométricas de 6,95-9,5mm e 10-20 mm apresentou melhor performance na FMG.

A característica de retenção física no interior do FMG teve que ser acentuada para compensar a qualidade ruim do efluente proveniente do SBR e não comprometer o processo de filtração.

A composição granulométrica que apresentou melhor desempenho na FMG obteve carreira de floculação superior a 10 horas.

A filtração mostrou-se eficiente na maior taxa de escoamento, $227 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$.

O leito de dupla camada teve melhor desempenho que leito de camada simples.

As carreiras de filtração tiveram duração superior a 11 horas.

A desinfecção eliminou completamente os coliformes em todas as amostras analisadas.

A concentração ótima de cloro a ser utilizada é de $2,0 \text{ mg Cl}_2/\text{L}$ e tempo de contato 120 minutos. O residual de cloro médio resultante é de $1,25 \text{ mg Cl}_2/\text{L}$.

A remoção de coliformes foi intensa nos processos de FMG e FRD.

Os parâmetros de reuso estabelecidos foram completamente alcançados.

Os custos de operação devem ser otimizados, principalmente a quantidade de água necessária para retrolavagens. A otimização do SBR tende a mitigar os custos do processo terciário para reuso.

7. REFERÊNCIAS

AMIRTHARAJAH, A.; MILLS, K. M. **Rapid mix design for mechanisms of alum coagulation**. J. AWWA, 74, 1982.

APHA, **Standard methods for the examination of water and wastewater**, 20th edition, Publication of the American Public Health Association, Washington. APHA, AWWA, WEF, 1998.

ARBOLETA V.J., (1992). **Teoria y Practica de La Purificación Del Agua**, Asociacion Colombiana de Ingenieria Sanitaria y Ambiental – ACODAL, Colombia, 684p.

AZEVEDO NETTO, J. M. D. et al. **Técnica de abastecimento e tratamento de água**. v. II. São Paulo: CETESB, 1979.

BOSIO, A. 2011. **Obras do Projeto Aquapolo estão dentro do prazo**. 22/06/2011 13:29:57 disponível em <> <http://www.aquapolo.com.br/integra.asp?Codigo=11>. Acesso em 26/11/11.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. D.O.U 09/01/97.

BRASIL. Secretaria da Receita Federal. Instrução Normativa nº 162 de 31 de dezembro de 1998. Fixa prazo de vida útil e taxa de depreciação dos bens que relaciona. **Diário Oficial da União** de 07 de janeiro de 1998, pg 5

CARRIÓN, J.P E ESPARZA, M.L.C (1992). **Ciclo: Tratamiento. Série: Filtracion Rápida.** – Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Del Ambiente.

CONLEY W. R.; PITMAN, R. W. **Test program for filter evaluation at Hanford.** Journal of the American Water Works Association, 52(2), febrero, 1960, pp. 209-218.

CPRH, Companhia Pernambucana do Meio Ambiente, **Roteiro Complementar de Licenciamento e Fiscalização: Tipologia Galvanoplastia.** Recife - PE (2001).

CUNHA, V. D. **Estudo para proposta de critérios de qualidade de água para reuso urbano.** 2008. 106f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo , São Paulo, 2008.

DI BERNARDO, L. (Coordenador). **Tratamento de água para abastecimento por filtração direta.** Rio de Janeiro: ABES, Rima, 2003, 498 p.:il. Projeto PROSAB.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D. **Métodos e técnicas de tratamento de água.** São Carlos: RIMA, v.1, 2005. 792 p.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D. **Métodos e técnicas de tratamento de água.** São Carlos: RIMA, v. 2, 2005. 792 p.

GANOULIS, J.; PAPALOPOULOU, A. **Risk Analysis of Wastewater reclamation and Reuse.** Water Science and Technology, v.33, n.10-11, p. 297-302, 1996.

GIORDANI, S.; SANTOS, D. C. **Possibilidades de reuso dos efluentes domésticos gerados nas Bacias do Alto Iguaçu e Alto Ribeira -**

Região de Curitiba-Paraná. Sanare - Revista Técnica da Sanepar, Curitiba, v.19, n.19, p. 06-14, jan./jun. 2003.

GONÇALVES, R. F. (2003). **Desinfecção de efluentes sanitários, remoção de organismo patogênicos e substâncias nocivas. Aplicações para fins produtivos como agricultura, aquacultura e hidroponia.** PROSAB 3 – Programa de Pesquisas em Saneamento Básico. Vitória, ES.

HESPANHOL, I. 2003. **Potencial de reuso de água no Brasil: agricultura, indústria, municípios, recarga de aquíferos.** Bahia Análise e Dados, v13, n. especial, pg 411-437, Salvador, 2003.

HESPANHOL, I., MIERZWA, J., RODRIGUES, L.; SILVA, M. (2006). 29f. **Manual de Conservação e Reuso de água na Indústria. Rio de Janeiro:** Federação das Indústrias do Rio de Janeiro - FIRJAN/SEBRAE, 2006.

LEME, F. P. **Teoria e técnicas de tratamento de água.** São Paulo: CETESB, 1979.

LIMA, M. R. 2010. 200f. **Estudos comparativos de floculação hidráulica para águas de abastecimento em reatores de fluxo ascendente dotados de seixos rolados e de materiais sintéticos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade de Campinas, Campinas, 2010.

MACHADO, L.P., (2004). **Reuso de esgotos sanitários tratados para fins de água de reposição em torres de resfriamento – sistemas semi-abertos.** Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H.F.,(editores). **Reuso de Água**. Barueri, São Paulo.: Manole, 2003.

MONTEIRO, P. C. G., (2005). **Viabilidade do uso da radiação solar na desinfecção da água**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília.

NBR 12216/1992. **Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público** 18 pg. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Comitê Brasileiro de Construção Civil, Rio de Janeiro, Abril 1992.

NBR 13969/1997. **Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação**. 60 pg. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Comitê Brasileiro de Construção Civil, Rio de Janeiro, Setembro 1997.

NBR 14234/1998. **Produtos químicos para tratamento de água de abastecimento – Carvão antracitoso – Especificação e métodos de ensaio**. 16 pg. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Comitê Brasileiro de Construção Civil, Rio de Janeiro, Setembro 1999.

PETROBRÁS, 2011. **Investimentos em ações de reuso e conservação de água**. Publicado em 22/03/2011. Disponível em <>
<http://www.petrobras.com.br/pt/noticias/investimos-em-aco-es-de-reuso-e-conservacao-da-agua/>.

RAMOS, R. O – **Desempenho de reatores hidráulicos de floculação em regime de escoamento laminar no trecho de transição**. 2000. 199f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade de Campinas, Campinas, 2000.

RESOLUÇÃO 121. Conselho Nacional de Recursos Hídricos.
Estabelece diretrizes e critérios para a prática de reúso direto não potável de água na modalidade agrícola e florestal, definida na Resolução CNRH nº 54, de 28 de novembro de 2005. Resolução nº 121, de 16 de dezembro de 2010.

RESOLUÇÃO 54. Conselho Nacional de Recursos Hídricos.
Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água, e dá outras providências.
Resolução nº 54, de 28 de novembro de 2005.

REVISTA DAE. **3º Workshop de uso e reúso de águas residuárias.**
São Paulo: Sabesp, Ano LX, Agosto 2009.

RICHTER, C. A. **Água – Métodos e Tecnologia de Tratamento.** São Paulo: Ed. Blücher, 2009, 1ª edição, 340p.

RICHTER, C. A. e AZEVEDO NETTO, J. M. **Tratamento de água: tecnologia atualizada.** São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 4ª reimpressão 2002, 1991, 332p.

SANO, K.; MIURA, T. **Dual Water Supply System Using Reclaimed Wastewater In: Fukuoka City.** Sewage Works in Japan, 1990. p. 96-100.

SILVA, N. 1997. **Manual de métodos de análise microbiológica de alimentos.** Valéria Christina Amstalden - São Paulo : Livraria Varela, 1997.

SILVA FILHO, A. 2009. 112f. **Tratamento terciário de efluente de uma indústria de refrigerantes visando ao reúso – um estudo de caso.** Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos). Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

TCHOBANOGLIOUS, G., BURTON, F. L. **Wastewater engineering, disposal and reuse**. 3^a ed. Metcalf & Eddy, INC, 1991.

TOSETTO, M. S – **Tratamento terciário de esgoto sanitário para fins de reuso urbano**. 2005. 250f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade de Campinas, Campinas, 2005.
USEPA. (United States Environmental Protection Agency). **Guidelines for Water Reuse**. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA. September, 2004.

VARGAS, G. (2008). **Tratamento terciário de esgoto sanitário através de processos oxidativos avançados para a obtenção de águas de reuso**. Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina.

VAZ, L. G. L. (2009). **Performance do processo de coagulação/floculação no tratamento do efluente líquido gerado na galvanoplastia**. Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

VIGNESWARAN, S., and SUNDARAVADIVEL, M., 2004. **Recycle and Reuse Domestic Wastewater**. In Wastewater Recycle, Reuse and Reclamation, Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publisher, Oxford, UK, (<http://www.eolss.net>).

W.H.O. **Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater**. World Health Organization. ISBN 92 4 154685 9 (v. 4), France, 2006.

ZANETTI, F.; DE LUCA, G.; SACCHETTI, R. **Microbe removal in secondary effluent by filtration**. Annals of Microbiology, 56, October 2006.

ANEXO A – Memorial de cálculos

DIMENSIONAMENTO DO TANQUE DE AMORTECIMENTO

Considerações iniciais

- Este tanque tem a função de amortecimento e homogeneização e encontra-se entre o reator SBR e o tratamento físico-químico.
- Este dimensionamento leva em consideração todo o efluente proveniente do reator SBR para evitar alterações em uma possível ampliação da capacidade de tratamento da ETER.
- Volume médio diário, considerando 100% do efluente proveniente do SBR = 375,0 m³/dia

Volume médio proveniente do SBR = 375 m³/dia
Descartes realizados atualmente = 3 descartes/dia

$$\text{Volume por descarte} = \frac{375}{3} = 125 \text{ m}^3/\text{descarte}$$

$$\text{Tempo entre cada descarte} = \frac{24\text{h}}{3 \text{ descartes}} = 8\text{h}$$

$$\text{Regime de operação da ETER} = 22 \frac{\text{h}}{\text{dia}} \text{ (pré - definido)}$$

$$\text{Capacidade máxima de tratamento necessária} = \frac{375 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}}}{22 \frac{\text{h}}{\text{dia}}} = 17 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\text{Volume necessário de amortização} = 17 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times 8\text{h} = 136 \text{ m}^3$$

ARMAZENAMENTO, PREPARO E DOSAGEM DE PRODUTOS QUÍMICOS

O cálculo da vazão da bomba dosadora de cada produto químico utilizado pode ser realizado por meio do equacionamento do balanço de massa no ponto de aplicação, conforme esquema da *Figura 38* e *Equação 8*.

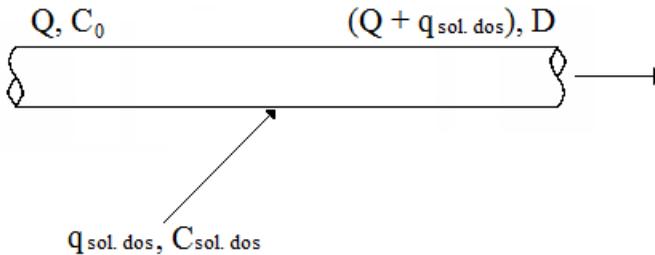


Figura 38. Esquema do balanço de massa na aplicação de produtos químicos.

Onde:

Q (L/h)	Vazão da ETER.
C_0 (mg/L)	Concentração inicial do produto químico na água antes da aplicação (=0).
$q_{sol. dos}$ (L/h)	Vazão da solução de dosagem (bomba dosadora).
D (mg/L)	Dosagem do produto químico em linha.
$C_{sol. dos}$ (mg/h)	Concentração do produto químico na solução de dosagem.

$$Q \cdot C_0 + q_{sol. dos} \cdot C_{sol. dos} = (Q + q_{sol. dos}) \cdot D \quad \text{Equação 7}$$

Rearranjando:

$$q_{sol. dos} = \frac{(Q \cdot D)}{(C_{sol. dos} - D)} \quad \text{Equação 8}$$

SULFATO DE ALUMÍNIO

$$[Al] = \frac{9,0 \text{ g } Al_2O_3}{100 \text{ g solução}} \frac{54 \text{ g } Al}{102 \text{ g } Al_2O_3} \frac{1,35 \text{ g solução}}{cm^3 \text{ solução}} \frac{1000 \text{ cm}^3}{1 \text{ L}}$$

$$[Al_2(SO_4)_3] = \frac{64,3 \text{ g } Al_2(SO_4)_3}{L \text{ solução}}$$

Sendo a vazão de processo = $8,5 \text{ m}^3$ e concentração média de 35 mg/L, então:

$$q_{sol.dos} = \frac{(8500 \times 35)}{(64300 - 35)}$$

$$q_{sol.dos} = 4,63 \frac{L}{h}$$

$$\text{Volume diário gasto} = 4,63 \frac{L}{h} \times 22 \frac{h}{dia} = 102 \frac{L}{dia}$$

SODA CÁUSTICA 50%

[NaOH] = 10,0% em peso (solução preparada a partir de soda 50%)

$$[NaOH] = \frac{10 \text{ g NaOH}}{100 \text{ g solução}} \frac{1,50 \text{ g solução}}{cm^3 \text{ solução}} \frac{1000 \text{ cm}^3}{1 \text{ L}}$$

$$[NaOH] = \frac{150 \text{ g NaOH}}{L \text{ solução}}$$

Sendo a vazão de processo = 8,5 m³ e o consumo médio de soda utilizado nos experimentos de 0,1 mL NaOH_{10%}/L, então:

$$q_{sol.dos} = \frac{\left(8500 \times \frac{150}{1000} \times 0,1\right)}{\left(150 - \frac{150}{1000} \times 0,1\right)}$$

$$q_{sol.dos} = 0,85 \frac{L \text{ NaOH } 10\%}{h}$$

Observação:

Cálculo em termos de soda cáustica 50%:

$$V1 = \frac{0,85 \frac{L \text{ NaOH}_{10\%}}{h} \times 150 \frac{g \text{ NaOH}}{L}}{750 \frac{g \text{ NaOH}}{L}} = 0,17 \frac{L \text{ NaOH}_{50\%}}{h}$$

HIPOCLORITO DE SÓDIO

$$[Cl_2] = 10,0 \% \text{ em peso}$$

$$[Cl_2] = \frac{10,0 \text{ g } Cl_2}{100 \text{ g solução}} \times \frac{1,25 \text{ g solução}}{cm^3 \text{ solução}} \times \frac{1000 \text{ cm}^3}{1 \text{ L}}$$

$$[Cl_2] = \frac{125 \text{ g } Cl_2}{L \text{ solução}}$$

Sendo a vazão de processo = $8,5 \text{ m}^3$ e a concentração definida em $2,0 \text{ mg/L}$, temos:

$$q_{sol.dos} = \frac{(8500 \times 2)}{(125000 - 2)}$$

$$q_{sol.dos} = 0,14 \frac{L}{h}$$

$$\text{Volume diário gasto} = 0,14 \frac{L}{h} \times 22 \frac{h}{dia} = 3,10 \frac{L}{dia}$$

FLOCULADOR EM MEIO GRANULAR

Sendo a vazão de processo = $8,5 \text{ m}^3$ e a taxa de floculação de $48 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$, temos:

$$\text{taxa} = 48 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}} = 2 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$$

$$\text{Área de floculação} = \frac{\text{taxa}}{\text{vazão}}$$

$$\text{Área de floculação} = \frac{8,5 \frac{\text{m}^3}{h}}{2 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}}$$

$$\text{Área de floculação} = 4,25 \text{ m}^2$$

Adotando-se duas unidades de floculação em meio granular, teremos:

$$\text{Área de floculação} = 2,125 \frac{\text{m}^2}{\text{unidade}}$$

$$\text{Diâmetro} = \sqrt{\frac{\text{Área de floculação} \times 4}{\pi}}$$

$$\text{Diâmetro} = 1,65 \text{ m/unidade}$$

Altura útil mínima = $1,5 \text{ m}$ (conforme definido em testes)

$$\text{Altura útil adotada} = 3,0 \text{ m}$$

FILTRO DESCENDENTE

Sendo a vazão de processo = $8,5 \text{ m}^3$ e a taxa de filtração de $226,8 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$, temos:

$$\text{taxa} = 226,8 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}} = 9,45 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$$

$$\text{Área de floculação} = \frac{\text{vazão}}{\text{taxa}}$$

$$\text{Área de floculação} = \frac{8,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{9,45 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}}$$

$$\text{Área de floculação} = 0,90 \text{ m}^2$$

Adotando-se duas unidades de filtração, teremos:

$$\text{Área de floculação} = 0,45 \frac{\text{m}^2}{\text{unidade}}$$

$$\text{Diâmetro} = \sqrt{\frac{4 \cdot \text{Área de floculação}}{\pi}}$$

$$\text{Diâmetro} = 0,76 \text{ m/unidade}$$

$$\text{Altura necessária para leito filtrante} = 1,40 \text{ m}$$

$$\text{Altura necessária para expansão do leito} = 1,40 * 40\% = 0,56 \text{ m}$$

$$\text{Altura mínima do leito} = 1,40 + 0,56 \text{ m} = 1,96 \text{ m}$$

$$\text{Altura adotada para o leito} = 2,20 \text{ m}$$

CÁLCULO DA ENERGIA ELÉTRICA

Tabela 34. Cálculo da estimativa de energia elétrica mensal gasta na ETER.

(continua)

Equipamento	Quant.	Potência unitária (KW)	Tempo uso diário (h)	Consumo diário
Bomba dosadora da soda	1	0,25	22	5,50
Bomba dosadora de sulfato	1	0,25	22	5,50
Bomba dosadora de hipoclorito	1	0,25	22	5,50
Bomba helicoidal elevatória	2	2,24	22	98,56

Tabela 34. Cálculo da estimativa de energia elétrica mensal gasta na ETER.

(conclusão)

Equipamento	Quant.	Potência unitária (KW)	Tempo uso diário (h)	Consumo diário
Bomba centrífuga retrolavagem FMG	1	7,46	0,5	3,73
Bomba retrolavagem FRD	1	2,24	0,5	1,12
Iluminação	5	0,15	22	16,5
Misturador	2	0,75	22	33,0
Total diário (KW)				169,41

Considerando 30 dias de funcionamento mensal teremos 5.082,3 KW.

ANEXO B – Planilhas de resultados auxiliares

Planilhas de testes de coagulação em Jar-test para obtenção do ponto ótimo de coagulação a ser utilizado nos testes T16 a T23.

Tabela 35. TESTE T16.1 – Obtenção do ponto ótimo de coagulação para o teste T16.

pH de coagulação: 6,83

Parâmetros iniciais são iguais ao ponto de concentração “zero” de sulfato de alumínio.

Concentração de $[Al_2(SO_4)_3]$	Remoção				Remoção UV _{254nm} (nm)	Remoção UV _{254nm} (%)	DQO (mgO ₂ /L)	Remoção DQO (%)
	Cor verdadeira. (mg Pt-Co/L)	cor verdadeira (%)	Turbidez (FTU)	Remoção turbidez (%)				
0	515,57	0	82,33	0,0	0,603	0,0	187,76	0,0
20	111,12	78,4	31,21	62,1	0,370	38,6	38,16	20,3
22	96,28	81,3	25,10	69,5	0,343	43,1	10,96	5,8
24	88,86	82,8	23,43	71,5	0,332	44,9	10,96	5,8
26	92,57	82	25,10	69,5	0,338	43,9	10,96	5,8
28	85,15	83,5	22,32	72,9	0,322	46,6	10,96	5,8
30	81,44	84,2	22,32	72,9	0,316	47,6	10,96	5,8
32	85,15	83,5	23,99	70,9	0,33	45,3	10,96	5,8
34	74,02	85,6	20,65	74,9	0,309	48,8	10,96	5,8
36	62,89	87,8	17,32	79,0	0,292	51,6	10,96	5,8
38	59,18	88,5	16,21	80,3	0,287	52,4	14,36	7,6
40	62,89	87,8	20,10	75,6	0,305	49,4	10,96	5,8
42	51,76	90	17,88	78,3	0,291	51,6	24,56	13,1

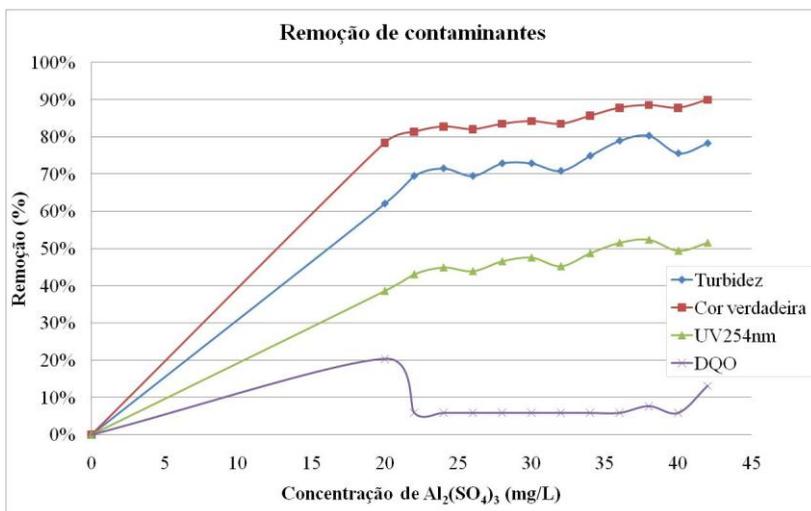


Figura 39. Teste 16.1 – Remoção de contaminantes para comparar com o teste T16.

Definição do ponto ótimo de coagulação: 38 mg $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3/\text{L}$

Tabela 36. Teste T17.1 – Obtenção do ponto ótimo de coagulação para o teste T17.

pH de coagulação: 7,01

Parâmetros iniciais são iguais ao ponto de concentração “zero” de Sulfato de alumínio.

Concentração de $[Al_2(SO_4)_3]$	Remoção			Remoção turbidez (%)	UV _{254nm} (nm)	Remoção UV _{254nm} (%)	DQO (mgO ₂ /L)	Remoção DQO (%)
	Cor verdadeira (mg Pt-Co/L)	cor (%)	Turbidez (FTU)					
0	547,12	0,0	76,12	0,0	0,637	0,0	112,96	0,0
20	168,85	69,1	33,99	55,3	0,393	38,3	75,56	33,1
22	166,54	69,6	32,32	57,5	0,38	40,3	58,56	48,2
24	170,16	68,9	27,32	64,1	0,353	44,6	58,56	48,2
26	155,47	71,6	26,77	64,8	0,346	45,7	82,36	27,1
28	142,13	74,0	25,10	67,0	0,337	47,1	65,36	42,1
30	121,97	77,7	24,54	67,8	0,334	47,6	55,16	51,2
32	117,8	78,5	25,10	67,0	0,341	46,5	55,16	51,2
34	100,16	81,7	21,21	72,1	0,324	49,1	55,16	51,2
36	102,80	81,2	20,65	72,9	0,316	50,4	61,96	45,2
38	99,62	81,8	20,65	72,9	0,314	50,7	55,16	51,2
40	89,17	83,7	18,99	75,1	0,306	52	65,36	42,1
42	86,15	84,3	18,43	75,8	0,298	53,2	72,16	36,1

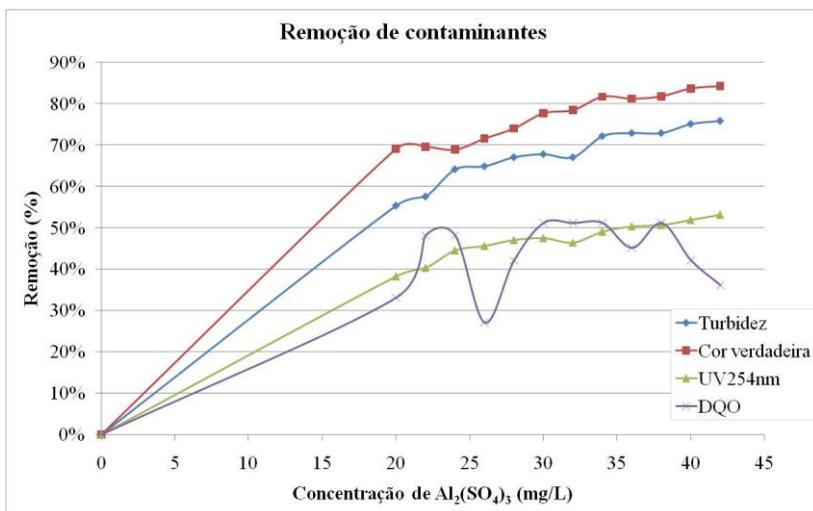


Figura 40. Teste 17.1 – Remoção de contaminantes para comparar com o teste T17.

Definição do ponto ótimo de coagulação: 42 mg $Al_2(SO_4)_3/L$

Tabela 37. Teste T18.1 – Obtenção do ponto ótimo de coagulação para o teste T18.

pH de coagulação: 6,71

Parâmetros iniciais são iguais ao ponto de concentração “zero” de Sulfato de alumínio..

Concentração de $[Al_2(SO_4)_3]$	Remoção				Remoção DQO (mgO ₂ /L)	Remoção DQO (%)		
	Cor verdadeira (mg Pt-Co/L)	Turbidez (FTU)	Remoção turbidez (%)	UV _{254nm} (nm)			Remoção UV _{254nm} (%)	
0	475,99	0,0	71,78	0,0	0,540	0,0	102,76	0,0
20	96,28	79,8	28,43	60,4	0,362	33,0	75,56	26,5
22	92,57	80,6	26,77	62,7	0,347	35,7	95,96	6,6
24	107,41	77,4	25,10	65,0	0,344	36,3	68,76	33,1
26	114,83	75,9	23,99	66,6	0,325	39,8	75,56	26,5
28	114,83	75,9	21,77	69,7	0,319	40,9	82,36	19,9
30	103,70	78,2	19,54	72,8	0,303	43,9	78,96	23,2
32	88,86	81,3	20,65	71,2	0,309	42,8	75,56	26,5
34	81,44	82,9	18,43	74,3	0,297	45,0	82,36	19,9
36	74,02	84,4	16,21	77,4	0,291	46,1	72,16	29,8
38	70,31	85,2	15,65	78,2	0,282	47,8	65,36	36,4
40	59,18	87,6	17,32	75,9	0,283	47,6	75,56	26,5
42	58,36	87,7	16,90	76,5	0,277	48,7	65,36	36,4

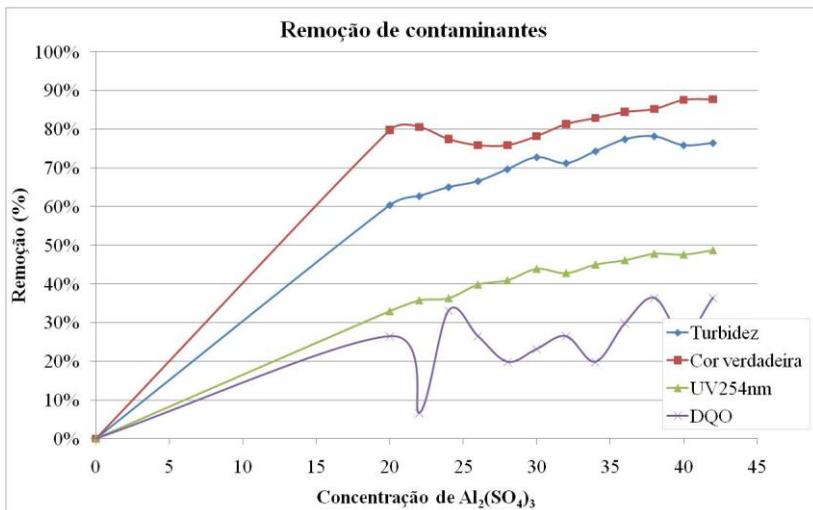


Figura 41. Teste 18.1 – Remoção de contaminantes para comparar com o teste T18.

Definição do ponto ótimo de coagulação: 40 mg $Al_2(SO_4)_3/L$

Tabela 38. Teste T19.1 – Obtenção do ponto ótimo de coagulação para o teste T19. pH de coagulação: 6,90
Parâmetros iniciais são iguais ao ponto de concentração “zero” de Sulfato de alumínio.

Concentração de $[Al_2(SO_4)_3]$	Remoção					Remoção DQO (%)	
	Cor verdadeira (mg Pt-Co/L)	Turbidez (FTU)	Remoção turbidez (%)	UV _{254nm} (nm)	Remoção UV _{254nm} (%)		DQO (mgO ₂ /L)
0	497,02	80,11	0,0	0,683	0,0	242,16	0,0
20	170,49	33,44	58,3	0,435	36,3	102,76	57,6
22	159,36	27,32	65,9	0,395	42,2	89,16	63,2
24	151,94	27,88	65,2	0,383	43,9	95,96	60,4
26	137,10	25,66	68,0	0,367	46,3	78,96	67,4
28	122,26	25,66	68,0	0,368	46,1	82,36	66,0
30	129,68	22,88	71,4	0,348	49,0	89,16	63,2
32	114,83	21,21	73,5	0,352	48,5	82,36	66,0
34	103,70	18,43	77,0	0,325	52,4	72,16	70,2
36	99,99	20,10	74,9	0,329	51,8	75,56	68,8
38	111,12	18,99	76,3	0,320	53,1	75,56	68,8
40	92,57	19,54	75,6	0,318	53,4	75,56	68,8
42	177,91	17,88	77,7	0,313	54,2	72,16	70,2

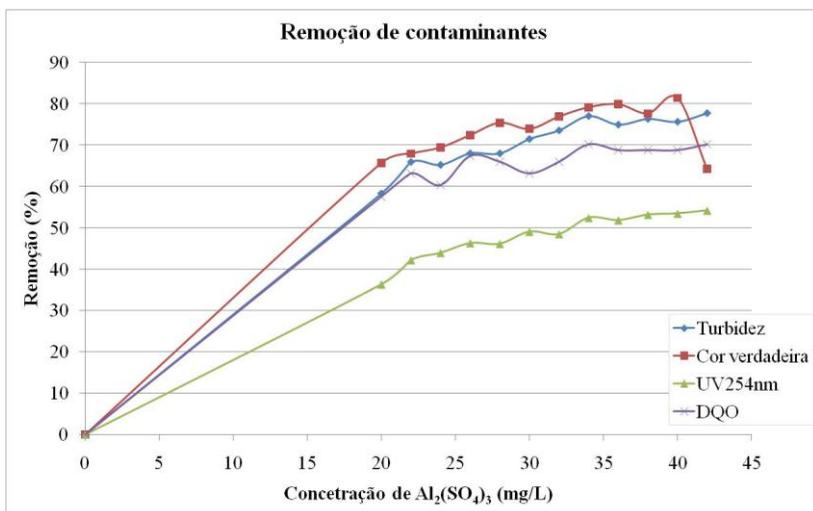


Figura 42. Teste 19.1 – Remoção de contaminantes para comparar com o teste T19.

Ponto ótimo de coagulação: 36 mg $Al_2(SO_4)_3/L$.

Tabela 39. Teste T20.1 – Obtenção do ponto ótimo de coagulação para o teste T20. pH de coagulação: 6,85
Parâmetros iniciais são iguais ao ponto de concentração “zero” de Sulfato de alumínio.

	Concentração de $[Al_2(SO_4)_3]$	Cor verdadeira. (mg Pt-Co/L)	Remoção cor verdadeira (%)	Turbidez (FTU)	Remoção turbidez (%)	UV _{254nm} (nm)	Remoção UV _{254nm} (%)	DQO (mgO ₂ /L)	Remoção DQO (%)
0	467,33	0,0	141,24	0,0	0,0	0,742	0,0	86,25	0,0
8	144,52	69,1	56,22	60,2	60,2	0,364	50,9	66,36	23,1
10	103,70	77,8	39,55	72,0	72,0	0,289	61,1	79,62	7,7
12	77,73	83,4	36,21	74,4	74,4	0,263	64,6	69,67	19,2
14	66,60	85,7	27,32	80,7	80,7	0,230	69,0	82,94	3,8
16	59,18	87,3	26,21	81,4	81,4	0,227	69,4	82,94	3,8
18	55,47	88,1	22,32	84,2	84,2	0,221	70,2	96,20	0,0
20	55,47	88,1	16,76	88,1	88,1	0,200	73,0	36,51	57,7
22	51,76	88,9	15,65	88,9	88,9	0,194	73,9	46,46	46,1
24	48,05	89,7	15,10	89,3	89,3	0,190	74,4	46,46	46,1
26	44,33	90,5	17,32	87,7	87,7	0,197	73,5	36,51	57,7
28	44,33	90,5	16,21	88,5	88,5	0,193	74,0	49,77	42,3
30	36,91	92,1	15,10	89,3	89,3	0,189	74,5	36,51	57,7
32	40,62	91,3	17,88	87,3	87,3	0,195	73,7	46,46	46,1
34	40,62	91,3	16,21	88,5	88,5	0,195	73,7	46,46	46,1
36	40,62	91,3	15,65	88,9	88,9	0,192	74,1	46,46	46,1
38	29,49	93,7	16,76	88,1	88,1	0,186	74,9	49,77	42,3
40	36,91	92,1	16,76	88,1	88,1	0,184	75,2	46,46	46,1
42	33,20	92,9	16,76	88,1	88,1	0,179	75,9	46,46	46,1

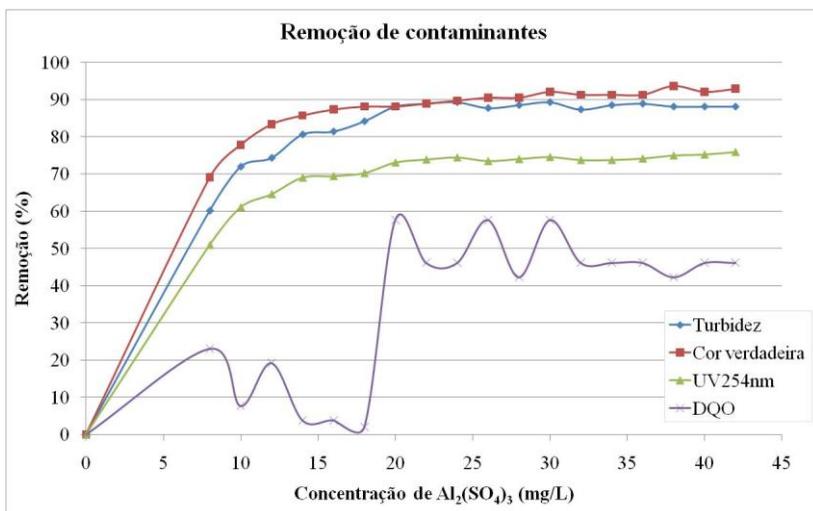


Figura 43. Teste 20.1 – Remoção de contaminantes para comparar com o teste T20.

Ponto ótimo de coagulação: 24 mg $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3/\text{L}$.

Tabela 40. Teste T21.1 – Obtenção do ponto ótimo de coagulação para o teste T21.

pH de coagulação: 6,88

Parâmetros iniciais são iguais ao ponto de concentração “zero” de Sulfato de alumínio.

Concentração de $[Al_2(SO_4)_3]$	Remoção				Remoção UV _{254nm} (nm)	Remoção UV _{254nm} (%)	Remoção DQO (mgO ₂ /L)	Remoção DQO (%)
	Cor verdadeira. (mg Pt-Co/L)	Remoção cor (%)	Turbidez (FTU)	Remoção turbidez (%)				
0	421,28	0,0	115,39	0,0	0,706	0,0	96,20	0,0
20	75,14	82,2	24,06	79,1	0,260	63,2	63,04	34,5
22	78,90	81,3	20,80	82,0	0,251	64,4	46,46	51,7
24	60,09	85,7	19,71	82,9	0,237	66,4	76,30	20,7
26	45,04	89,3	19,71	82,9	0,235	66,7	79,62	17,2
28	52,56	87,5	18,63	83,9	0,232	67,1	69,67	27,6
30	52,56	87,5	19,17	83,4	0,235	66,7	69,67	27,6
32	48,80	88,4	20,80	82,0	0,227	67,8	79,62	17,2
34	48,80	88,4	19,17	83,4	0,213	69,8	89,57	6,9
36	48,80	88,4	17,54	84,8	0,207	70,7	82,94	13,8
38	37,51	91,1	16,45	85,7	0,201	71,5	82,94	13,8
40	45,04	89,3	18,08	84,3	0,210	70,3	82,94	13,8
42	41,27	90,2	18,08	84,3	0,211	70,1	76,30	20,7

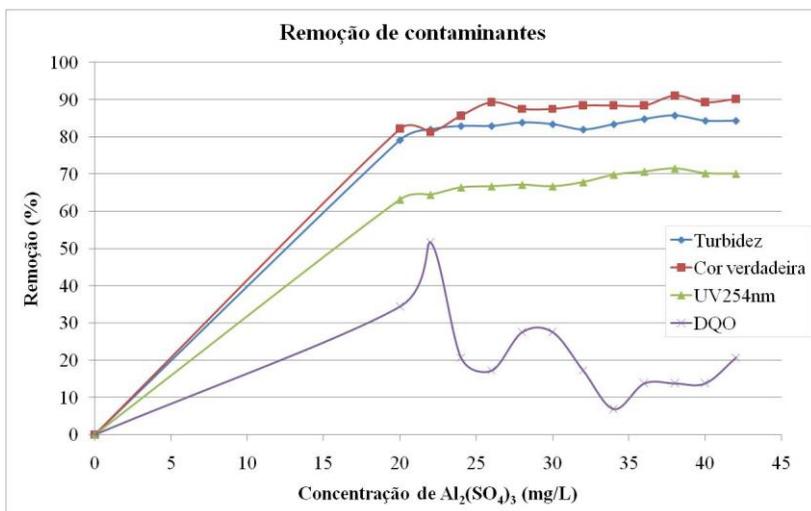


Figura 44. Teste 21.1 – Remoção de contaminantes para comparar com o teste T21.

Ponto ótimo de coagulação: 38 mg $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3/\text{L}$.

Tabela 41. Teste T22.1 – Obtenção do ponto ótimo de coagulação para o teste T22.

pH de coagulação: 6,78

Parâmetros iniciais são iguais ao ponto de concentração “zero” de Sulfato de alumínio..

Concentração de $[Al_2(SO_4)_3]$	Remoção					Remoção DQO (%)		
	Cor verdadeira. (mg Pt-Co/L)	Turbidez (FTU)	Remoção turbidez (%)	UV _{254nm} (nm)	Remoção UV _{254nm} (%)		DQO (mgO ₂ /L)	
0	124,05	0,0	64,29	0,0	0,542	0,0	89,57	0,0
20	48,80	60,7	12,65	80,3	0,231	57,4	53,09	40,7
22	33,75	72,8	10,47	83,7	0,209	61,4	46,46	48,1
24	41,27	66,7	8,84	86,2	0,201	62,9	49,77	44,4
26	33,75	72,8	8,84	86,2	0,199	63,3	46,46	48,1
28	37,51	69,8	8,84	86,2	0,194	64,2	56,41	37,0
30	26,22	78,9	9,38	85,4	0,198	63,5	46,46	48,1
32	33,75	72,8	8,84	86,2	0,196	63,8	49,77	44,4
34	26,22	78,9	9,38	85,4	0,201	62,9	49,77	44,4
36	26,22	78,9	9,93	84,6	0,204	62,4	49,77	44,4
38	29,99	75,8	9,93	84,6	0,202	62,7	46,46	48,1
40	26,22	78,9	8,30	87,1	0,192	64,6	46,46	48,1
42	22,46	81,9	7,21	88,8	0,188	65,3	53,09	40,7

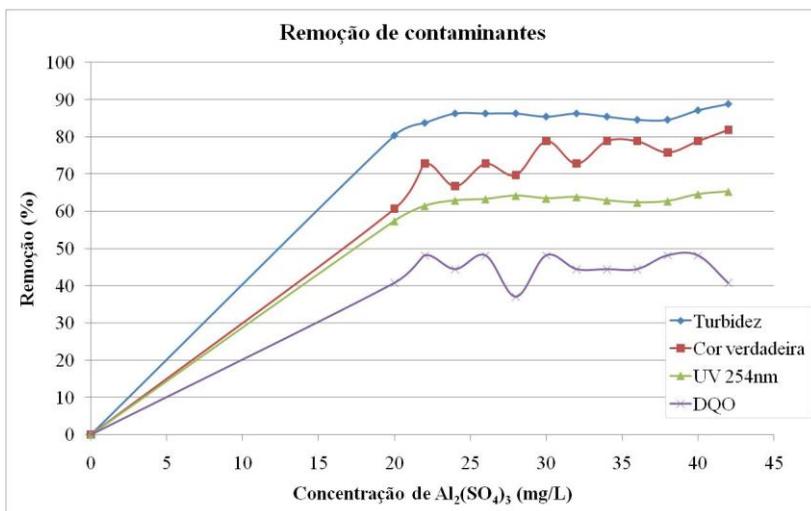


Figura 45. Teste 22.1 – Remoção de contaminantes para comparar com o teste T22.

Ponto ótimo de coagulação: 30 mg $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3/\text{L}$.

Planilhas de desempenho do floculador em meio granular durante os ensaios de filtração.

TESTE T20.2 – Desempenho da Floculação em Meio Granular (FMG)

pH da solução: 6,85

Concentração de $[Al_2(SO_4)_3]$: 24,0

Tabela 42. Teste T20.2 – Floculação em meio granular realizada para desenvolvimento do teste de filtração (T20)

Tempo (h)	Cor verdadeira. (mg Pt-Co/L)	Turbidez (FTU)	UV_{254 nm} (nm)
0,08	33,76	16,76	0,196
0,42	33,76	16,76	0,200
0,75	35,00	13,35	0,262
1,00	35,00	13,35	0,545
1,50	48,37	15,10	0,191
2,00	37,41	13,43	0,182
3,00	41,07	11,76	0,175
4,00	37,41	11,21	0,173
5,00	41,07	10,10	0,169
6,33	37,00	10,10	0,396
7,00	37,41	7,87	0,156
8,00	33,76	6,76	0,147
9,00	33,76	6,76	0,145
10,50	33,76	2,87	0,138
Média	37,55	11,23	0,217

TESTE T21.2 – Desempenho da Floculação em Meio Granular (FMG)

pH da solução: 6,88

Concentração de $[Al_2(SO_4)_3]$: 38,0

Tabela 43. Teste T21.2 – Floculação em meio granular realizada para desenvolvimento do teste de filtração (T21).

Tempo (h)	Cor verdadeira. (mg Pt-Co/L)	Turbidez (FTU)	UV_{254 nm} (nm)
0,17	24,73	10,3	0,160
0,50	31,90	9,2	0,160
1,00	24,73	7,6	0,150
2,00	28,31	7,6	0,151
3,00	24,73	6,6	0,145
4,00	28,31	6,6	0,144
5,00	24,73	6,0	0,140
6,00	24,73	5,5	0,136
7,00	25,93	6,9	0,105
8,00	24,73	4,9	0,134
9,00	24,73	5,5	0,133
11,00	24,73	4,9	0,139
13,00	24,73	20,5	0,169
Média	25,93	7,87	0,144

TESTE T22.2 – Desempenho da Floculação em Meio Granular (FMG)

pH da solução: 6,78

Concentração de $[Al_2(SO_4)_3]$: 30,0

Tabela 44. Teste T22.2 – Floculação em meio granular realizada para desenvolvimento do teste de filtração (T22).

Tempo (h)	Cor verdadeira. (mg Pt-Co/L)	Turbidez (FTU)	UV_{254 nm} (nm)
0,50	31,90	8,2	0,185
2,00	28,31	6,0	0,163
4,00	28,31	6,0	0,163
6,00	24,73	4,9	0,150
7,33	28,31	4,9	0,154
8,82	28,31	5,5	0,155
10,80	28,31	4,4	0,145
Média	28,31	5,72	0,159

ANEXO C – Especificação de Equipamentos.

TANQUE DE AMORTECIMENTO

A *Figura 46* apresenta detalhes do tanque de amortecimento bem como a instalação da casa de bombas.

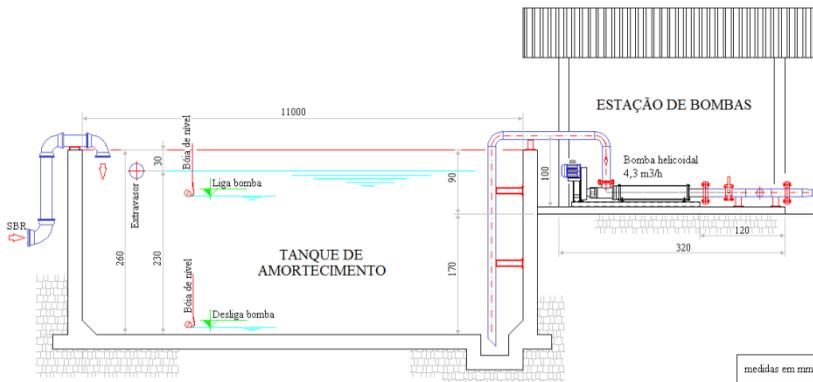


Figura 46. Detalhes do tanque de amortecimento e bombeamento.

BOMBA HELICOIDAL – ESTAÇÃO ELEVATÓRIA

Especificação por Weatherford Industria e Comercio Ltda.

Bomba helicoidal estacionária com cavidades progressivas de 2 estágios; para esgoto biológico após tratamento biológico com até 1,0% de sólidos; sucção máxima de 6,0 mca, vazão de operação 4,30 m³/h, pressão de operação 5,50 bar e capacidade de pressão de 12,0 bar.

A carcaça executada em ferro fundido GG20; rotor em aço inox AISI 420 com acabamento superficial polido e com cromo duro para maior resistência ao desgaste. Eixos em aço inox AISI 420, estator em elastômero vulcanizado; mancais de rolamentos e vedação por selo mecânico. Montagem do rotor por tirantes laterais. A rotação da bomba deverá ter no máximo 250 rpm. Acionamento por motor elétrico trifásico TFVE, IP 55, 60 Hz, classe B.

Redução por polias e correias ou motoredutor de engrenagens helicoidais lubrificado com banho de óleo. Flange sucção e recalque 150 # ANSI B16.5 fundido em conjunto com o corpo da bomba. Base de instalação horizontal executada em perfis laminados de aço carbono A36. Pintura epóxi para componentes em aço carbono com 200 micras.

FLOCULADOR EM MEIO GRANULAR

A *Figura 47* apresenta o esquema de uma unidade de floculação em meio granular.

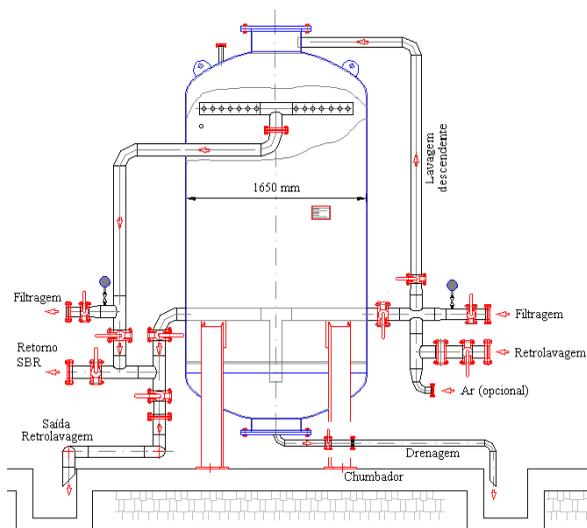


Figura 47. Esquema de uma unidade de floculação em meio granular.
(Fonte: Conserve Engenharia Ltda)

BOMBA CENTRÍGUA PARA RETROLAVAGEM DO FLOCULADOR GRANULAR

Especificado por Maquimotor S.A

Bomba centrífuga horizontal, simples estágio, sucção simples e descarga vertical para cima; para esgoto biológico após tratamento terciário. Com rotor aberto, vazão 60,0 m³/h x 20 mca. Montagem tipo acoplamento direto. Corpo e rotor em ferro fundido A48CL30. Eixos em aço inox AISI 420. Rotor com passagem livre de sólidos até 50 mm. Rendimento mínimo 60%.

Acionamento por motor elétrico trifásico TFVE, IP 55, 60 Hz, classe B, rotação máxima de 3.500 rpm. Vedação por selo mecânico. Lubrificação a óleo. Base de instalação horizontal em perfis de aço carbono tipo U em A-36. Conexões flangeadas com furação ANSI B16.5. Pintura epóxi para componentes em aço carbono com 200 micra.

FILTRO RÁPIDO DESCENDENTE

A *Figura 48* apresenta o esquema de uma unidade de filtração descendente.

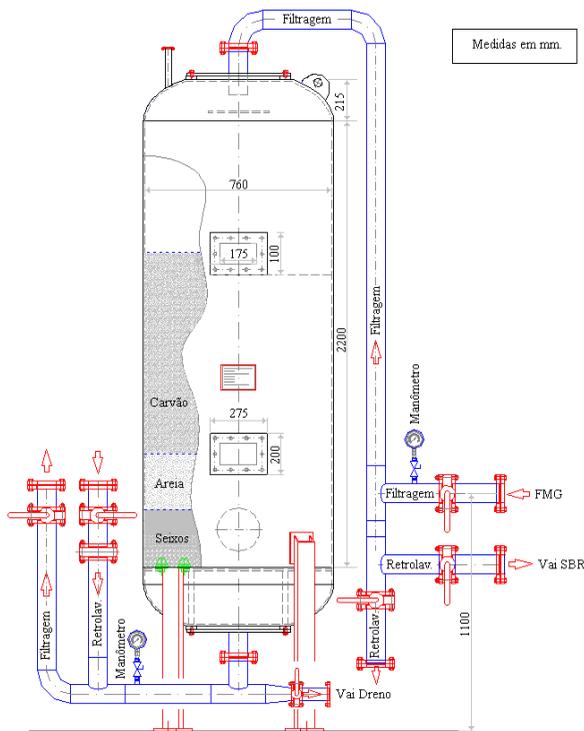


Figura 48. Detalhes construtivos de uma unidade filtrante.

(Fonte: Conserve Engenharia Ltda)

BOMBA CENTRÍFUGA PARA RETROLAVAGEM DOS FILTROS

Especificado por Maquimotor S.A

Bomba centrífuga horizontal, simples estágio, sucção simples e descarga vertical para cima; para esgoto biológico após tratamento terciário. Com rotor aberto, vazão 20,0 m³/h x 20 mca. Montagem tipo acoplamento direto. Corpo e rotor em ferro fundido A48CL30. Eixos em

aço inox AISI 420. Rotor com passagem livre de sólidos ate 50 mm. Rendimento mínimo 60%.

Acionamento por motor elétrico trifásico TFVE, IP 55, 60 Hz, classe B, rotação máxima de 3.500 rpm. Vedação por selo mecânico. Lubrificação a óleo. Base de instalação horizontal em perfis de aço carbono tipo U em A-36. Conexões flangeadas com furação ANSI B16.5. Pintura epóxi para componentes em aço carbono com 200 micra.

BOMBA DOSADORA DE SODA

Especificação por Bomax do Brasil Bombas Químicas Ltda.

Bomba dosadora de diafragma, microprocessada, vazão 3,40 L/h x pressão de operação 4 bar , capacidade máxima 8 bar , para dosagem de soda 10% com saída digital. Corpo da bomba em Polipropileno, cabeçote de dosagem em Polipropileno; vedação em EPDM; com acessórios de sucção e descarga e display digital em cristal líquido para visualizar vazão instantânea, totalizada, % deslocamento, frequência de pulsos e sinal de corrente. Com ajuste de vazão de 30% a 100%.

Flanges de entrada e saída ANSIB16.5. Controle eletrônico através de microprocessador que regula a dosagem com entrada e saída de sinal 4-20 ma. Acionamento motor elétrico trifásico TFVE, IP 55, 60 Hz, classe B, 2/4 pólos, com 10 m cabos de controle.

BOMBA DOSADORA DE SULFATO DE ALUMÍNIO

Especificação por Bomax do Brasil Bombas Químicas Ltda.

Bomba dosadora de diafragma, microprocessada, vazão 4,40 L/h x pressão de operação 4 bar , capacidade máxima 10 bar , para dosagem de sulfato de alumínio 10% com saída digital. Corpo da bomba em Polipropileno, cabeçote de dosagem em Polipropileno; vedação em viton; com acessórios de sucção e descarga e display digital em cristal líquido para visualizar vazão instantânea, totalizada, % deslocamento, frequência de pulsos e sinal de corrente. Com ajuste de vazão de 30% a 100% .

Flanges de entrada e saída ANSIB16.5. Controle eletrônico através de microprocessador que regula a dosagem com entrada e saída de sinal 4-20 ma. Acionamento motor elétrico trifásico TFVE, IP 55, 60 Hz, classe B, 2/4 pólos, com 10 m cabos de controle.

BOMBA DOSADORAS DE HIPOCLORITO DE SÓDIO

Especificação por Bomax do Brasil Bombas Químicas Ltda.

Bomba dosadora de diafragma, microprocessada, vazão de operação de 0,70 L/h e pressão de operação de 4,0 bar, capacidade máxima 16 bar, para dosagem de hipoclorito 10% com saída digital. Corpo da bomba em Polipropileno, cabeçote de dosagem em acrílico; vedação em viton; com acessórios de sucção e descarga e display digital em cristal líquido para visualizar vazão instantânea, % deslocamento, frequência de pulsos e sinal de corrente. Com ajuste de vazão de 30% a 100%.

Flanges de entrada e saída ANSIB16.5. Controle eletrônico através de microprocessador que regula a dosagem com entrada e saída de sinal 4-20 ma. Acionamento motor elétrico trifásico TFVE, IP 55, 60 Hz, classe B, 2/4 pólos, com 10 m cabos de controle.

TANQUE DE PREPARO DE SODA E SULFATO DE ALUMÍNIO

Especificação por Conserve Engenharia.

Tanque estacionário vertical em PRFV ou Polipropelino, capacidade total de 0,70 m³, para preparo de soda a 10% ou Sulfato de Alumínio 10%. Forma cilíndrica vertical, diâmetro 1,0 m, fundo elíptico, sem tampa. Fabricação em roving fibra de vidro/manta 450 g/m², liner em resina isoftálica, barreira química em resina isoftálica, estrutura em resina isoftálica. Acabamento resina parafinada com inibidor anti UV.

Acessórios: quatro pés de apoio, quatro quebra-vortex, bocal de saída 11/2 com flange ANSI B16.5. Operação em temperatura ambiente e pressão atmosférica. Apoiado em base de concreto.

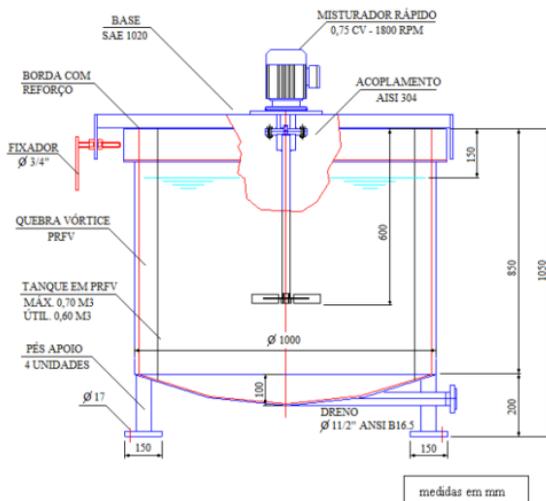


Figura 49. Tanque de preparo de soda cáustica e sulfato de alumínio.
(Fonte: Conserve Engenharia Ltda)

MISTURADOR DE PREPARO DE SODA E SULFATO DE ALUMÍNIO

Especificação por Conserve Engenharia.

Misturador Vertical tipo Rápido para preparação de soda a 10 % com 1750 rpm, e rotor de quatro pás. Eixo com diâmetro 1", comprimento 0,60 m em aço inox AISI 304. Rotor em aço inox AISI 304, espessura das pás 1/4", acoplado ao eixo com chaveta e contra porca de sentido contrário a rotação. Acoplamento superior flangeado no motor em aço inox AISI 304.

Estrutura da base em perfis de chapa dobrada tipo L em aço inox AISI 304", com sistema de apoio e fixação sobre tanque de preparo. Acionamento por motor elétrico trifásico TFVE, IP 55, 60 Hz, classe B com 0,75 cv. Pintura epóxi 200 micras para os componentes em aço.

Todas as porcas, parafusos e arruelas em aço inox AISI 304.

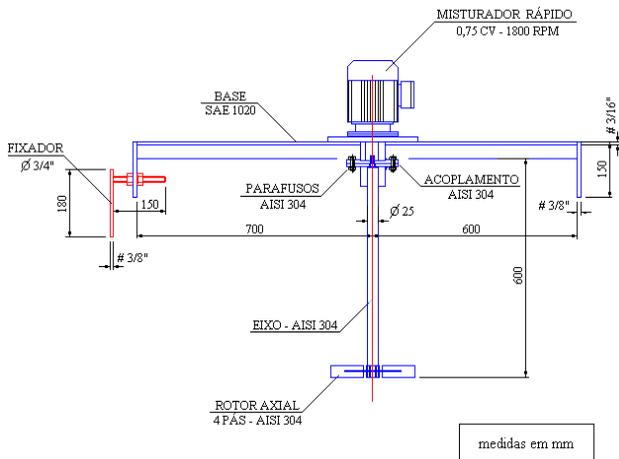


Figura 50. Misturador para tanque de preparo de soda cáustica e sulfato de alumínio.
(Fonte: Conserve Engenharia Ltda)

TANCAGEM DE ÁGUA DE REUSO

Especificação por Conserve Engenharia.

Reservatório estacionário vertical em PRFV, capacidade total de 15 m³, para armazenagem de esgoto sanitário após tratamento terciário para reúso. Forma cilíndrica vertical, diâmetro 2,30 m na base de 2,50 no topo, fundo plano, tampa removível. Fabricação em roving fibra de vidro/manta 450 g/m², liner em resina isoftálica, barreira química em resina isoftálica, estrutura em resina isoftálica. Acabamento resina parafinada com inibidor anti UV.

Acessórios: bocal de entrada 3", bocal de saída 3", visor de nível com escala graduada 0-15 m³, alças de içamento. Flanges ANSI B16.5. Operação em temperatura ambiente e pressão atmosférica. Assentado em base de concreto.