



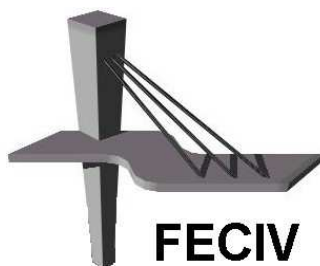
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DE
LAVAGEM DE FILTROS E DE LODO DE
DECANTADOR APÓS TRATAMENTO
SEQUENCIAL POR LEITO DE DRENAGEM,
FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO E
FILTRAÇÃO**

NILTON FERNANDES DE OLIVEIRA

UBERLÂNDIA, 12 DE FEVEREIRO DE 2015



FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



NILTON FERNANDES DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DE LAVAGEM
DE FILTROS E DE LODO DE DECANTADOR APÓS
TRATAMENTO SEQUENCIAL POR LEITO DE
DRENAGEM, FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO E
FILTRAÇÃO**

Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. André Luiz de Oliveira

Uberlândia, 12 de Fevereiro de 2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

O48a
2015

Oliveira, Nilton Fernandes de, 1979-

Avaliação da qualidade da água de lavagem de filtros e de lodo de decantador após tratamento sequencial por leito de drenagem, flotação por ar dissolvido e filtração / Nilton Fernandes de Oliveira. - 2015.

112 f. : il.

Orientador: André Luiz de Oliveira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia Civil - Teses. 2. Água - Estações de tratamento - Teses. 3. Flotação - Teses. 4. Drenagem - Teses. I. Oliveira, André Luiz de. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU: 624



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA Nº: 133/2015

CANDIDATO: Nilton Fernandes de Oliveira

ORIENTADOR: Prof. Dr. André Luiz de Oliveira

TÍTULO: "Avaliação da qualidade da água de lavagem de filtros e de lodo de decantador após tratamento seqüencial por leio de drenagem, flotação por ar dissolvido e filtração"

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Engenharia Urbana, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

LINHA DE PESQUISA: Recursos Hídricos e Saneamento

DATA DA DEFESA: 12 de fevereiro de 2015

LOCAL: Sala de Reuniões da FECIV

HORÁRIO DE INÍCIO E TÉRMINO DA DEFESA: 14:15 – 14:55

Após avaliação do documento escrito, da exposição oral e das respostas às arguições, os membros da Banca Examinadora decidem que o candidato foi:

☒ APROVADO

☐ REPROVADO

OBS:

Adotar a toda a recomendação da Banca.

Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata que está assinada pelos membros da Banca:

Prof. Dr. André Luiz de Oliveira
Professor Orientador: **Prof. Dr. André Luiz de Oliveira – FECIV/UFU**

Prof.ª Dr.ª Cristiane Tumang Frare
Membro externo: **Prof.ª Dr.ª Cristiane Tumang Frare – Engenharias/FPU**

Prof.ª Dr.ª Maria Lyda Bolaños Rojas
Membro: **Prof.ª Dr.ª Maria Lyda Bolaños Rojas – FECIV/UFU**

Uberlândia, 12 de Fevereiro de 2015.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por sempre fazer presente em minha vida, me iluminando e me dando força para caminhar com humildade e esperança.

Aos meus familiares, em especial minha mãe Vilma Raimunda de Oliveira e meu pai Vicente Ferreira de Oliveira, que sempre acreditaram em mim me dando forças e me apoiando quando eu me sentia desanimado.

Ao meu orientador André Luiz Oliveira que acreditou em mim e me prestou todos os esclarecimentos para que este trabalho pudesse ser realizado.

A técnica do laboratório de saneamento da FECIV Aline, a qual foi essencial para o desenvolvimento da parte experimental deste trabalho.

Aos alunos da Iniciação Científica Jéssica e Hugo os quais sempre se propuseram a colaborar e a aprender todas as atividades que a eles eram impostas.

A todos os meus amigos do mestrado.

Ao Carlos Eugênio, coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, ao qual admiro pela sua humildade e dedicação que demonstrou todas as vezes que precisei.

A CAPES pelo apoio financeiro.

E a todos aqueles que de uma forma ou de outra acreditaram em mim, me apoiando e incentivando diante das minhas indecisões e dificuldades.

Sumário

RESUMO.....	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	ix
LISTA DE GRÁFICOS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xvi
LISTA DE SÍMBOLOS	xvii
CAPÍTULO 1.....	18
INTRODUÇÃO	18
CAPÍTULO 2.....	21
OBJETIVOS	21
2.1 Objetivo geral	21
2.2 Objetivos específicos	21
CAPÍTULO 3.....	22
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1 Aspectos legais	22
3.2 Parâmetros indicadores de qualidade da água	25
3.3 Estação de tratamento de água.....	28
3.4 Leitos de Drenagem	33
3.5 Flotação por Ar Dissolvido.....	35
3.6 Filtração	39
CAPÍTULO 4.....	41
MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
4.1 Generalidades.....	41
4.2 Estação de Tratamento de Água Bom Jardim em Uberlândia – MG.....	42
4.3 Equipamentos e produtos químicos	43
4.4 Instalação do sistema composto por LD, FAD e Filtração	44
4.4.1 Seleção das mantas e instalação dos Leitos de Drenagem	44
4.4.2 Equipamento de <i>floteste</i> (<i>jartest</i> modificado)	46
4.4.3 Unidades de filtração e seleção dos meios filtrantes	48
4.5 Ensaio preliminares	50

4.5.1 Caracterização do lodo	50
4.5.2 Caracterização do drenado	50
4.6 ETAPAI – Ensaio sem adição de agente coagulante	50
4.6.1 Manta RT-21	51
4.6.2 Manta RT-26	54
4.6.3 Manta RT-31	54
4.7 ETAPAI – Ensaio com adição de agente coagulante.....	54
CAPÍTULO 5.....	55
RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
5.1 Ensaio preliminares	55
5.1.1 Caracterização do lodo	55
5.1.2 Caracterização do drenado	57
5.2 ETAPA I – Ensaio sem adição de agente coagulante	58
5.2.1 Manta RT-21	58
5.2.2 Manta RT-26	61
5.2.3 Manta RT-31	65
5.3 ETAPA II – Ensaio com adição de agente coagulante.....	71
5.3.1 Manta RT-21 – DSA 5,0 mg/L.....	71
5.3.2 Manta RT-21 – DSA 10,0 mg/L.....	75
5.3.3 Manta RT-21 – DSA 15,0 mg/L.....	78
5.3.4 Manta RT-26 – DSA 5,0 mg/L.....	81
5.3.5 Manta RT-26 – DSA 10,0 mg/L.....	84
5.3.6 Manta RT-26 – DSA 15,0 mg/L.....	87
5.3.7 Manta RT-31 – DSA 5,0 mg/L.....	90
5.3.8 Manta RT-31 – DSA 10,0 mg/L.....	93
5.3.9 Manta RT-31 – DSA 15,0 mg/L.....	96
CAPÍTULO 6.....	99
CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	99
REFERÊNCIAS	102
Apêndices.....	106
Apêndice 1 – Resumo de todas as atividades realizadas com a unidade de Leito de Drenagem, Flotação por Ar Dissolvido e Filtração – Ensaio – Etapa I	106
Apêndice 2 – Resumo de todas as atividades realizadas com a unidade de Leito de Drenagem, Flotação por Ar Dissolvido e Filtração – Ensaio – Etapa II.....	107

Apêndice 3 – Resumo de todos os resultados encontrados nas duas etapas desenvolvidas neste trabalho.....	108
---	------------

RESUMO

Neste trabalho foi avaliada a qualidade da água de lavagem de filtros e de lodo de decantador da Estação de Tratamento de Água Bom Jardim, localizada na cidade de Uberlândia-MG, após tratamento sequencial por leito de drenagem, flotação por ar dissolvido e filtração, todos em escala de bancada. Foram avaliados efluentes de leitos de drenagem compostos de três tipos de mantas geotêxteis distintas: RT-21, RT-26 e RT-31, e testados três tipos de granulometria de areia constituintes dos filtros. O efluente drenado, após passagem pelo leito de drenagem, passava pela unidade de flotação por ar dissolvido e em seguida pelas unidades de filtração. Foram realizados testes preliminares com amostra bruta da água de lavagem de filtros e de lodo de decantador, com o objetivo de caracterizá-la e avaliá-la quanto às suas características físicas, químicas e biológicas. As mantas geotêxteis utilizadas foram escolhidas a partir de resultados de trabalhos anteriores, realizados com o mesmo tipo de sistema. Os experimentos foram divididos nas etapas, I e II. Na etapa I foram conduzidos experimentos sem adição de agente coagulante ou auxiliares na coagulação/floculação da flotação. As amostras, após passagem pelo sistema, foram avaliadas quanto aos parâmetros físicos pH, turbidez, cor verdadeira e cor aparente e quanto aos parâmetros químicos, concentrações remanescentes de Alumínio e Ferro. Na etapa II foram realizados os mesmos ensaios da etapa I e mesmas determinações dos parâmetros de qualidade, entretanto, com dosagem de sulfato de alumínio de 5, 10 e 15 mg/L na coagulação/floculação da flotação. Os ensaios conduzidos na etapa I que mostraram melhor desempenho foram os realizados com a manta RT-26 na saída do Filtro 01 com redução de 91,8% da cor aparente, 41,4% da cor verdadeira e 97,6% da turbidez. Nos ensaios conduzidos na etapa II o melhor desempenho foi com o drenado da manta RT-26 na saída do Filtro 02 quando submetido a uma dosagem de 15 mg/L de sulfato de alumínio, como agente coagulante. Houve redução de 96,4% da cor aparente, 86,2% da cor verdadeira e 99,6% da turbidez. Os resultados apresentados confirmam a eficiência do sistema na remoção de sólidos presentes na água de lavagem de filtros e de lodo de decantador da ETA estudada, e confirmam a potencialidade de utilização deste sistema como alternativa ao descarte e como opção de nova linha de fornecimento de água tratada.

Palavras chaves: Estação de Tratamento de Água, Leito de Drenagem, Geotêxteis, Flotação por Ar Dissolvido.

ABSTRACT

In this study, we evaluated the quality of filter backwash water and sludge decanter Water Bom Jardim Treatment Plant, located in Uberlandia, Minas Gerais, after sequential treatment with drainage bed, flotation and filtration dissolved air, all bench scale. Compounds were evaluated drainage bed effluent three different types of geotextile webs: RT-21, RT-26 and RT-31, and tested three kinds of constituents of the sand grain size filters. The effluent drained, after passage through the drainage bed, passed through the flotation unit dissolved air and then by filtration units. Preliminary tests with crude sample of filter backwash water and sludge decanter, in order to characterize it and evaluate it as its physical, chemical and biological were performed. The geotextile webs used were chosen from results of previous studies, performed with the same type of system. The experiments were divided into stages I and II. In step I were conducted without addition of coagulant or auxiliary experiments on coagulation / flocculation flotation. The samples, after passage through the system, evaluating physical parameters pH, turbidity, true color and apparent color and about the chemical parameters, remaining concentrations of aluminum and iron. Step II The same tests were carried out in the same step I and determination of quality parameters, however, with aluminum sulphate dose of 5, 10 and 15 mg / L in the coagulation / flocculation flotation. Tests conducted in step I showed better performance were performed with the RT-26 blanket in the output of filter 01 with a reduction of 91.8% of the apparent color, 41.4% of true color and 97.6% turbidity. In phase II trials conducted in the best performance was drained with the RT-mat 26 the output of the filter 02 when subjected to a dosage of 15 mg / L aluminum sulfate as a coagulant agent. There was a reduction of 96.4% of the apparent color, 86.2% of true color and 99.6% turbidity. The presented results confirm the efficiency of the system in removing solids present in the water washing of filters and ETA decanter sludge studied and confirmed the capability of using this system as an alternative to disposal or optionally for a new water supply line treated.

Keywords: Water Treatment Plant, Drainage Bed, Geotextiles, Dissolved Air Flotation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de uma planta de uma ETA de ciclo completo e pontos de geração de resíduos.....	30
Figura 2 - Leitos de Drenagem	44
Figura 3 - Equipamento de floteste (jartest modificado)	47
Figura 4 - Placa de distribuição de água saturada com ar (recirculação).....	47
Figura 5 - Câmara de saturação.....	48
Figura 6 - Filtros de areia	49
Figura 7 - Detalhes de construção dos filtros	49
Figura 8 - Identificação de altura correspondente à taxa de recirculação (R) na parte frontal dos jarros	52
Figura 9 - Utilização e manuseio da câmara de saturação	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das águas superficiais.....	23
Tabela 2 - Classificação e categorias de águas superficiais	24
Tabela 3 - Valores dos parâmetros de qualificação do lodo (média +/- desvio padrão) ..	32
Tabela 4 - Definição e importância das micro propriedades de lodos de ETAs para determinação dos parâmetros de qualidade da água	33
Tabela 5 - Mantas com melhor tempo de drenagem e turbidez.....	45
Tabela 6 - Especificações técnicas dos geotêxteis avaliados nos Leitões de Drenagem.....	46
Tabela 7 - Seleção dos meios filtrantes	50
Tabela 8 - Parâmetros físicos da mistura do lodo do decantador com água de lavagem dos filtros	55
Tabela 9 - Parâmetros químicos da mistura do lodo do decantador com a água de lavagem dos filtros.....	56
Tabela 10 - Parâmetros biológicos da mistura do lodo do decantador com a água de lavagem dos filtros.....	56
Tabela 11 - Características físicas do drenado dos três leitões de drenagem	57
Tabela 12 - Parâmetros analisados nas saídas dos jarros - Manta RT-21	58
Tabela 13 - Parâmetros analisados nas saídas dos filtros - Manta RT-21	59
Tabela 14 – Parâmetros analisados nas saídas dos jarros - RT-26	62
Tabela 15 - Parâmetros analisados nas saídas dos filtros - Manta RT-26	62
Tabela 16 - Parâmetros analisados nas saídas dos jarros - Manta RT-31	66
Tabela 17 - Parâmetros analisados nas saídas dos filtros - Manta RT-31	66
Tabela 18 - Parâmetros analisados nas saídas dos jarros - RT-21 - DSA 5 mg/L	72

Tabela 19 - Parâmetros analisados nas saídas dos filtros - RT-21 - DSA 5 mg/L	72
Tabela 20 - Parâmetros analisados nas saídas dos jarros - RT-21 - DSA 10 mg/L	75
Tabela 21 - Parâmetros analisados nas saídas dos filtros - RT-21 - DSA 10 mg/L	75
Tabela 22 - Parâmetros analisados nas saídas dos jarros - RT-21 - DSA 15 mg/L	78
Tabela 23 - Parâmetros analisados nas saídas dos filtros - RT-21 - DSA 15 mg/L	78
Tabela 24 - Parâmetros analisados nas saídas dos jarros - RT-26 - DSA 5 mg/L	81
Tabela 25 - Parâmetros analisados nas saídas dos filtros - RT-26 - DSA 5 mg/L	81
Tabela 26 - Parâmetros analisados nas saídas dos jarros - RT-26 - DSA 10 mg/L	84
Tabela 27 - Parâmetros analisados nas saídas dos filtros - RT-26 - DSA 10 mg/L	84
Tabela 28 - Parâmetros analisados nas saídas dos jarros - RT-26 - DSA 15 mg/L	87
Tabela 29 - Parâmetros analisados nas saídas dos filtros - RT-26 - DSA 15 mg/L	87
Tabela 30 - Parâmetros analisados nas saídas dos jarros - RT-31 - DSA 5 mg/L	90
Tabela 31 - Parâmetros analisados nas saídas dos filtros - RT-31 - DSA 5 mg/L	90
Tabela 32 - Parâmetros analisados nas saídas dos jarros - RT-31 - DSA 10 mg/L	93
Tabela 33 - Parâmetros analisados nas saídas dos filtros - RT-31 - DSA 10 mg/L	93
Tabela 34 - Parâmetros analisados nas saídas dos jarros - RT-31 - DSA 15 mg/L	96
Tabela 35 - Parâmetros analisados nas saídas dos filtros - RT-31 - DSA 15 mg/L	96

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-21, efluente da FAD e efluente do Filtro 01.....	59
Gráfico 2 – Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-21, efluente da FAD e efluente do Filtro 02.....	60
Gráfico 3 – Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-21, efluente da FAD e efluente do Filtro 03.....	61
Gráfico 4 – Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-26, efluente da FAD e efluente do Filtro 01.....	63
Gráfico 5 – Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-26, efluente da FAD e efluente do Filtro 02.....	64
Gráfico 6 – Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-26, efluente da FAD e efluente do Filtro 03.....	64
Gráfico 7 – Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-31, efluente da FAD e efluente do Filtro 01.....	66
Gráfico 8 – Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-31, efluente da FAD e efluente do Filtro 02.....	67
Gráfico 9 – Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-31, efluente da FAD e efluente do Filtro 03.....	68
Gráfico 10 - Eficiência de remoção de turbidez, cor verdadeira e cor aparente do sistema composto por LD (mantas RT-21, RT-26, RT-31), FAD e Filtro 01.....	69

Gráfico 11 - Eficiência de remoção de turbidez, cor verdadeira e cor aparente do sistema composto por LD (mantas RT-21, RT-26, RT-31), FAD e Filtro 02.....	69
Gráfico 12 - Eficiência de remoção de turbidez, cor verdadeira e cor aparente do sistema composto por LD (mantas RT-21, RT-26, RT-31), FAD e Filtro 03.....	70
Gráfico 13 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-21, efluente da FAD e efluente do Filtro 01, sobre a influência de 5,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD	73
Gráfico 14 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-21, efluente da FAD e efluente do Filtro 02, sobre a influência de 5,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD	74
Gráfico 15 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-21, efluente da FAD e efluente do Filtro 03, sobre a influência de 5,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD	74
Gráfico 16 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-21, efluente da FAD e efluente do Filtro 01, sobre a influência de 10,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD	76
Gráfico 17 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-21, efluente da FAD e efluente do Filtro 02, sobre a influência de 10,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD	77
Gráfico 18 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-21, efluente da FAD e efluente do Filtro 03, sobre a influência de 10,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD	77
Gráfico 19 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-21, efluente da FAD e efluente do Filtro 01, sobre a influência de 15,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD	79
Gráfico 20 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-21, efluente da FAD e	

efluente do Filtro 02, sobre a influência de 15,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD80

Gráfico 21 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-21, efluente da FAD e efluente do Filtro 03, sobre a influência de 15,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD80

Gráfico 22 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-26, efluente da FAD e efluente do Filtro 01, sobre a influência de 5,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD82

Gráfico 23 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-26, efluente da FAD e efluente do Filtro 02, sobre a influência de 5,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD83

Gráfico 24 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-26, efluente da FAD e efluente do Filtro 03, sobre a influência de 5,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD83

Gráfico 25 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-26, efluente da FAD e efluente do Filtro 01, sobre a influência de 10,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD85

Gráfico 26 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-26, efluente da FAD e efluente do Filtro 02, sobre a influência de 10,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD86

Gráfico 27 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-26, efluente da FAD e efluente do Filtro 03, sobre a influência de 10,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD86

Gráfico 28 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-26, efluente da FAD e efluente do Filtro 01, sobre a influência de 15,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD88

Gráfico 29 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-26, efluente da FAD e efluente do Filtro 02, sobre a influência de 15,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD89

Gráfico 30 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-26, efluente da FAD e efluente do Filtro 03, sobre a influência de 15,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD89

Gráfico 31 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-31, efluente da FAD e efluente do Filtro 01, sobre a influência de 5,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD91

Gráfico 32 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-31, efluente da FAD e efluente do Filtro 02, sobre a influência de 5,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD92

Gráfico 33 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-31, efluente da FAD e efluente do Filtro 03, sobre a influência de 5,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD92

Gráfico 34 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-31, efluente da FAD e efluente do Filtro 01, sobre a influência de 10,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD94

Gráfico 35 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-31, efluente da FAD e efluente do Filtro 02, sobre a influência de 10,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD95

Gráfico 36 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT- 31, efluente da FAD e efluente do Filtro 03, sobre a influência de 10,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD95

Gráfico 37 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-31, efluente da FAD e efluente do Filtro 01, sobre a influência de 15,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD97

Gráfico 38 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-31, efluente da FAD e efluente do Filtro 02, sobre a influência de 15,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD98

Gráfico 39 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-31, efluente da FAD e efluente do Filtro 03, sobre a influência de 15,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente

DAC - Dosagem de Ácido Clorídrico

DSA - Dosagem de Sulfato de Alumínio

DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio

DMAE - Departamento Municipal de Água e Esgoto

DQO - Demanda Química de Oxigênio

ETA - Estação de Tratamento de Água

ETE - Estação de Tratamento de Esgoto

FAD - Flotação por Ar Dissolvido

LD - Leito de Drenagem

NBR - Norma Brasileira

OD - Oxigênio Dissolvido

pH- Potencial Hidrogeniônico

PNRH - Política Nacional de Recursos Hídricos

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

PNSB - Plano Nacional de Resíduos Sólidos

PROSAB - Programa de Pesquisas em Saneamento Básico

PVC - Poli Cloreto de Vinila

SG - Sedimentação por Gravidade

ST - Sólidos Totais

SS - Sólidos Suspensos

TAS Taxa Hidráulica de Aplicação de Sólidos

VMP - Valores Máximos Permitidos

LISTA DE SÍMBOLOS

%- Percentual

‰- Por milhar

A- Área exposta

A_f- Área de fundo

Al- Alumínio

C- Comprimento

Cd- Cádmio

C_e- Emissividade da superfície aquecida

Cr- Cromo

F- Fator de correção da temperatura

Fe-Ferro

h- Hora

K- Condutividade hidráulica

k- Unidade de temperatura Kelvin

kg.L⁻¹- Quilograma por litro

kg.m⁻²- Quilograma por metro quadrado

kJ.m⁻²- Quilojoule por metro quadrado

km- Quilômetro

L- Litro

L.min⁻¹- Litros por minuto

m.s⁻¹- Metros por segundo

m²- Metros quadrados

m³.dia⁻¹- Metros cúbicos por dia

m³.l⁻¹- Metros cúbicos por litro

m³.s⁻¹- Metros cúbicos por Segundo

mg/L - Miligrama por litro

mL- Mililitros

ppm - Partícula por milhar

RPM - Rotação Por Minuto

UC - Unidade de Cor

UNT - Unidade Nefelométrica de Turbidez

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A qualidade da água captada em um curso de água natural, e direcionada (ou bombeada) a uma estação de tratamento, embora nem sempre visíveis, apresenta inúmeras impurezas que são capazes de causar danos à saúde humana. Desta forma, faz-se necessário que a mesma, antes de ser distribuída para as residências, passe por um rigoroso tratamento para torná-la potável, conforme previsto na Portaria 2.914/2011 do Ministério da Saúde.

Devido à poluição e contaminação das águas superficiais e subterrâneas, a qualidade da água doce disponível no planeta vem decrescendo a cada ano. O Brasil possui inúmeras fontes de água doce, no entanto, mesmo sendo a água um recurso hídrico renovável, a falta de planejamento e controle ambiental pode provocar a sua escassez (CARNEIRO *et al.*, 2005). Sendo assim, entre diversas medidas para preservação e manutenção dos corpos hídricos, faz-se necessário o gerenciamento dos resíduos gerados pelas Estações de Tratamento de Água (ETA) (BARROSO, 2007).

Os resíduos gerados em uma ETA são constituídos basicamente de galhos, folhas, troncos, etc, (em sua maioria removidos na fase de gradeamento), areia, silte, argila, substância húmica e os sais metálicos que tem como principal fonte os coagulantes adicionados à água para o processo de coagulação. O lodo produzido em uma ETA, por possuir umidade elevada, normalmente superior a 95% (CORDEIRO *et al.*, 2001), é classificado conforme a NBR 10.004:2004 como resíduo sólido, e seu lançamento *in natura* no meio ambiente não é permitido, entretanto, grande parte dos sistemas de tratamento de água ainda realiza seu descarte em corpos de água próximos.

A Lei Federal 12.305 (2010) informa que na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Neste sentido, os resíduos gerados nas ETAs, não podem ser lançados nos cursos de água, nem dispostos nos aterros sanitários sem análise da escala de prioridades, ou seja, para que os resíduos de uma determinada ETA sejam considerados rejeitos, deverão ser verificadas as possibilidades de sua reutilização.

São vários os impactos negativos que o lançamento de lodo de ETA pode causar aos rios e córregos. Dentre eles, destacam-se as alterações na biota aquática, contaminação do solo, contaminação da água subterrânea e superficial, contaminação da flora e fauna local.

Estes resíduos possuem as fases sólida e líquida. A fase aquosa é subdividida em água livre, do floco, capilar e absorvida. Na fração de água livre, removida do lodo de forma natural ou pelo processo de Leitos de Drenagem (LD), ou por outro método existente, é possível adquirir água em quantidade apreciável.

Há muitos anos, a técnica de desaguamento por leito de drenagem, tem sido empregada para remoção da água do lodo. No Brasil, um dos pioneiros a utilizar esta técnica foi CORDEIRO (1993), o qual propôs uma modificação da estrutura de leito de secagem convencional, que era composto por camadas de pedregulho, areia grossa e tijolos, sendo esta, substituída por manta geotêxtil. A partir daí, várias pesquisas foram realizadas com a utilização de leitos de drenagem, os quais apresentaram resultados promissores de desaguamento de lodo de decantador de ETA (CORDEIRO, 2001; ACHON & CORDEIRO, 2003; FONTANA, 2004; BARROSO, 2007; SANTOS, 2012).

Os leitos de drenagem, por serem sistemas naturais, apresentam menores custos para aplicação e manutenção se tornando assim mais viáveis quando comparados a outros sistemas de remoção de água, principalmente mecânicos (MOTT & ROMANO, 1992). A técnica de leito de drenagem para o desaguamento de lodos de ETA já é realidade em alguns municípios do Brasil e tem demonstrado resultados eficientes, como verificado por CORDEIRO *et al.* (2001), ACHON & CORDEIRO (2003) e FONTANA (2004). As principais características deste tipo de sistema, em termos de eficiência, é a rápida drenagem da água livre, que a torna prontamente disponível, e a eficiente redução de impurezas medidas geralmente sob o aspecto da turbidez.

Considerando-se a possibilidade de geração de até 5% de resíduos sobre a produção bruta de água por dia (CORDEIRO *et al.*, 2001), é importante a condução de estudos que procurem avaliar, como alternativa ao descarte, a potencialidade de reuso da água constituinte destes resíduos. No entanto, os resíduos dos leitos de drenagem, não apresentam características adequadas para este fim, características estas, segundo uma das premissas deste trabalho, que podem ser alcançadas com a utilização do processo físico-químico de flotação por ar dissolvido e filtração em areia para o pós-tratamento do drenado, ambas tecnologias bem difundidas e com eficiências comprovadas na comunidade técnica e científica. Assim, neste trabalho foi avaliada a qualidade da água de lavagem de filtros e de lodo de decantador da ETA Bom Jardim – Uberlândia/MG, após tratamento sequencial por leito de drenagem,

seguido por unidade de flotação por ar dissolvido e unidade de filtração em areia, todos em escala de bancada.

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a qualidade da água de lavagem de filtros e de lodo de decantador da Estação de Tratamento de Água Bom Jardim – Uberlândia/MG, após tratamento sequencial por leito de drenagem (LD), flotação por ar dissolvido (FAD) e filtração, todos em escala de bancada.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar o drenado de leitos de drenagem compostos por três tipos distintos de mantas geotêxteis;
- Avaliar a aplicação da flotação por ar dissolvido no tratamento do drenado dos LD, sem utilização de coagulante;
- Avaliar a aplicação da flotação por ar dissolvido no tratamento do drenado dos LD, com utilização diferentes dosagens de sulfato de alumínio como coagulante;
- Avaliar a qualidade da água após passagem por filtros de três granulometrias de areia distintas acoplados sequencialmente após a flotação.

CAPÍTULO 3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma breve revisão acerca dos aspectos legais relativos aos resíduos sólidos e classificação dos corpos de água, parâmetros indicadores de qualidade da água, estação de tratamento de água, leitos de drenagem, flotação por ar dissolvido e filtração.

3.1 Aspectos legais

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010) define resíduos sólidos como todo material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível. Já a Associação Brasileira de Normas Técnicas, através da NBR 10.004:2004 traz na definição de resíduos sólidos que: “... ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição.”

Neste sentido, como pode comprovar o texto supracitado, apesar de ainda hoje, o lodo de ETA ser lançado indevidamente em corpos de água como efluente líquido, este resíduo é considerado como resíduo sólido, sujeito à legislação que trata deste tipo de resíduo. Felizmente, aos poucos, as questões relativas ao lançamento de lodo de ETA em curso de água vêm sendo tratadas com o rigor necessário. Em nosso país a Resolução CONAMA 357/2005 dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes e determina que os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados nos corpos receptores após o devido tratamento e desde que obedeçam às condições, padrões e exigências dispostas nesta resolução e em outras normas aplicáveis. O lançamento de lodo não só fere o disposto nesta resolução como também contraria a Lei 12.305/2010.

A Resolução CONAMA 357/2005 também dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. Segundo esta resolução as águas

são classificadas como doces, salobras e salinas (Tabela 1). Desta classificação originam subclasses (Tabela 2), que segundo sua composição físico-química, originam categorias, que permitem definir o tipo de tratamento mínimo ao qual a água deve ser submetida para tornar-se adequada ao fim a que se destina.

Tabela 1 - Classificação das águas superficiais

Classificação de águas superficiais	Caracterização quanto à salinidade
Doce	Igual ou inferior a 0,5 ‰
Salobra	Superior a 0,5 ‰ e inferior a 30 ‰
Salina	Igual ou superior a 30 ‰

Fonte: Resolução CONAMA nº 357/2005

Conforme DI BERNARDO e PAZ (2008), as ETAs foram desenvolvidas para remover as impurezas presentes nas águas das fontes de abastecimento, por meio de uma combinação de processos e de operações de tratamento. Segundo BRAGA *et al.* (2005), o sistema de tratamento de água para fins de consumo humano são constituídos de instalações e equipamentos destinados a fornecer água potável a uma comunidade. Os indicadores físicos, químicos e biológicos da água potável devem estar de acordo com o que estabelece a Portaria do Ministério da Saúde nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011, que estabelece os procedimentos e as responsabilidades, relativos ao controle e à vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. A portaria em questão define *Padrão de Potabilidade* como sendo o “conjunto de valores permitidos como parâmetro da qualidade da água para consumo humano.” Ela traz ainda as características físicas, organolépticas e químicas, seus Valores Máximos Permissíveis (VMP) e as características de qualidade microbiológicas e radioativas.

Tabela 2 - Classificação e categorias de águas superficiais

Classificação	Categorias	Caracterização quanto aos parâmetros tradicionais de qualidade da água
Doce	Classe I	Demanda Bioquímica (DBO) a 20 °C até 3 mg/L O ₂ ; Oxigênio Dissolvido (OD) superior a 6 mg/L O ₂ ; turbidez até 40 UNT (Unidades Nefelométrica de Turbidez); cor verdadeira do nível de cor natural do corpo de água em mg Pt.L ⁻¹ e pH entre 6,0 e 9,0.
	Classe II	Cor verdadeira máxima de 75 mg Pt.L ⁻¹ ; turbidez: máxima de 100 UNT; DBO a 20°C máxima de 5 mg/L O ₂ ; OD, superior a 5 mg/L O ₂ ; máximo de corante clorofila de 30 µg.L ⁻¹ ; densidade de cianobactérias máxima de 50000 cel.mL ⁻¹ ou 5 mm ³ .L ⁻¹ ; e fósforo total máximo de 0,030 mg/L para ambientes lênticos; e de 0,050 mg/L, em ambientes intermediários.
	Classe III	Densidade de cianobactérias máxima de 50.000 cel.mL ⁻¹ , ou 5mm ³ .L ⁻¹ ; DBO a 20°C no máximo 10 mg/L O ₂ ; OD maior que 4 mg/L O ₂ ; turbidez máxima de 100 UNT; cor verdadeira no máximo 75 mg Pt.L ⁻¹ e pH entre 6,0 e 9,0.
	Classe IV	Apresenta maiores valores permitidos para parâmetros como OD superior a 2,0 mg/L O ₂ e pH entre 6,0 e 9,0.
Salobra	Classe I	Taxa de carbono orgânico total máximo de 3 mg/L, OD superior a 6 mg/L O ₂ e pH entre 6,5 e 8,5.
	Classe II	Taxa de carbono orgânico total inferior a 5 mg/L e OD superior a 5,0 mg/L O ₂ .
	Classe III	Taxa de carbono orgânico total máximo de 10 mg/L, OD superior a 4 mg/L O ₂ e pH entre 6,5 e 8,5.
Salina	Classe I	Ausência de toxicidade crônica aos organismos (de acordo com os critérios estabelecidos pelo órgão ambiental competente), taxa de carbono orgânico total: máxima de 3 mg/L, OD superior a 5 mg/L O ₂ e pH entre 6,5 e 8,5.
	Classe II	Ausência de toxicidade aguda a organismos (de acordo com os critérios estabelecidos pelo órgão ambiental competente), taxa de carbono orgânico total Máximo de 5 mg/L, OD superior a 4 mg/L O ₂ .
	Classe III	pH entre 5 e 9 e OD superior a 3 mg/L O ₂ .

Fonte: Resolução CONAMA nº 357/2005

3.2 Parâmetros indicadores de qualidade da água

Segundo BRAGA *et al.* (2005), não existe água pura na natureza, a não ser as moléculas de água presentes na atmosfera na forma de vapor. Assim que ocorre a condensação, começam a ser dissolvidos na água, por exemplo, os gases atmosféricos. Isso ocorre porque a água é um ótimo solvente. Como consequência, são necessários indicadores físicos, químicos e biológicos para caracterizar a qualidade da água. Dependendo das substâncias presentes na atmosfera, da litologia do terreno, da vegetação e de outros fatores intervenientes, as principais variáveis que caracterizam a qualidade da água apresentarão valores diversos. Por exemplo, é de se esperar que a água da chuva, em locais próximos ao oceano, apresente maior concentração de cloreto de sódio. Rios que atravessam regiões de floresta densa devem apresentar cor e turbidez mais elevada do que rios que atravessam regiões desérticas, em razão do teor de matéria orgânica na água.

A qualidade da água é geralmente expressa em termos de seus indicadores físicos, químicos e biológicos. As variáveis físicas são medidas em escalas próprias, as variáveis químicas são usualmente dadas em concentração (mg/L ou ppm) e as variáveis biológicas, pela indicação da densidade populacional do organismo de interesse. Para a caracterização da qualidade da água, são coletadas amostras para fins de exames e análises, devendo-se obedecer cuidados e técnicas apropriados, com volume e número de amostras adequados. As informações a respeito dos indicadores físicos, químicos e biológicos da água foram extraídos de BRAGA *et al.* (2005).

Indicadores físicos

Dentre as características físicas da água incluem-se cor, turbidez, sabor e odor e pH.

Cor

A cor é uma característica derivada da existência de substâncias em solução, sendo essas, na grande maioria dos casos, de natureza orgânica. Quando aparece presente em uma amostra de água, devido a presença de substâncias dissolvidas e em suspensão, é denominada de cor aparente. Quando a amostra é constituída de substâncias dissolvidas apenas, é denominada de cor verdadeira.

Turbidez

A turbidez, propriedade de desviar raios luminosos, é decorrente da presença de matérias em suspensão na água, finamente dividido ou em estado coloidal, e de organismos microscópio. Quando acentuada em águas naturais, impede a penetração dos raios solares e, conseqüentemente, prejudica a fotossíntese, causando problemas ecológicos para o meio aquático.

Sabor e odor

São associados à presença de poluentes industriais ou outras substâncias indesejáveis, tais como matéria orgânica em decomposição, algas, etc.

Potencial Hidrogeniônico – pH

O potencial hidrogeniônico (pH), consiste num índice que indica a acidez, neutralidade ou alcalinidade de um meio qualquer. As substâncias em geral, podem ser caracterizadas pelo seu valor de pH, sendo que este é determinado pela concentração de íons de Hidrogênio (H^+). Quanto menor o pH de uma substância, maior a concentração de íons H^+ e menor a concentração de íons OH^- . Os valores de pH variam de 0 a 14 e podem ser medidos através de um aparelho chamado pHmetro, mas podemos medir o pH (com menos precisão) com o uso de indicadores.

Indicadores químicos

As características químicas da água estão relacionadas com a presença de substâncias dissolvidas, geralmente mensuráveis apenas por meios analíticos.

Salinidade

O conjunto de sais normalmente dissolvidos na água, formado pelos bicarbonatos, cloretos, sulfatos e, em menor quantidade, pelos demais sais, pode conferir à água sabor salino e características incrustantes. O teor de cloreto pode ser indicativo de poluição por esgotos domésticos.

Dureza

É a característica conferida à água pela presença de sais de metais alcalino-terrosos (cálcio, magnésio, etc) e alguns metais em menor intensidade. Além disso, é caracterizada pela extinção da espuma formada pelo sabão, índice visível de uma reação mais complexa, que dificulta o banho e a lavagem de utensílios domésticos e roupas, criando problemas de higiene. As águas duras, por causa de condições desfavoráveis e equilíbrio químico, podem incrustar as tubulações de água quente, radiadores de automóveis, hidrômetros, caldeiras etc.

Alcalinidade

Ocorre em razão da presença de bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos, quase sempre de metais alcalinos ou alcalino-terrosos (sódio, potássio, cálcio, magnésio etc.). Exceto quanto à presença de hidróxidos (sempre adicionados, não naturais), a alcalinidade não constitui problema isolado, desde que a salinidade esteja dentro dos limites aceitáveis para o uso desejado da água. A alcalinidade influencia o tratamento da água para consumo doméstico.

Corrosividade

A tendência da água de corroer os metais pode ser devido à presença de ácidos minerais (casos raros) ou pela existência em solução de oxigênio, gás sulfídrico e gás carbono. O oxigênio é fator de corrosão dos produtos ferrosos; o gás sulfídrico, dos não-ferrosos; e o gás carbônico, dos materiais à base de cimento.

Ferro e manganês

O ferro, com certa frequência associado ao manganês, confere à água sabor, ou melhor, sensação de adstringência e coloração avermelhada, decorrente de sua precipitação.

Indicadores biológicos

Os microrganismos aquáticos desenvolvem, na água, suas atividades biológicas de nutrição, respiração, excreção etc., provocando modificações de caráter químico e ecológico no próprio ambiente aquático. Os microrganismos de origem externa, como patogênicos, por exemplo, introduzidos na água junto com matéria fecal, normalmente não se reproduzem no meio aquático, tendo caráter transitório nesse ambiente.

Algas

Apesar de terem grande importância para o equilíbrio ecológico do meio aquático e de serem responsáveis por parte do oxigênio presente na água (produzido pelo processo da fotossíntese), podem acarretar também alguns problemas. Entre eles, podem-se citar a formação de grande massa orgânica, levando à produção de quantidade excessiva de lodo e a liberação de vários compostos orgânicos, que podem ser tóxicos ou produzir sabor e odor desagradáveis, o desenvolvimento de camadas de algas nas superfícies de reservatórios, causando turbidez e dificultando a penetração da luz solar, com a consequente redução do oxigênio do meio, o entupimento de filtros de areia em estações de tratamento da água, o ataque às paredes de reservatórios de águas e piscinas e a corrosão de estruturas de ferro e de concreto.

Microrganismos patogênicos

Muitos microrganismos são introduzidos na água junto com matéria fecal de esgoto sanitário. Podem ser de vários tipos: bactérias, vírus e protozoários. Esses microrganismos não são residentes naturais do meio aquático, tendo origem, principalmente, nos despejos de pessoas doentes. Assim, eles têm sobrevivência limitada na água, podendo, no entanto, alcançar o ser humano por meio da ingestão ou contato com a água, causando-lhe doenças.

Por causa da grande variedade de microrganismos patogênicos que podem estar contidos na água, é difícil sua detecção individualizada. É mais fácil inferir sua existência a partir de indicadores da presença de matéria fecal no meio líquido.

As bactérias, usadas como indicadores de poluição da água por matéria fecal, são os coliformes fecais, que vivem normalmente no organismo humano e nos dos demais animais de sangue quente, existindo em grande quantidade nas fezes. Embora não sejam patogênicas, a presença destas bactérias na água, indica que ela recebeu matéria fecal e pode, portanto, conter microrganismos patogênicos. Entre as bactérias do grupo coliforme, a *Escherichia Coli* é mais usada como indicadora da poluição fecal.

3.3 Estação de tratamento de água

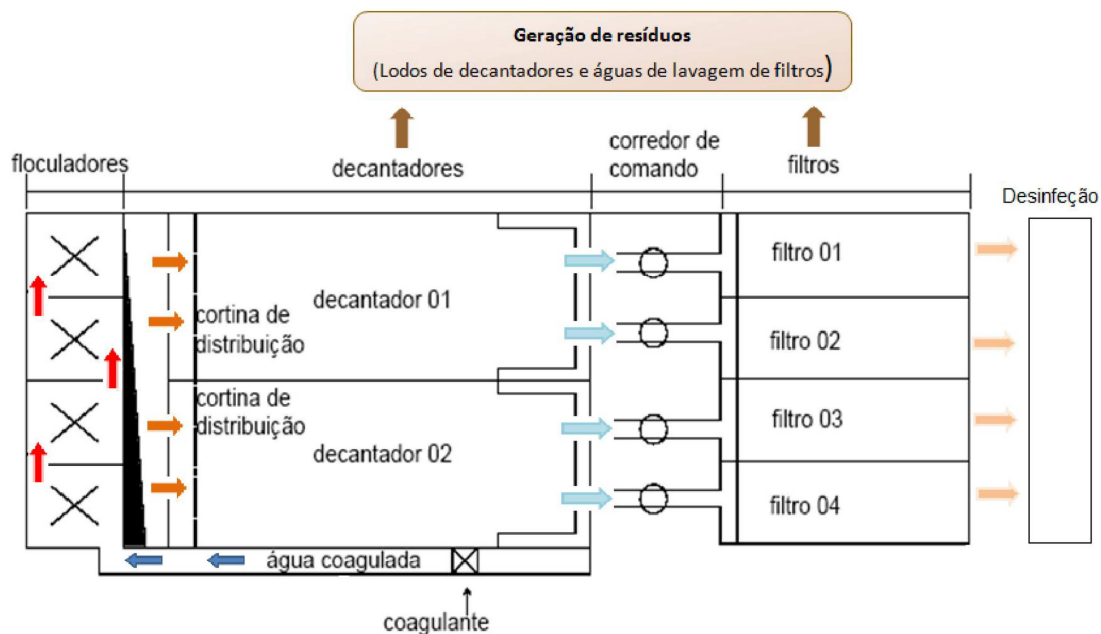
A NBR 12.216:1992 define Estação de Tratamento de Água (ETA) como sendo um conjunto de unidades utilizadas para adequação da água bruta aos padrões de potabilidade estabelecidos. Atualmente, os padrões de potabilidade em vigência no Brasil são estabelecidos pela portaria 2.914 de 2011, do Ministério da Saúde. A qualidade da água para o consumo

humano (higiene, preparação de alimentos, entre outras finalidades) é muito importante de ser considerada e deve ser adequado ao fim a que se destina. Independente da fonte de captação ser subterrânea ou superficial é necessário fazer o tratamento da água, sendo que os tipos de tratamento aplicados às águas subterrâneas diferem dos aplicados às águas superficiais e também divergem considerando-se o mesmo tipo de manancial para usos distintos. O que determina o nível e o tipo de tratamento é a qualidade da água bruta e o uso a que se destina. Neste contexto, é possível que a qualidade da água tratada seja suficiente para determinado uso e insuficiente para outro.

Para CORDEIRO *et al.* (2001), dentre os vários usos da água, o abastecimento humano é considerado o mais nobre e prioritário, uma vez que o homem depende de uma oferta adequada de água para sua sobrevivência. A qualidade de vida dos seres humanos está diretamente ligada à água, pois ela é utilizada para o funcionamento adequado de seu organismo, o preparo de alimentos, a higiene pessoal e de utensílios. Usamos a água também para irrigação de jardins, lavagem de veículos e pisos, usos esses com exigências menores em relação à qualidade. Não é necessário que a água existente no manancial apresente, em estado bruto, o padrão de qualidade exigido para fins de abastecimento público. Há várias maneiras de alterar suas características para torná-la compatível com as exigências do consumidor e da saúde pública. As possibilidades de tratamento ou de condicionamento da água são praticamente ilimitadas do ponto de vista técnico, mas imperativas de ordem econômica que restringem sua execução. O principal objetivo das ETAs é tornar uma determinada água, seja de manancial superficial ou subterrâneo, própria para a utilização a que se destina.

O que caracteriza uma Estação de Tratamento de Água por ciclo completo (Figura 1), é a sequência das etapas do tratamento que são: coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção. Para FONTANA (2004), estas estações apresentam um bom grau de eficiência na remoção da cor, turbidez e possíveis contaminantes.

Figura 1 - Esquema de uma planta de uma ETA de ciclo completo e pontos de geração de resíduos



Fonte: Adaptada Reali, 1999

Após a captação e com a chegada da água na ETA, produtos químicos são adicionados, onde se inicia o tratamento com o processo de coagulação. Essa é uma técnica de tratar a água com produtos químicos coagulantes, aplicados para agregar partículas dificilmente sedimentáveis em aglomerados que podem ser retirados mais facilmente. Os aglomerados de material sólido resultantes, chamados flocos, são removidos por sedimentação, por filtração ou por ambas as operações.

Com a adição de coagulantes, as partículas coloidais e em suspensão, que possuem carga negativa na sua superfície, desestabilizam-se através da ação das espécies hidrolisadas do coagulante, o que permite a aproximação e aglomeração das partículas e, com isso, a formação dos flocos (REALI, 1999).

Na sequência, inicia o processo de floculação, onde a água, após coagulada, passa por flóculos que podem ser mecanizados ou hidráulicos. Nesta fase, a agitação da água se dá de forma lenta, causando a ocorrência de choques entre as partículas formadas anteriormente, de modo a produzir outras de tamanho, volume e densidade maiores. Os flocos formados são separados do meio aquoso por meio de sedimentação, que consiste na ação da força gravitacional sobre essas partículas, as quais sedimentam no decantador, propiciando a clarificação do meio (DI BERNARDO e DANTAS, 2005). A sedimentação é eficiente na remoção da matéria em suspensão, dependendo do tamanho e da densidade das partículas

existentes e do tempo disponível para o processo. Partículas grandes ou pesadas são removidas em um intervalo de tempo relativamente curto, enquanto mais tempo é exigido para partículas mais leves ou finamente divididas. Se a concentração de partículas de difícil sedimentação for excessiva, estas irão passar pelo decantador e deverão ser retidas na etapa de tratamento seguinte, geralmente composta por filtros.

Na Filtração, a separação de partículas presentes se dá pela passagem da água por meio poroso, geralmente constituído de camadas de pedregulho, areia e antracito. Dependendo do sentido de escoamento da água percolada no filtro e da taxa de aplicação superficial, a filtração pode ser classificada como lenta, rápida de fluxo ascendente ou rápida de fluxo descendente. A água que sai dos tanques de filtração é conduzida ao tanque de contato onde ocorre a etapa de desinfecção. Nesta etapa a água é desinfetada, geralmente com o gás cloro (Cl_2), para eliminar bactérias e outros microrganismos existentes na mesma.

O funcionamento de uma ETA é semelhante ao funcionamento de uma indústria. A matéria prima é a água bruta que após tratada em diversos processos e operações, resulta em água potável como produto final. Entretanto durante o processamento, até atingir o produto final, há geração de resíduos, aqui denominados de lodo.

De acordo com a NBR 10.004:2004, o lodo produzido durante o processo de tratamento de água é considerado resíduo sólido, embora apresente 95% de água em sua constituição. O lodo é constituído basicamente de água, areia, silte, argila e metais oriundos principalmente do próprio processo de tratamento da água como sais de alumínio ou ferro e matéria orgânica (CORDEIRO, 1993).

Cordeiro (1993) relata que nos sistemas de tratamento de água no Brasil, a preocupação sempre foi garantir a produção de água com qualidade necessária para atender aos padrões de potabilidade, não existindo grande preocupação em relação aos subprodutos do tratamento. Relata que eram poucos os estudos sobre a geração de resíduos, características qualitativas e quantitativas desses, bem como aspectos relativos aos prováveis impactos ambientais e métodos de tratamento e disposição final. Infelizmente, mesmo com a Lei 9.605/98 de crimes ambientais, este panorama não apresentou a evolução esperada, uma vez que, grande parte das ETAs no Brasil, ainda descartam seus resíduos em corpos de água, especialmente as de pequeno porte.

Segundo BABATUNDE&ZHAO (2007) o lodo da ETA apresenta parâmetros com valores próximos aos descritos na Tabela 3:

Tabela 3 - Valores dos parâmetros de qualificação do lodo (média +/- desvio padrão)

Parâmetro	Unidade	Lodo formado em ETA que utiliza coagulante a base de alumínio	Lodo formado em ETA que utiliza coagulante a base de ferro
Alumínio	%*	29,7 +/- 13,3	10,0 +/- 4,8
Ferro	%*	10,2 +/- 12	26,0 +/- 15
pH	--	7,0 +/- 1,4	8,0 +/- 1
DBO	mg/L	45 (2 – 104)	A.D.
Chumbo	mg.kg ⁻¹	44,1 +/- 38,2	19,3 +/-25,3
Cádmio	mg.kg ⁻¹	0,5	0,48 +/- 0,26
Cromo	mg.kg ⁻¹	25,0 +/- 20,1	25,7 +/-21,6
Sólidos Totais	mg/L	(2500 – 52345)	(2132 – 5074)

*Porcentagem do componente na amostra de lodo seca.

A.D. significa ausência de dados.

Fonte: Adaptado de BABATUNDE e ZHAO(2007)

A constituição do lodo é variável, pois depende das características próprias da água, do sistema utilizado e das diferentes etapas e procedimentos de tratamento, a partir dos quais o resíduo é formado. Para caracterização do lodo de forma eficiente, faz-se necessário realizar análises de suas micro e macro propriedades. Segundo BARROSO (2007), as micro propriedades do lodo definem suas características intrínsecas e podem ser avaliadas como características de suspensão, enquanto que as macro propriedades estão relacionadas às características que conferem a tratabilidade dos resíduos e são dependentes das micro propriedades. Segundo o autor, as micro e macro propriedades do lodo são importantes para a tomada de decisões, quanto à escolha do processo de remoção de água e aproveitamento dos resíduos de ETAs. Além disso, alerta que as propriedades importantes para estudos de remoção de água por sistemas naturais, podem diferir, enormemente, daquelas usadas em estudos por sistemas mecânicos de remoção, considerando-se ainda as diferenças substanciais entre as diversas tecnologias de tratamento que compõem os sistemas mecânicos e naturais de desaguamento.

A Tabela 4 mostra algumas micro propriedades do lodo e sua importância para determinação da qualidade da água.

Tabela 4 - Definição e importância das micro propriedades de lodos de ETAs para determinação dos parâmetros de qualidade da água

Temperatura	Importante para o cálculo de alcalinidade, salinidade e estudos sobre a influência do carbonato de cálcio na saturação e estabilidade da água.
pH	Expressa a concentração dos íons hidrogênio, é adimensional e tem o valor calculado pelo logaritmo decimal negativo da atividade ou concentração dos íons de hidrogênio (H^+).
Turbidez	Caracterizada pela presença de suspensão coloidal composta por moléculas orgânicas e/ou inorgânicas, plâncton e organismos microscópicos. Este parâmetro é calculado pela diferença entre a luz emitida e captada por um sensor após esta atravessar o meio composto por água ou lodo.
Cor	Cor de uma amostra de água é o grau de redução de intensidade que a luz sofre ao atravessá-la, devido à presença de sólidos dissolvidos como ácidos húmicos, fúlvicos, manganês e ferro. Cor verdadeira desconsidera sólidos suspensos e colóides, o que não acontece com a cor aparente.
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	Teste que afere a quantidade de oxigênio molecular utilizado durante um período determinado de incubação para a degradação bioquímica de matéria orgânica.
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	Representa a quantidade de oxigênio necessária para estabilizar quimicamente a matéria orgânica e inorgânica de um despejo, ou seja, representa o consumo de oxigênio pela oxidação química da matéria orgânica e inorgânica.
Concentração de sólidos	A classificação dos sólidos pode ser química ou física. Fisicamente eles são classificados segundo suas dimensões em sólidos dissolvidos e em suspensão. Do ponto de vista químico, os sólidos são classificados como voláteis e fixos.

Fonte: APHA (2005)

As macro propriedades são dependentes das micro propriedades e também interferem no processo de desidratação do lodo. Um exemplo de macro propriedade é a resistência específica à filtração (BARROSO, 2007). Segundo APHA (2005), o conceito de resistência específica a filtração e de tempo de filtragem são semelhantes, no entanto, existem testes diferentes para sua determinação.

3.4 Leitos de Drenagem

Os leitos de drenagem surgiram de uma adaptação dos leitos de secagem convencionais basicamente pela introdução de mantas geotêxteis como meios filtrantes. Os primeiros trabalhos para caracterização e avaliação da capacidade filtrante de tais mantas surgiram na década de 90. Até então, o leito de secagem tradicional era o sistema natural de

desaguamento de resíduos de ETAs mais utilizado e não apresentou alterações significativas estruturais até a proposição do leito de drenagem em que houve a substituição da areia pela manta geotêxtil. A partir daí os leitos de drenagem foram avaliados em função da eficiência de filtração e da vida útil do material sintético, da interferência do diâmetro dos poros dos geotêxteis na colmatção e na qualidade da água drenada, além de diversos outros estudos.

A técnica de leito de drenagem assemelha-se à filtração, onde as partículas formam uma torta na superfície do meio filtrante e essa massa de sólidos retida também atua como filtro (RICHTER, 2001). No leito de drenagem, o tempo de remoção da água constitui-se na somatória do tempo de drenagem e de evaporação da água, evidenciando desta maneira a importância das condições climáticas e de drenagem neste procedimento.

Dentre os trabalhos desenvolvidos com leitos de drenagem destacam-se aqueles elaborados por MARTEL (1989), THERIAULT (1991), KOERNER & KOERNER (1992), CORDEIRO (2001), AYDILEK (2002), ACHON e CORDEIRO (2003), MENDONÇA *et al.* (2004), MORTARA (2011), BARROSO (2007) e SANTOS (2012).

Martel (1989), avaliou, em escala de laboratório, a eficiência de um sistema natural de desaguamento, constituído de coluna de acrílico com diâmetro de 15 cm e funil na base para recolhimento do drenado no tratamento de lodo congelado. Na base da coluna foi posicionado o leito composto por cascalho, manta geotêxtil, areia e novamente geotêxtil para evitar a mistura do lodo com a areia do sistema. O autor avaliou a interferência do congelamento e descongelamento do lodo no desaguamento do mesmo. Os resultados observados não foram conclusivos quanto à sua eficiência, evidenciando a necessidade de mais estudos em que fossem observados outros parâmetros de controle, como o clima da região de implantação do sistema.

Theriault (1991), observou um menor tempo de drenagem quando substituiu a areia do leito de secagem por manta geotêxtil e reforçou as vantagens e benefícios do sistema natural de desaguamento, destacando os baixos custos para implementação em função principalmente da exigência de menores áreas.

Para CORDEIRO (2001), em locais onde há a disponibilidade de grandes áreas próximas às ETAs, a adoção destes leitos é a solução mais fácil, uma vez que não são elevados os custos relacionados ao transporte do lodo e de retorno da água drenada. Para instalação de um leito de drenagem é interessante que a área esteja situada em cotas mais baixas que os decantadores, evitando o bombeamento do lodo bruto.

Achon e Cordeiro (2003), destacam o desempenho dos leitos de drenagem, observando tempo de desaguamento do lodo de 7 dias, enquanto que lagoas de lodo podem

levar até meses para a remoção da água. Comparando o desaguamento de lodos gerados a partir de aplicação de distintos coagulantes, relatam que lodos de ETAs com cloreto de poli alumínio ou sulfato de alumínio, quando submetidos ao desaguamento por leito de drenagem, apresentam como resultado final, redução semelhante de volume e porcentagem de sólidos totais, no entanto o tempo de drenagem foi menor para o lodo com cloreto de poli alumínio.

Barroso (2007), após extensa investigação a respeito da aplicação de leitos de drenagem para tratamento do lodo de ETAs com diferentes coagulantes primários, observou que o desempenho deste sistema para redução de volume alcançou cerca de 80% e 90% para os lodos de sulfato de alumínio e poli cloreto de alumínio e teor de sólidos de 30% a 90%, sem consumo de energia ou adição de produtos químicos. Na fase de drenagem, verificou que, independente do tipo e volume de lodo aplicado, a vazão de drenagem foi maior quanto menor o valor da taxa de aplicação de sólidos. O dreno/filtro constituído pelas mantas apresentou grande capacidade drenante de água livre e uma distribuição de tamanho dos poros capaz de reter partículas floculentas ou discretas.

Santos (2012), avaliou a influência parcial das condições climáticas no funcionamento de leitos de drenagem. Para tanto, avaliou o desempenho de seis leitos de drenagem em escala reduzida em diferentes condições de taxa de aplicação de sólidos (TAS). Em três leitos de drenagem, a influência das condições climáticas foi parcialmente limitada pela manutenção lateral de anteparos (que impediam a ação dos ventos na superfície dos leitos). Ao final dos experimentos concluiu que os leitos de drenagem parcialmente protegidos, produziram, para o mesmo tempo de ensaio, lodo com umidade 50% superior ao dos leitos de drenagem sem os anteparos laterais. Ressalta que, mesmo assim, as concentrações de sólidos obtidas foram elevadas, entretanto, para um tempo maior de operação. Este trabalho foi importante no sentido de mostrar que mesmo em condições climáticas desfavoráveis, o sistema de leito de drenagem pode ser usado com sucesso para o desaguamento de lodo de ETAs.

3.5 Flotação por Ar Dissolvido

O sistema de flotação por ar dissolvido (FAD) é composto basicamente de dois sub processos: coagulação/floculação, responsável pela desestabilização das partículas e formação dos flocos e flotação, responsável pela remoção dos flocos por meio da agregação em microbolhas de ar. Na flotação propriamente dita, ocorre a interação entre a geração e concentração de bolhas de ar, a agregação das bolhas de ar com os flocos formados e a

ascensão do agregado até superfície da unidade. LUNDH *et al.* 2002, afirma que o mecanismo de flotação por ar dissolvido é descrito por pequenas bolhas de ar que se aderem às partículas suspensas presentes na água, cuja ideia é gerar aglomerados com menor densidade que a água, causando a ascensão do floco até a superfície. As bolhas de gás são geradas pela redução da pressão de um fluxo de água saturada com ar. Uma parcela de ar dissolvido é liberada em forma de pequenas bolhas, usualmente menores que 100 μm de diâmetro, da fase líquida para a gasosa.

Segundo HAHN (1982), a formação de bolha em sistemas de flotação é conseguida por meio da saturação com ar do afluente ou da parcela de efluente clarificado (a ser recirculado, posteriormente) em câmaras de pressurização e posterior redução da pressão desta, normalmente de 4 ou 5 atm, para a pressão atmosférica na unidade de flotação. Como prediz a Lei de Henry-Dalton, o ar dissolvido em pressões superiores à atmosférica, será liberado de modo a alcançar a nova condição de equilíbrio, controlada por meio da pressão parcial do gás na unidade de flotação. Para DI BERNARDO (2001), o tamanho das bolhas é muito importante na flotação, pois bolhas pequenas, além de apresentarem maior superfície específica para a mesma quantidade de ar, necessitam deslocar menor quantidade de água da superfície das partículas onde vão aderir. Existe relação entre o diâmetro médio da bolha e a pressão de saturação, sendo que, em geral, o diâmetro da bolha é maior quanto menor for a pressão, dependendo do tipo de difusor. Segundo HAHN (1982), o tamanho das bolhas é da ordem de 100 μm (ou menores) em sistemas de tratamento de águas residuárias.

Segundo ZABEL (1985), os principais tipos de flotação são: flotação por ar disperso, flotação por ar dissolvido e flotação eletrolítica.

A flotação por ar disperso não é adequada para o uso em tratamento de águas de abastecimento, devido à reduzida eficiência de remoção de impurezas, pois há geração de bolhas com tamanhos relativamente grandes, maiores que 1 mm, comparando com o tamanho entre 20 a 100 μm utilizadas na flotação por ar dissolvido e eletrolítica. Segundo ZABEL (1985), para águas contendo alta concentração de algas ou com turbidez relativamente baixa e cor relativamente alta, a flotação por ar dissolvido (FAD) é o procedimento mais indicado como pré-tratamento na produção de água potável.

A flotação eletrolítica consiste na geração de bolhas de oxigênio e hidrogênio no interior de uma unidade de flotação, por meio da eletrólise da água devido à aplicação de corrente elétrica entre dois eletrodos situados no fundo da mesma.

Dentre as diversas modalidades de flotação, a FAD é a mais utilizada na área de saneamento, com eficiência comprovada no tratamento de água de abastecimento, em especial

quando se trata de água de reservatório eutrofizado, e também, no tratamento de efluentes, principalmente secundários, com vários trabalhos já publicados que corroboram com sua aplicação também para este fim.

De acordo com TIEHM *et al.* (1999), parte considerável da DQO e fósforo presente nos esgotos está absorvida aos sólidos suspensos (SS). Dessa forma, a aplicação da FAD, eficiente na remoção de SS, pode ser utilizada com sucesso, além de que parte do material dissolvido também é removido com o uso do coagulante. Segundo ADIN (1999), a remoção de sólidos particulados (já existentes ou formados pela coagulação/floculação) deve-se principalmente à habilidade que as pequenas bolhas têm em capturar os sólidos particulados/flocos. De fato, EDZWALD (1995), afirma que a eficiência da FAD é fundamentalmente dependente da formação de pequenas bolhas de ar (dependente da pressão de saturação) e do contato promovido entre estas bolhas e os flocos na zona de reação.

A quantidade de ar requerida para a FAD aplicada ao tratamento de água de abastecimento depende apenas da vazão total a ser tratada e não da quantidade de sólidos suspensos (para $SS < 1000 \text{ mg/L}$) (ZABEL, 1985), isso porque quando se trata de efluentes com baixa concentração de sólidos, a razão ar/sólidos (A/S) é bem maior do que quando se trata de efluentes com carga de sólidos muito elevada. A opção pela utilização do parâmetro “g de ar/m³ de esgoto afluente” para o cálculo da quantidade de ar a ser fornecida à flotação, em determinadas situações, deveu-se a esse fato, no qual o parâmetro A/S pode tornar-se inadequado para o monitoramento do processo. Nesses casos, deve-se usar o parâmetro “g de ar/m³ de esgoto afluente” supracitado, o qual informa indiretamente a concentração de microbolhas introduzidas no flotador. Assim, tal parâmetro é capaz de fornecer as melhores informações a respeito da taxa de colisões entre microbolhas e flocos presentes, por exemplo, em flotadores utilizados para o tratamento de águas de abastecimento. Vale ressaltar que o sucesso da flotação está relacionado com a quantidade total de ar fornecida e não com a recirculação e pressão de saturação analisados isoladamente (OLIVEIRA, 2007).

No entanto, VLASKI *et al.* (1997), a partir de modelo teórico, verificaram que a dispersão dos tamanhos de bolhas, influencia na eficiência do processo e pode ser controlada pela variação do binômio vazão de recirculação/pressão de saturação. Porém, a relação tamanho da bolha/pressão de saturação não é linear, sendo comprovado que, para pressões na câmara de saturação acima de 5 atm, há pouca diminuição no tamanho médio alcançado. Os autores utilizaram em seus experimentos água proveniente de reservatório contendo algas do gênero *Microcystisaeruginosa* como afluente para uma instalação piloto. A dosagem ótima de coagulante foi cerca de duas a três vezes menor do que a dosagem utilizada em uma estação

de tratamento convencional, 7 a 12 g de Fe/m³ em comparação aos 20 a 24 g de Fe/m³. A eficiência de remoção de turbidez foi superior e o residual de ferro foi menor. A FAD mostrou-se eficiente e apropriada para a remoção de partículas (algas) para estas baixas dosagens de coagulante. Foi necessário um tempo de floculação superior a 15 min e a variação do gradiente de velocidade médio de floculação não influenciou nos resultados. Os autores também obtiveram resultados positivos na remoção de algas efetuando a oxidação da água de estudo com ozônio e permanganato de potássio anteriormente às etapas da coagulação, floculação e flotação.

Segundo ZABEL (1985), é importante que a introdução da água saturada com ar, seja o mais próximo possível do fluxo de água floculada a fim de que sejam minimizados os efeitos de aglutinação das bolhas. Também, uma boa distribuição das bolhas de ar com a água floculada é importante para facilitar o contato bolha-floco. A pressão deve ser reduzida instantaneamente e em condições altamente turbulentas, de modo que a injeção de água saturada com ar seja mais eficiente ao passar pela válvula ou orifício. Entretanto, a velocidade de escoamento da água de recirculação quando a válvula é aberta ou pelo orifício deve ser suficientemente baixa para que o complexo bolha-floco não seja quebrado.

A flotação tem várias vantagens sobre a sedimentação por gravidade, destacando-se: possibilidade de produção de água de melhor qualidade; operação em taxas de aplicação mais altas, resultando estações de tratamento mais compactas; início de operação mais rápido; concentração de sólidos no lodo é significativamente superior à produzida na sedimentação e menor tempo de detenção em uma estação de tratamento. MALLEY&EDZWALD (1991), realizaram um estudo em que a flotação por ar dissolvido (FAD) foi comparada à sedimentação por gravidade (SG) em experimentos de laboratório, utilizando águas naturais e sulfato de alumínio como coagulante. Os ensaios de FAD foram conduzidos em um flotador de bancada e produziram resultados de turbidez remanescente significativamente inferiores aos obtidos com sedimentação para dois tipos de águas naturais, particularmente em temperaturas mais baixas. A diferença no desempenho entre FAD e SG pode ser explicada devido ao tamanho e densidade das partículas, temperatura e velocidade de sedimentação descritas pela Lei de Stokes. Os autores concluíram que a grande quantidade de microbolhas geradas durante a recirculação proporcionaram condições (oportunidades) adequadas para a colisão entre as partículas e bolhas de gás, reduzindo, assim, o tempo de floculação de 20 min obtido na sedimentação, para 5 min na flotação, para obter os mesmos valores de turbidez remanescente.

3.6 Filtração

A filtração consiste na remoção de partículas suspensas e coloidais e microrganismos presentes na água que escoam através de um meio poroso. Em geral a filtração é o processo final de uma estação de tratamento de água, antes da desinfecção e, atualmente, em configurações mais modernas, compõe parte final em sistema de tratamento de esgoto, como pós-tratamento (OLIVEIRA, 2007). De acordo com DI BERNARDO (1993), a retenção de impurezas pela filtração é considerada como resultado de dois mecanismos distintos, porém complementares: aderência e transporte. Os mecanismos de transporte são impacto inercial, interceptação, sedimentação, difusão e ação hidrodinâmica e os mecanismos de aderência são interação combinada das forças eletrostáticas e de Van Der Waals e interação química. Iniciado o funcionamento e considerando constante a vazão afluyente a um filtro, as partículas são pouco a pouco retidas nos vazios intergranulares causando diminuição das dimensões destes. Há, portanto, com o tempo, um conseqüente aumento da velocidade intersticial e força de cisalhamento, responsáveis pelo arraste de partículas para subcamadas inferiores do meio filtrante até o momento em que estas atravessam completamente o leito, ocorrendo transpasse, um dos critérios de parada de uma carreira de filtração quando se está tratando água de abastecimento.

No entanto, para o pós-tratamento de efluentes, pode-se intuir que a carreira de filtração é dependente principalmente da carga hidráulica máxima disponível no filtro, devido aos requisitos menos restritivos de qualidade da água produzida, em termos de turbidez e cor, entre outros, dependendo da aplicação do efluente tratado (OLIVEIRA, 2007). Imagina-se que as características de água de lavagem de filtros e decantadores de ETAs, em termos de turbidez, se aproximam mais das de efluentes oriundos de pós-tratamento de águas residuárias do que das características da água que deixa a unidade de decantação de ETA. Neste sentido é feita uma breve revisão sobre a filtração de efluentes após tratamento secundário.

De acordo com CIKUREL *et al.* (1996), a filtração e posterior desinfecção de efluentes secundários são técnicas cada vez mais aplicadas em estações de tratamento de esgoto com vistas a reuso, principalmente em regiões com escassez de água. A água residuária após passar pelo tratamento terciário, com devida remoção de turbidez, cor e sólidos suspensos e posterior desinfecção, pode ser usada na agricultura, em torres de resfriamento, limpeza de pátios, rega, além de outras aplicações. Um sistema convencional com tratamento terciário físico-químico apresenta geralmente, após as unidades de tratamento primário e secundário, coagulação química seguida de floculação, sedimentação/flotação,

filtração e desinfecção. A experiência no estudo e/ou projeto de plantas de tratamento terciário com etapa de filtração é crescente no mundo inteiro na medida em que os recursos tornam-se cada vez mais escassos e as legislações cada vez mais restritivas, no entanto, os parâmetros de controle da filtração para águas residuárias não são tão bem conhecidos como no caso da filtração de água de abastecimento.

Porém, de acordo com GHOSH *et al.* (1994), já que o pré-tratamento (coagulação/floculação) desempenha o papel principal na filtração, os diagramas de coagulação desenvolvidos para água de abastecimento por AMITHARAJAH e colaboradores (AMITHARAJAH & MILLS, 1982; AMITHARAJAH, 1988) podem ser usados como ferramenta importante na previsão das condições ótimas de desestabilização das partículas e efetiva filtração. Tais conceitos de coagulação, generalizados para água de abastecimento, podem também ser usados para se prever a dosagem de produtos químicos na coagulação/floculação e eficiente filtração de água residuária, entretanto, de acordo com Hamoda *et al.* (2004), embora a filtração em meio granular seja prática comum há muito tempo no tratamento de água de abastecimento, os critérios de projeto de filtros para água residuária não podem ser derivados diretamente da experiência adquirida nestes sistemas. Os filtros nestes casos são operados a taxas de carregamento de sólidos praticamente constantes o que certamente não ocorre no tratamento de efluentes. Além disso, a matéria particulada encontrada no esgoto é totalmente diferente da encontrada em águas de abastecimento e apresenta estrutura “pegajosa” o que dificulta lavagem dos filtros. Ressalta ainda que a natureza da matéria orgânica não é consistente e varia de acordo com a unidade de tratamento precedente. De maneira geral, a adequação dos filtros para obtenção de melhor desempenho no tratamento primário ou terciário é uma questão de ponderação entre a configuração do leito filtrante, taxa de filtração, dosagem de produtos químicos em vista da eficiência de remoção necessária e os custos aceitáveis (determinados pela configuração do filtro, energia para limpeza e custo do produto químico) (OLIVEIRA, 2007).

CAPÍTULO 4

MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Generalidades

Neste trabalho foi avaliada a qualidade da água de lodo de decantador e de lavagem de filtros da Estação de Tratamento de Água Bom Jardim, na cidade de Uberlândia-MG, após tratamento nas unidades sequenciais de leito de drenagem (LD), flotação por ar dissolvido (FAD) e filtração, todos em escala de bancada. Foram utilizados três LD de características semelhantes à exceção do tipo de manta geotêxtil utilizada em cada um deles. Foram utilizados três jarros do equipamento *Jartest*, cada um recebendo efluente de um LD. Na sequência foram dispostos três filtros com granulometrias distintas. Maiores detalhes são fornecidos em item pertinente. Para realização dos ensaios foi utilizada a estrutura do Laboratório de Saneamento da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia.

Para realização dos ensaios foi utilizada como amostra bruta uma composição (mistura) de lodo de decantador e água de lavagem de filtro. Tal medida foi de suma importância para garantia de dois parâmetros de controle cruciais: volume suficiente de drenado (utilizado posteriormente na FAD e na filtração) e taxa de aplicação de sólidos (TAS). A TAS nos leitos de drenagem (LD) foi medida em termos de quilos de sólidos totais por metro quadrado de leito (Kg ST.m^{-2}). De acordo com esta unidade de medida percebe-se que para uma dada TAS, quanto maior a concentração de sólidos na amostra a ser tratada, menor o volume necessário de amostra, por outro lado, quanto menor a concentração de sólidos, maior o volume de amostra necessário. Neste trabalho foi utilizada a TAS de $3,5 \text{ Kg ST.m}^{-2}$, extraída do trabalho de Santos (2012), cujas configurações mais adequadas foram aqui utilizadas. Para garantia desta TAS foi necessária a composição da amostra de lodo (decantador e filtro) uma vez que se utilizava apenas amostra de lodo do decantador, por ser muito concentrada, não haveria volume suficiente de drenado para tratamento nas unidades de FAD e filtração seguintes. Ressalta-se que esta “mistura” das amostras de lodo traz mudanças significativas apenas na concentração de sólidos, uma vez que a origem do lodo é a mesma e, portanto, guarda as mesmas características das amostras individuais.

O trabalho foi dividido em duas etapas principais (I e II), entretanto, foram necessários testes preliminares para caracterização da amostra de lodo quanto aos seus parâmetros físicos, químicos e biológicos. Também foram avaliadas preliminarmente as características do drenado (água do lodo que passa pelo leito de drenagem).

Na Etapa I foram realizados ensaios com as unidades piloto mantendo-se fixos na unidade de FAD os parâmetros gradiente de mistura rápida (Gmr), velocidade de mistura rápida (Vmr), gradiente médio de velocidade (Gf), velocidade de flotação (Vf), pressão (P) no interior da câmara de pressurização e o tempo de saturação (Tsat). Nestes ensaios não foram adicionados agentes coagulantes. A hipótese básica deste procedimento era que mesmo sem agentes coagulantes externos adicionais a redução de turbidez na FAD e nos filtros seria eficiente. Vale lembrar que no drenado, pela sua origem, existia considerável concentração de sais metálicos.

Na Etapa II da parte experimental, repetiu-se todos os ensaios realizadas na Etapa I, entretanto, foi introduzido sulfato de alumínio como coagulante, na mistura rápida da FAD, nas concentrações de 5 mg/L, 10 mg/L e 15 mg/L. A hipótese básica era que mesmo havendo redução de turbidez sem utilização de coagulantes adicionais, quando estes fossem utilizados, a eficiência de redução seria ainda maior.

A seguir é apresentada uma breve descrição da ETA na qual foram coletadas as alíquotas de lodo de decantador e água de lavagem dos filtros, dos equipamentos e produtos químicos dos procedimentos metodológicos utilizados para realização dos ensaios e das instalações experimentais: leitos de drenagem (LD), flotador (FAD) e filtros.

4.2 Estação de Tratamento de Água Bom Jardim em Uberlândia – MG

A Estação de Tratamento de Água (ETA) Bom Jardim, fica localizada na zona urbana no município de Uberlândia, sob a responsabilidade do Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE), uma autarquia da Prefeitura Municipal. O manancial de abastecimento é o Ribeirão Bom Jardim, que apresenta vazão média de $6,21 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e 25 km de extensão, cuja nascente fica no município de Uberaba-MG. Segundo a resolução CONAMA 357/2005, as águas do manancial de abastecimento são classificadas como classe II.

Na ETA, a água bruta é submetida ao tratamento convencional de ciclo completo, na qual é utilizado o sulfato de alumínio como agente coagulante. Desde 2006, todo o sistema

público de abastecimento de água de Uberlândia vem passando por um constante processo de modernização, o qual proporcionou economia de 20% na dosagem de coagulante em um ano, segundo o DMAE (o que reduz o volume de lodo gerado).

O resíduo gerado nesta ETA, durante o processo de tratamento da água, é, atualmente, lançado no rio Uberabinha (que passa pela área urbana da cidade de Uberlândia), o que representa uma fonte pontual, potencial e efetiva de poluição. Esta prática pode comprometer a qualidade das águas superficiais e alterar a flora e a fauna local. Neste contexto, pode-se observar a importância, em curto e médio prazo, da implantação de um sistema que possibilite o tratamento dos resíduos oriundos da ETA, o que destaca a necessidade real do desenvolvimento de trabalhos que estudem as alternativas viáveis ao tratamento deste tipo de resíduo.

4.3 Equipamentos e produtos químicos

Os equipamentos utilizados na parte experimental deste trabalho foram:

- Equipamento de *JarTest* (Nova Ética);
- Turbidímetro nefelométrico, modelo 2100P da Hach, utilizado para leitura de turbidez;
- pHmetro digital microprocessado DLA-pH, utilizado para leitura do pH;
- Bomba a vácuo DIA-PUMP, modelo CA, utilizado para retirar sólidos em suspensão das amostras;
- Espectrofotômetro Hach, modelo DR 5000, utilizado para a leitura de cor verdadeira e aparente;
- Filtro de fibra de vidro 1,21 mm;
- Cronômetro digital;
- Béquer 200 mL;
- Pipeta de três vias;
- Pipeta graduada 100 mL.

Os produtos químicos utilizados na Etapa II deste trabalho (quando houve adição de coagulante na FAD) foram:

- Coagulante: Solução de sulfato de alumínio, preparada a partir do produto líquido comercial (massa específica de 1,325 g/L e concentração de 662,6 g de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$ / L) e diluído em três balões de 1 litro cada contendo água

destilada, resultando em uma solução para a qual cada mL da solução tenha 5, 10 e 15 mg do produto líquido comercial. Desta forma, foram adicionados nos jarros da FAD volumes da solução de 2, 4 e 6 mL, respectivamente.

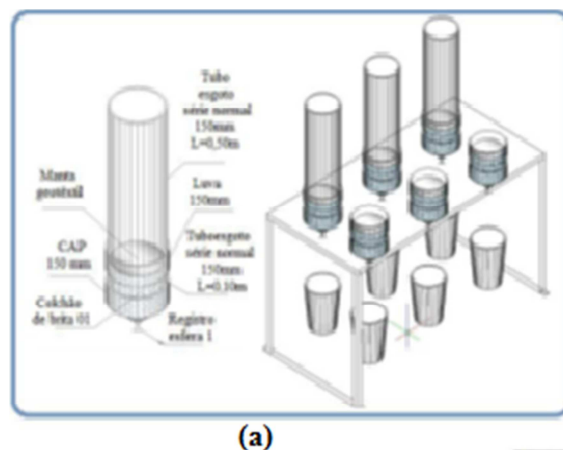
- Acidificante: Solução de ácido clorídrico, preparada a partir de solução comercial (massa específica de 1,19 kg/L, concentração de 30% de HCl), resultando uma solução com concentração de 1 mg do produto comercial para cada mL da solução.

4.4 Instalação do sistema composto por LD, FAD e Filtração

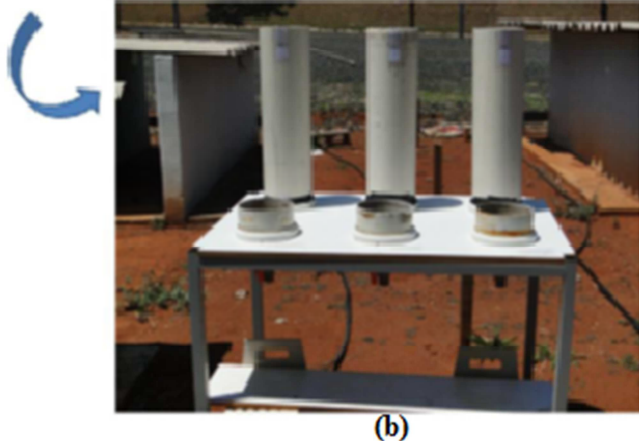
4.4.1 Seleção das mantas e instalação dos Leitos de Drenagem

Os Leitos de Drenagem utilizados neste trabalho, eram compostos por tubos de PVC de 150 mm de diâmetro com 0,5 m de altura, base com cap de PVC com diâmetro de 150 mm no qual era posicionada, brita e a manta geotêxtil, conforme ilustra a Figura 2. Cada um dos leitos de drenagem tinha área de fundo (Af), igual a 0,0178 m² e capacidade máxima (volume - V) de 8,8 L. Sua parte inferior era dotada de registro de esfera para coleta do drenado.

Figura 2 - Leitos de Drenagem



**(a) Projecção dos leitos
(b) Leitos construídos**



Fonte: SANTOS, (2012)

As mantas geotêxteis que compuseram os Leitos de Drenagem eram da marca BIDIM, do tipo não tecido agulhado de filamentos contínuos de 100% poliéster, descritas pelo fabricante como RT-21, RT-26 e RT-31. Estas mantas foram escolhidas a partir do trabalho realizado por SANTOS (2012), que comprovou serem estas as de melhor desempenho hidráulico e que produziram drenados de melhor qualidade. A autora avaliou em seu trabalho (utilizando leitos de drenagem) 16 mantas geotêxteis, das quais, e, após uma série de ensaios, foram selecionadas três que produziram os melhores resultados em termos de eficiência hidráulica do sistema e qualidade do drenado, cujas descrições já foram apresentadas e constam também na Tabela 6.

A Tabela 5 mostra o tempo de drenagem e a turbidez encontrada para o volume inicial de 50 mL de drenado e para o volume de 50 mL seguinte.

As características das mantas geotêxteis encontram-se discriminadas na Tabela 6. Nela é possível perceber a semelhança da condutividade hidráulica das mantas geotêxteis utilizadas, o que pode justificar a similaridade dos resultados dos ensaios obtidos para cada uma delas.

Tabela 5 - Mantas com melhor tempo de drenagem e turbidez

Manta	Volume Drenado	Tempo Drenagem (Segundos)	Turbidez (UNT)
RT-21	1º) 50 mL	27	218
RT-26		23	268
RT-31		32	194
RT-21	2º) 50 mL	54	156
RT-26		46	167
RT-31		53	166

Fonte: SANTOS, (2012)

Adaptada: OLIVEIRA, (2014)

Tabela 6 - Especificações técnicas dos geotêxteis avaliados nos Leitos de Drenagem

Propriedades\Manta		RT-21	RT-26	RT-31
Propriedades Hidráulicas	Permissividade (s ⁻¹)	1,1	0,8	0,8
	Fluxo de água (L/min./m ²)	3.420	2.760	2.340
	Condutividade hidráulica (cm/s)	0,37	0,37	0,37
	Abertura aparente (O95) (mm) (peneira)	0,150 (100)	0,150 (100)	0,125 (100)
Propriedades Físicas	Matéria-prima e Tecnologia	100% poliéster-filamentos contínuos		
	Ponto de fusão (°C)	260	260	260

Fonte: BIDIM (2011).

Neste trabalho foi avaliada a Taxa de Aplicação de Sólidos (TAS) igual a 3,5 kg ST.m⁻², calculada conforme a Equação 01.

$$TAS = \frac{V \cdot ST}{Af}$$

Equação 01

Onde:

V = o volume de lodo em L (mistura, como já explicado),

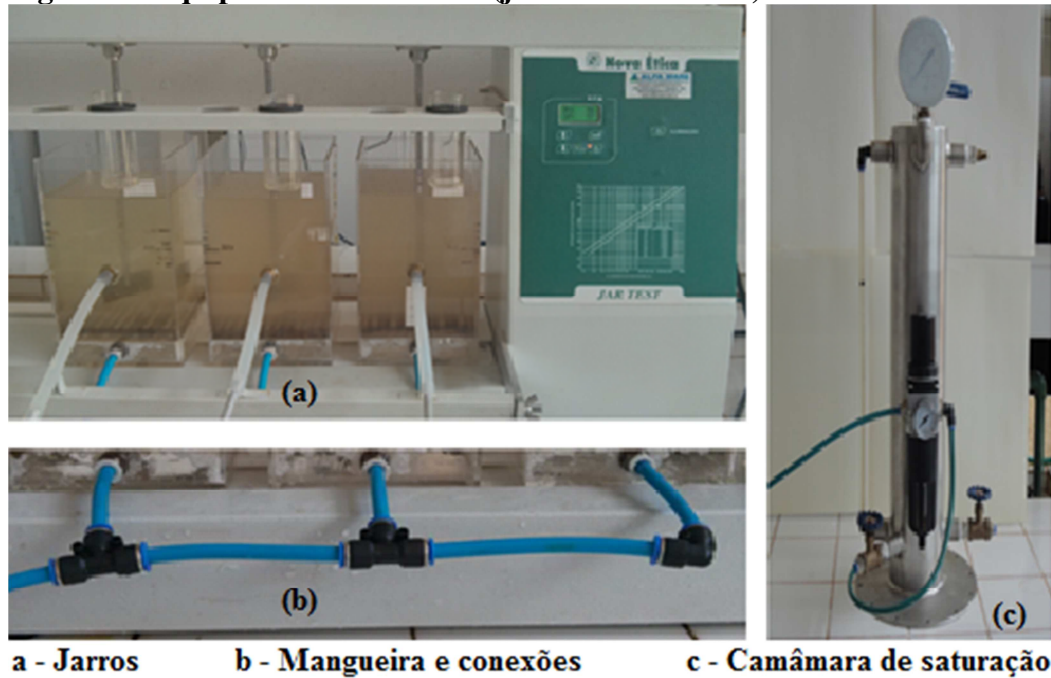
ST = concentração de sólidos totais do lodo (Kg/L) e

Af= área de fundo do leito de drenagem em m².

4.4.2 Equipamento de *floteste* (*jartest* modificado)

O equipamento *floteste* era constituído de uma câmara de pressurização, três jarros para coagulação-floculação-flotação e utilizava o mesmo conjunto agitador do *jartest*. Os jarros eram de acrílico transparente com as mesmas dimensões do jarro convencional do *jartest* (115x115mm²). A base de cada jarro era composta por duas placas de acrílico, espaçadas de 5 mm. Estes jarros foram acoplados ao *jartest* e conectados à câmara de pressurização por mangueiras interligadas com dois “tês”, um “joelho” e quatro registros, conforme ilustrado na Figura 3.

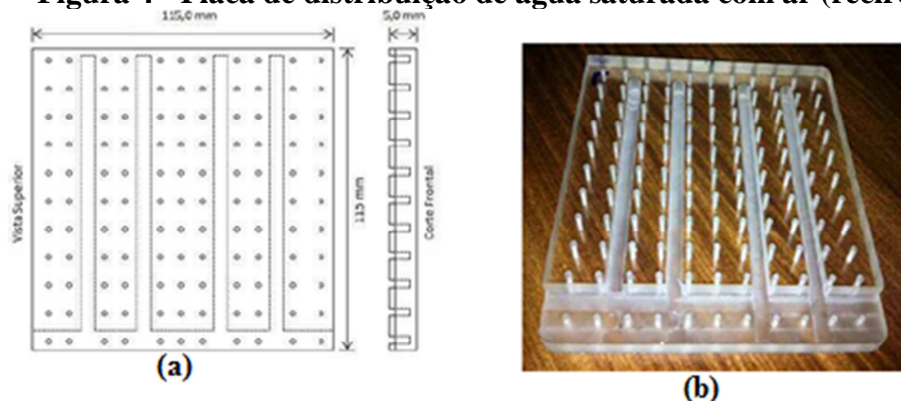
Figura 3 - Equipamento de floteste (jartest modificado)



Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

A placa inferior era constituída de canais para condução de água saturada com ar e tinham por objetivo distribuí-la com maior rapidez e de forma homogênea, preenchendo o espaço situado abaixo da placa superior. A placa superior continha orifícios de 2 mm de diâmetro, espaçados de 10 mm que proporcionavam perda de carga suficiente para tal distribuição. A base do jarro foi alterada de modo a permitir a introdução e distribuição uniforme de água saturada com ar conforme pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 - Placa de distribuição de água saturada com ar (recirculação)



a - Projecção da placa de acrílico b - Placa de acrílico confeccionada

Fonte: Adaptada de Thompson (2013)

A câmara de pressurização (Figura 5) era constituída de aço inox com diâmetro interno de 100 mm, espessura da parede de 4,5 mm, altura 400 mm e capacidade de 3,14 L de

água. Aparte superior da câmara era dotada de registro tipo esfera, válvula tipo agulha, manômetro, filtro de ar comprimido com manômetro. Já a base da câmara era constituída de dois registros de esfera com a função de ajustar a entrada de ar, saída de água saturada e uma válvula agulha para ajuste fino de transferência de água saturada com ar para os jarros.

Figura 5 - Câmara de saturação



Fonte: Elaborada pelo autor (2013)

4.4.3 Unidades de filtração e seleção dos meios filtrantes

Os filtros foram construídos com tubo de PVC rígido DN 25 (Figura 6), com diâmetro interno de 19 mm e um “cap” na parte inferior conectado a um espigão e mangueira para saída do líquido filtrado. O meio filtrante tinha espessura de 15 cm composto por areia. Cada filtro era composto por leito filtrante de granulometria diferente. Para evitar que a areia saísse pela parte inferior do filtro, foi utilizada uma tela com espessura da malha inferior a granulometria da areia. Para fixação dos filtros na bancada, foram utilizados dois “sargentos”, e um suporte de madeira onde cada tubo foi fixado. Na parte interior dos filtros foi fixada com cola uma camada de areia para evitar o surgimento de caminhos preferenciais, ou seja, que a água percolasse, preferencialmente, entre o meio filtrante e a parede interna do tubo de PVC.

O meio filtrante (areia), foi determinado seguindo modelo proposto por CENTURIONE e DI BERNARDO (2002). No trabalho em questão foram utilizadas três granulometrias: 0,42 mm, 0,84 mm e 1,19 mm, adotadas também neste trabalho. A cada início de ensaio a areia era lavada com água corrente utilizando-se uma peneira de granulometria de malha inferior, e ao final era repousada em água destilada.

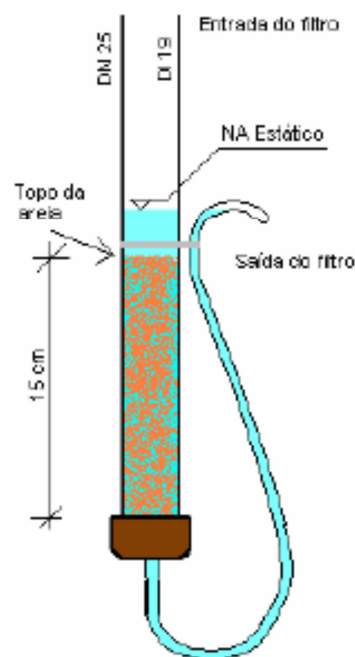
Figura 6 - Filtros de areia



Fonte: Elaborada pelo Autor (2013)

A areia era colocada no interior dos filtros utilizando um funil e água destilada. Para evitar a formação de vazios no interior dos filtros, era feita a compactação da areia batendo na parte inferior do filtro (cap) com um bastão de vidro. Este procedimento era realizado até que a espessura do meio filtrante atingisse 15 centímetros (Figura 7). A saída de água dos filtros era posicionada um pouco acima do topo do meio filtrante para que ficasse sempre submerso e fosse evitado o surgimento de pressões negativas em seu interior. Os três filtros foram fixados no suporte de madeira e presos na bancada com utilização dos “sargentos”, de forma que a entrada de cada um deles coincidisse com as saídas dos jarros. Na saída de cada filtro eram coletadas amostras e realizadas análises do pH, turbidez, cor verdadeira e cor aparente.

Figura 7 - Detalhes de construção dos filtros



Fonte: Di Bernardo (2002)

A Tabela 7 mostra a granulometria da areia em cada um dos filtros acoplados na sequência dos jarros do *floteste*.

Tabela 7 - Seleção dos meios filtrantes

	Filtro 01	Filtro 02	Filtro 03
Granulometrias dos meios filtrantes (mm)	0,42	0,84	1,19

Fonte: Elaborada pelo autor (2014)

4.5 Ensaios preliminares

4.5.1 Caracterização do lodo

Para a elaboração deste trabalho foram coletadas amostras do lodo dos decantadores e da água de lavagem dos filtros da Estação de Tratamento de Água Bom Jardim na cidade de Uberlândia-MG.

Após mistura do lodo do decantador com a água de lavagem dos filtros (pelas razões já descritas), foram realizadas análises para determinação dos parâmetros pH, cor verdadeira, turbidez, sólidos sedimentáveis e totais, Demanda Química de Oxigênio, Demanda Bioquímica de Oxigênio, Cobre, Ferro, Manganês, Níquel, Zinco, Alumínio, Chumbo e Cromo e *Escherichia coli* e Ovos de helmintos. Todas as análises para caracterização do lodo foram realizadas em laboratório credenciado e externo à Universidade Federal de Uberlândia.

4.5.2 Caracterização do drenado

Os drenados das mantas RT-21, RT-26 e RT-31, foram caracterizados quanto às suas características pH, Turbidez, Cor Verdadeira, Cor Aparente, Alumínio e Ferro. As análises desses dois últimos, foram realizadas em laboratório credenciado e externo à Universidade Federal de Uberlândia.

4.6 ETAPAI – Ensaios sem adição de agente coagulante

Após homogeneização da mistura do lodo do decantador com a água de lavagem dos filtros, para uma taxa de aplicação de sólidos de 3,5 kg ST.m⁻² foram adicionados em cada

protótipo do leito de drenagem, um volume de 4,7 L da mistura de lodo com concentração de sólidos totais igual a $0.013066 \text{ kg.L}^{-1}$, sabendo que a área de fundo do protótipo do LD era $0,017671 \text{ m}^2$. A taxa de aplicação de sólidos supracitada foi fixada para todos os experimentos. O Apêndice 1 ilustra um fluxograma contendo um resumo de todos os ensaios realizados com a unidade de leito de drenagem, flotação por ar dissolvido e filtração.

São descritos a seguir os procedimentos experimentais para tratamento dos efluentes de cada um dos leitos de drenagem compostos com diferentes mantas geotêxteis.

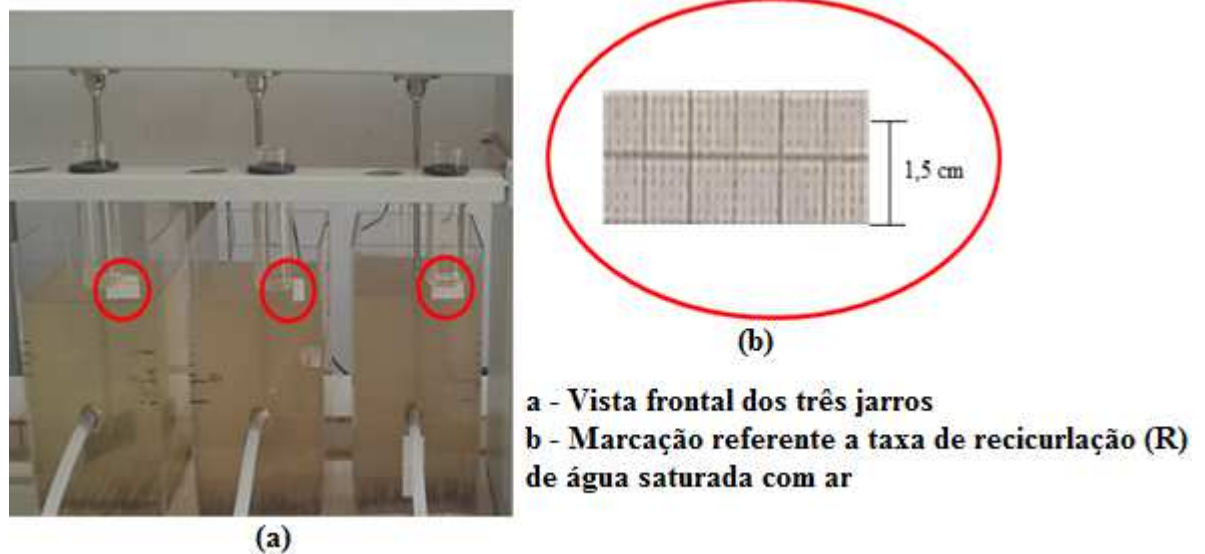
4.6.1 Manta RT-21

Após passagem da água do lodo pelo leito de drenagem composto com a manta RT-21 eram adicionados 2 litros do drenado em cada um dos três jarros do *floteste* para início do processo de FAD. Depois de transcorridos os tempos de mistura rápida e mistura lenta (floculação) a água saturada com ar (oriunda da câmara de saturação) era encaminhada para cada um dos jarros. Conhecendo-se o volume de água em cada jarro (2L) e estabelecendo-se uma taxa de recirculação pressurizada (R) de 10%, foi possível calcular o volume adicional de água saturada (200 mL), que entraria em cada jarro. A partir deste volume e da área de cada jarro, aplicou-se a equação 02 e obteve-se a altura de água correspondente (1,5 cm). Esta altura foi marcada na parte frontal de cada jarro, acima do nível de água e quando a água chegava neste nível era fechado o registro que permitia entrada de água saturada, conforme pode ser identificado na Figura 8.

$$h_{R-10\%} = \frac{\text{Volume Adicional (mL)}}{A_j (\text{mm}^2)}$$

Equação 02

Figura 8 - Identificação de altura correspondente à taxa de recirculação (R) na parte frontal dos jarros



Fonte: Elaborada pelo autor (2013).

Na sequência o procedimento era como descrito:

➤ **Configuração e manuseio do Jarreste:**

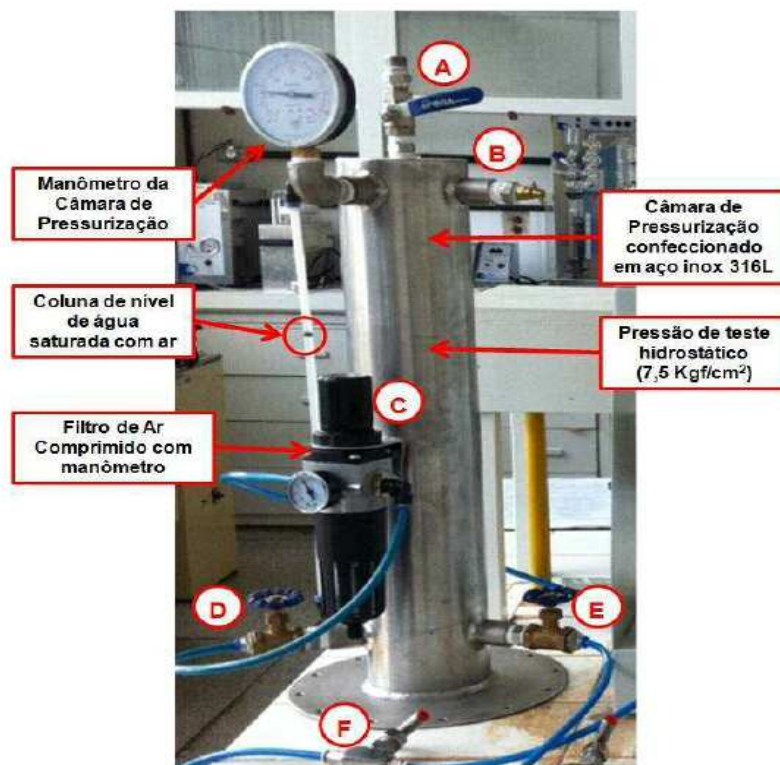
- Ajuste do gradiente de mistura rápida (G_{mr}) de $1.000\ s^{-1}$, com velocidade de mistura rápida de 500 RPM, durante um tempo de 10 segundos;
- Ajuste do gradiente médio de velocidade de floculação (G_f) de $25\ s^{-1}$, com velocidade de floculação de 35 RPM durante um tempo de 10 minutos;
- Retirada dos agitadores do *jarreste* de dentro dos jarros.

➤ **Configuração e manuseio da Câmara de Pressurização (Figura 9):**

- Fechava-se os registros ((D), (E) e (F));
- Adicionava-se água clarificada no registro (A) com a válvula (B) aberta;
- Após o nível de água ser atingido fechava-se os registros (A) e (B);
- Abria-se o registro (D);
- Ajustava-se a pressão desejada na câmara (400 kPa) girando cuidadosamente a válvula (B);
- Pressurizava-se a câmara por um tempo de saturação (T_{sat}) de 10 minutos com pressão de saturação (P) de 400 kPa;
- Ao término do tempo desejado fechava-se simultaneamente os registros (B) e (D);
- Abria-se cuidadosamente o registro (E);

- Abria-se o registro (F) e efetuava-se a injeção de água saturada até a marca da altura $h_{R=10\%} = 1,5$ cm, marcada na parte frontal do jarro (Figura 8).

Figura 9 - Utilização e manuseio da câmara de saturação



Fonte: Elaborada pelo autor (2013)

➤ **Configuração e manuseio da flotação:**

- Ao término da introdução de água saturada eram aguardados 36 segundos (0,6 min) para coleta das amostras de água flotada e posterior encaminhamento para os filtros. Neste trabalho foi avaliada velocidade de flotação de 10 cm/min. Como a distância do ponto de introdução de água saturada e o ponto de coleta era de 6 cm, era necessário aguardar 36 segundos (para coleta de água flotada) a partir do fechamento do registro de entrada de forma a atender a taxa supracitada. Transcorrido o tempo, após descarte da amostra durante 2 segundos (para remover a água da mangueira de coleta), eram coletados 50 mL de amostra na saída de cada jarro. Eram analisados os parâmetros pH, turbidez, cor verdadeira e aparente.

➤ **Configuração e manuseio dos filtros:**

- Após transcorrida a fase de flotação, o efluente de cada jarro era encaminhado para cada um dos filtros. Enquanto a filtração acontecia, era monitorada continuamente a vazão de água

filtrada, ajustando-se a posição do suporte de saída de modo que a taxa de filtração ficasse constante ao longo do tempo. Após descartar a amostra, durante um tempo de 2 segundos, coletava-se 50 mL de amostra nas saídas de cada filtro e analisava-se os parâmetros pH, turbidez, cor verdadeira e cor aparente.

4.6.2 Manta RT-26

Para este ensaio, foram utilizados os mesmos procedimentos descritos na seção 4.6.1, mudando-se apenas o drenado, agora referente à manta RT-26.

4.6.3 Manta RT-31

Para este ensaio, foram utilizados os mesmos procedimentos descritos na seção 4.6.1, mudando-se apenas o drenado, agora referente à manta RT-31.

4.7 ETAPAI – Ensaios com adição de agente coagulante

Nesta etapa foram utilizados os mesmos procedimentos metodológicos descritos no item 4.6. A diferença básica é que nestes ensaios foi dosado sulfato de alumínio como agente coagulante externo na FAD, nos processos de coagulação/floculação. Foram testadas três dosagens de sulfato de alumínio (5, 10 e 15 mg/L). Para adequação do pH de coagulação foram utilizadas soluções de ácido clorídrico quando necessário. O Apêndice 2 apresenta um resumo de todos os ensaios realizados com a unidade de leito de drenagem, flotação por ar dissolvido e filtração, utilizando-se o sulfato de alumínio como coagulante.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item são apresentados e discutidos os resultados das análises e ensaios realizados no desenvolvimento deste trabalho, de forma a avaliar a eficiência do sistema composto por leito de drenagem, flotação por ar dissolvido e filtração.

5.1 Ensaios preliminares

5.1.1 Caracterização do lodo

A mistura do lodo do decantador com a água de lavagem dos filtros da ETA Bom Jardim foi avaliada quanto aos seus parâmetros físicos, químicos e biológicos. Os parâmetros físicos e seus respectivos valores podem ser observados na Tabela 8, que traz também os valores de referência previstos nas resoluções CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005 e COPAM/CERH nº 01, de 05 de maio de 2008. Já as Tabelas 9 e 10 trazem os valores dos parâmetros químicos e biológicos, respectivamente.

Tabela 8 - Parâmetros físicos da mistura do lodo do decantador com água de lavagem dos filtros

<i>Parâmetros Físicos</i>	<i>Lodo Decantador/Água lavagem dos filtros</i>	<i>Unidades</i>	<i>CONAMA Nº 357(2005)</i>	<i>COPAM/CERH Nº 01(2008)</i>
pH	6,72	----	5 a 9	6 a 9
Turbidez	6.666	UNT	100	--
Cor Verdadeira	30,0	UC	75	--
<i>SD</i>	347,0	mL/L	--	--
<i>ST</i>	13.066	mg/L	500*	100**

SD = Sólidos Sedimentáveis

ST = Sólidos Totais

(*) = Dissolvidos

(**) = Suspensão

Fonte: Elaborada pelo autor (2014)

Tabela 9 - Parâmetros químicos da mistura do lodo do decantador com a água de lavagem dos filtros

<i>Parâmetros Químicos</i>	<i>Lodo Decantador/Água lavagem dos filtros</i>	<i>Unidade</i>	<i>CONAMA 430 (2011)</i>	<i>COPAM/CERH (2008)</i>
DBO	233,33	mg/L	5	60
BQO	557,70	mg/L	--	180
Cobre Total	0,3	mg/L	1,0	1,0
Ferro Total	246,40	mg/L	15,0	15,0
Manganês Total	25,16	mg/L	1,0	1,0
Níquel Total	< 0,05	mg/L	2,0	1,0
Zinco Total	0,40	mg/L	5,0	5,0
Alumínio Total	615,40	mg/L	0,1	0,1
Chumbo Total	0,07	mg/L	0,5	0,1
Cromo Total	0,56	mg/L	0,1	0,5

Fonte: Elaborada pelo autor (2014)**Tabela 10 - Parâmetros biológicos da mistura do lodo do decantador com a água de lavagem dos filtros**

<i>Parâmetros Biológicos</i>	<i>Lodo Decantador/Água lavagem dos filtros</i>	<i>Unidade</i>	<i>CONAMA 430 (2011)</i>	<i>COPAM/CERH (2008)</i>
<i>Escherichia coli</i>	100	NMP/100 mL	--	--
<i>Ovos de helmintos</i>	* Presença	----	--	--

* Presença de Ovos de *Ancilostomidae* e cistos de *Balantidium coli***Fonte: Elaborada pelo autor (2014)**

A análise dos valores dos parâmetros nas tabelas supracitadas permite perceber que de acordo com as legislações federais e estaduais, amparadas pelas leis 13.199 (1999) e 9.433 (1997), esse resíduo não pode ser lançado diretamente nos corpos d'água, haja vista que os valores encontrados estão bem acima do que é permitido por lei. Além disso, esta prática é proibida no Brasil. O seu lançamento *in natura* em um manancial qualquer pode trazer sérios danos ambientais e à saúde humana e de animais que dependem deste corpo hídrico.

A comparação destes números reforça ainda mais a importância do desenvolvimento de técnicas de tratamento dos resíduos gerados em ETAs considerando-se também que a lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1.998 traz em seu Art. 54 parágrafo 2º inciso V, que o lançamento deste tipo de resíduo em curso de água é considerado crime ambiental.

A construção e aplicação de sistemas como o proposto neste trabalho, torna-se de suma importância. Ressalta-se que são diversas as técnicas utilizadas no gerenciamento deste

tipo de resíduo, uma delas é o retorno, para o próprio sistema, do lodo gerado. Entretanto, existem limites para o retorno de lodo em função, principalmente, da segurança sanitária. Além disso, pode ocorrer a situação em que o volume de lodo seja superior ao máximo retorno permitido em termos técnicos, ressalta-se, mais uma vez, a importância da introdução de um sistema independente que é o caso deste trabalho.

5.1.2 Caracterização do drenado

Os drenados dos três leitos de drenagem foram caracterizados quanto as suas características físicas. Os resultados destas análises podem ser observados na Tabela 11.

Tabela 11 - Características físicas do drenado dos três leitos de drenagem

<i>Mantas</i>	<i>Parâmetros</i>	<i>Resultados</i>	<i>Unidades</i>
RT-21	pH	7,8	---
	Turbidez	72	UNT
	Cor Verdadeira	42	UC
	Cor Aparente	250	UC
RT-26	pH	7,9	---
	Turbidez	125	UNT
	Cor Verdadeira	29	UC
	Cor Aparente	281	UC
RT-31	pH	7, 8	---
	Turbidez	132	UNT
	Cor Verdadeira	49	UC
	Cor Aparente	307	UC

Fonte: Elaborada pelo autor (2014)

Esta caracterização teve por objetivo avaliar a eficiência dos leitos de drenagem quando comparados aos valores encontrados na Tabela 8 da seção 5.1.1. Os valores de turbidez para as três mantas avaliadas mostraram redução significativa, 99%, 98% e 98% respectivamente. Isto mostra que os LD foram extremamente eficientes na redução de turbidez. O mesmo não pôde ser observado para cor verdadeira, cujos valores permaneceram praticamente inalterados. Isto pode ser explicado pelo fato de não ter havido precipitação química na passagem da água do lodo pelos LD uma vez que este processo ocorreu anteriormente, na origem do lodo. Esta explicação é válida visto que a cor verdadeira expressa a presença de substâncias dissolvidas, com a amostra isenta de partículas em suspensão.

O drenado da manta RT-21 foi o que apresentou menores valores de cor aparente e turbidez, por conseguinte, o LD equipado com esta manta geotêxtil foi o que apresentou maior concentração de sólidos totais retidos no seu interior.

5.2 ETAPA I – Ensaios sem adição de agente coagulante

Neste item são demonstrados e discutidos os resultados encontrados no sistema constituídos por leito de drenagem, flotação por ar dissolvido e filtração sem adição de agente coagulante na unidade de FAD.

5.2.1 Manta RT-21

Para análise da qualidade da água da unidade de FAD foram coletados amostras nas saídas dos jarros (FAD) e foram analisados os parâmetros físicos cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH. Os resultados destas análises podem ser observados na Tabela 12. Nas saídas dos filtros foram coletadas amostras e analisados os parâmetros físicos como ilustra a Tabela 13.

O Gráfico 1 demonstra a variação dos parâmetros analisados para o drenado após passagem pela unidade de FAD e pelo Filtro 01. Os valores de cor aparente e turbidez tiveram uma redução significativa quando comparados os três processos, o que demonstra a grande eficiência do sistema. É possível observar o importante papel do filtro na retenção de impurezas. Apesar de não ser possível a reprodução do que acontece em sistemas reais é possível inferir que é imprescindível esta etapa na sequência de tratamento. Os valores de cor verdadeira tanto na saída da FAD como na saída do Filtro 01 mantiveram-se constantes, ou seja, as substâncias dissolvidas que conferem cor não foram retidas. De fato, estas substâncias seriam removidas se adsorvidas pelo meio filtrante ou se precipitadas e retidas, situações não observadas.

Tabela 12 - Parâmetros analisados nas saídas dos jarros - Manta RT-21

<i>Parâmetros</i>	<i>JARROS 01, 02 e 03</i>
Cor Aparente (UC)	77
Cor Verdadeira (UC)	17
Turbidez (UNT)	33
pH	7,6

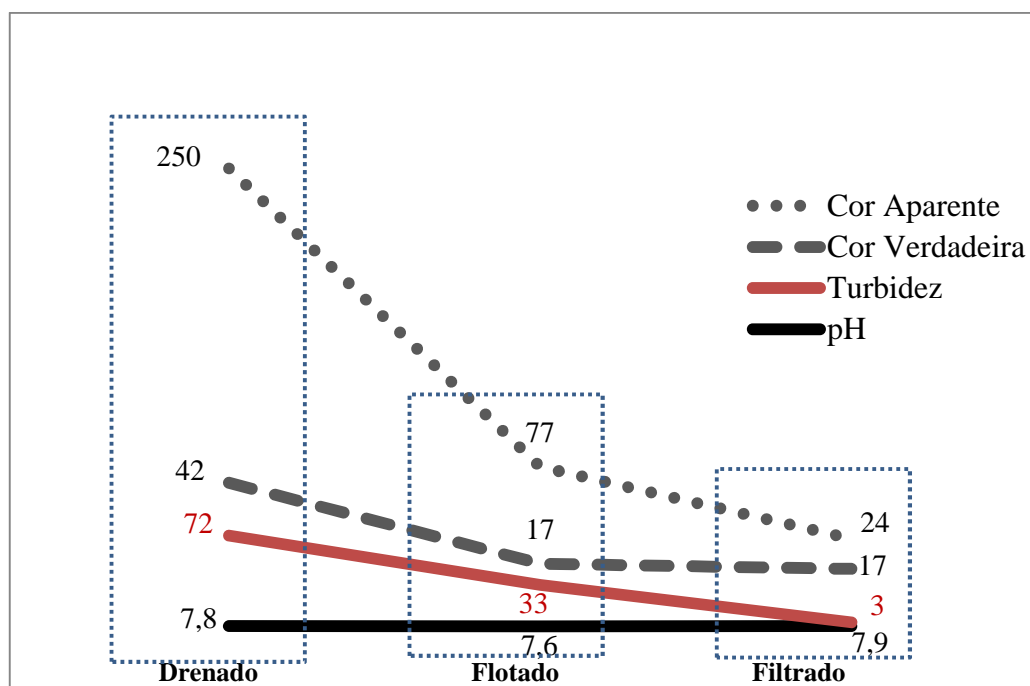
Fonte: Elaborada pelo autor (2014)

Tabela 13 - Parâmetros analisados nas saídas dos filtros - Manta RT-21

<i>Parâmetros</i>	<i>Filtro 01</i>	<i>Filtro 02</i>	<i>Filtro 03</i>
Cor Aparente (UC)	24	24	26
Cor Verdadeira (UC)	17	17	17
Turbidez (UNT)	3	3	5
pH	7,9	8,2	7,9

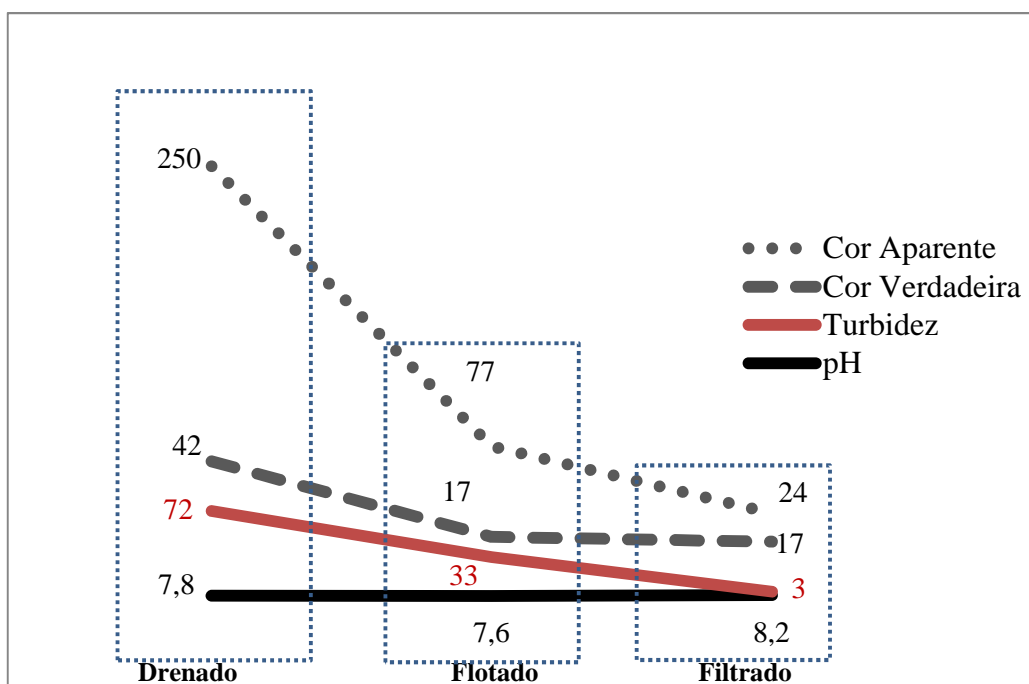
Fonte: Elaborada pelo autor (2014)

Gráfico 1 – Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-21, efluente da FAD e efluente do Filtro 01



Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

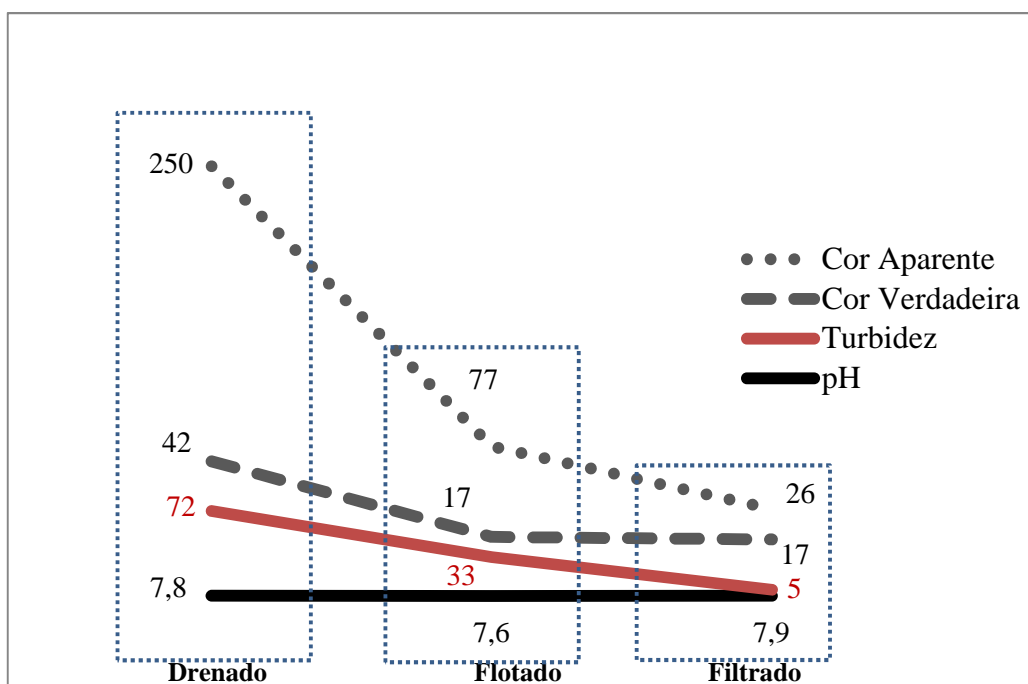
Gráfico 2 – Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-21, efluente da FAD e efluente do Filtro 02



Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

O Gráfico 2 ilustra quão significativa é a redução de cor aparente e turbidez do drenado após passagem pela FAD e pelo Filtro 2. A eficiência de remoção de 90% de cor aparente, 96% de turbidez e de 59,5% de cor verdadeira mostra que o sistema pode ser utilizado para tratamento deste tipo de água. Além disso, o filtro foi capaz de reter 68,8% de cor aparente e 90,9% de turbidez o que indica que o meio filtrante utilizado foi adequado. Percebe-se que, mesmo sem utilização de agente coagulante externo na FAD, o sistema mostrou-se robusto e que, para usos menos restritivos, a água resultante pode ser utilizada sem muitas ressalvas.

Gráfico 3 – Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-21, efluente da FAD e efluente do Filtro 03



Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

O Filtro 03, embora tenha demonstrado bastante eficiência de remoção de cor verdadeira e turbidez em relação à FAD (66% e 84,8%, respectivamente) como ilustra o Gráfico 3, foi o que apresentou os piores resultados quando confrontados com os valores encontrados nos Filtros 01 e 02. O meio filtrante utilizado neste filtro (areia com 1,19 mm de diâmetro), por ser composto de areia de maior tamanho que os demais, pode ter facilitado a passagem de partículas em suspensão. De maneira geral observa-se que o efluente final gerado é de muito boa qualidade para qualquer um dos três filtros utilizados. Como será mostrado na Etapa II deste trabalho em que o sistema é verificado com utilização de agente coagulante na FAD, o efluente, em termos de turbidez e cor atende aos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria 2.914 do Ministério da Saúde.

5.2.2 Manta RT-26

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos dos parâmetros físicos cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH, das amostras coletadas após as unidade FAD e Filtração. Os resultados destas análises podem ser observados nas Tabelas 14 e 15.

Tabela 14 – Parâmetros analisados nas saídas dos jarros - RT-26

<i>Parâmetros</i>	<i>JARROS 01, 02 e 03</i>
Cor Aparente (UC)	42
Cor Verdadeira (UC)	17
Turbidez (UNT)	16
pH	7,9

Fonte: Elaborada pelo autor (2014)

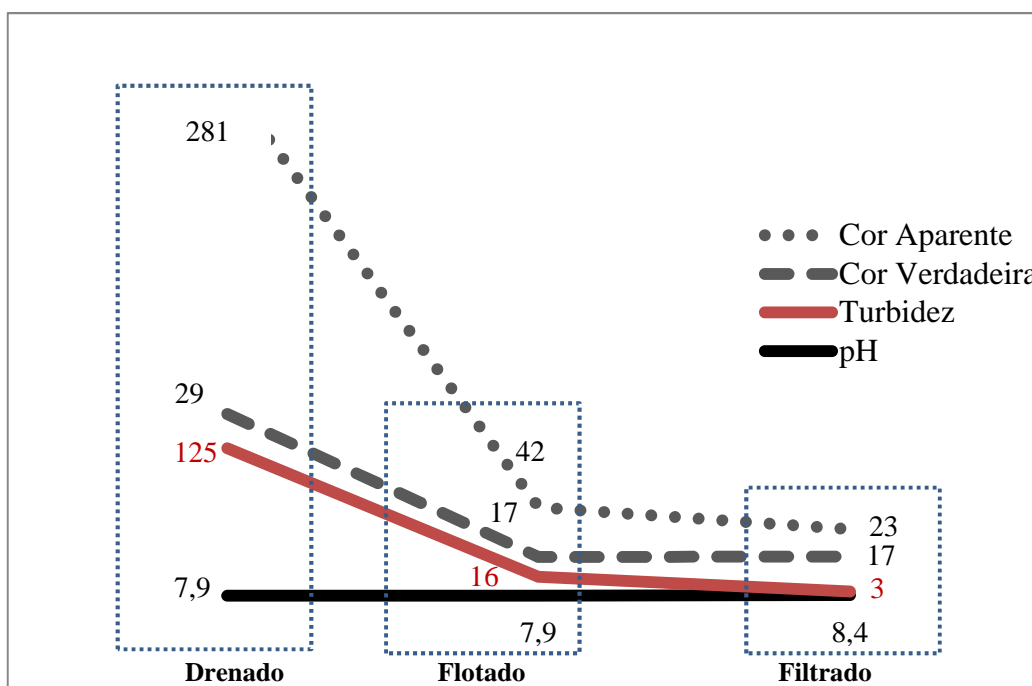
Tabela 15 - Parâmetros analisados nas saídas dos filtros - Manta RT-26

<i>Parâmetros</i>	<i>Filtro 01</i>	<i>Filtro 02</i>	<i>Filtro 03</i>
Cor Aparente (UC)	23	24	26
Cor Verdadeira (UC)	17	17	17
Turbidez (UNT)	3	5	6
pH	8,4	8,2	8,3

Fonte: Elaborada pelo autor (2014)

O Gráfico 4 ilustra a eficiência da FAD quanto aos parâmetros cor aparente e turbidez. Verifica-se a remoção de 85% de cor aparente, e remoção de 87% da parcela de sólidos suspensos presentes nas amostras, que é representada pela significativa queda da turbidez. Mesmo sem a adição de agente coagulante nesta fase, verifica-se uma excelente eficiência da FAD na remoção desses sólidos, pela efetiva formação de flocos dentro dos jarros e posterior formação do agregado microbolha/floco em função da recirculação de água saturada com ar. Nesta fase, a cor verdadeira, representada pela parcela de sólidos dissolvidos sofreu uma redução de 41% e a cor aparente redução de 85%. Os valores dos parâmetros medidos para o drenado, para o efluente da FAD são reproduzidos nos Gráficos 4 e 5. Optou-se por esta forma de apresentação para facilitar a visualização da troca do leito filtrante (diferente para cada um dos três filtros) e sua influência na qualidade final da água produzida no sistema.

Gráfico 4 – Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-26, efluente da FAD e efluente do Filtro 01

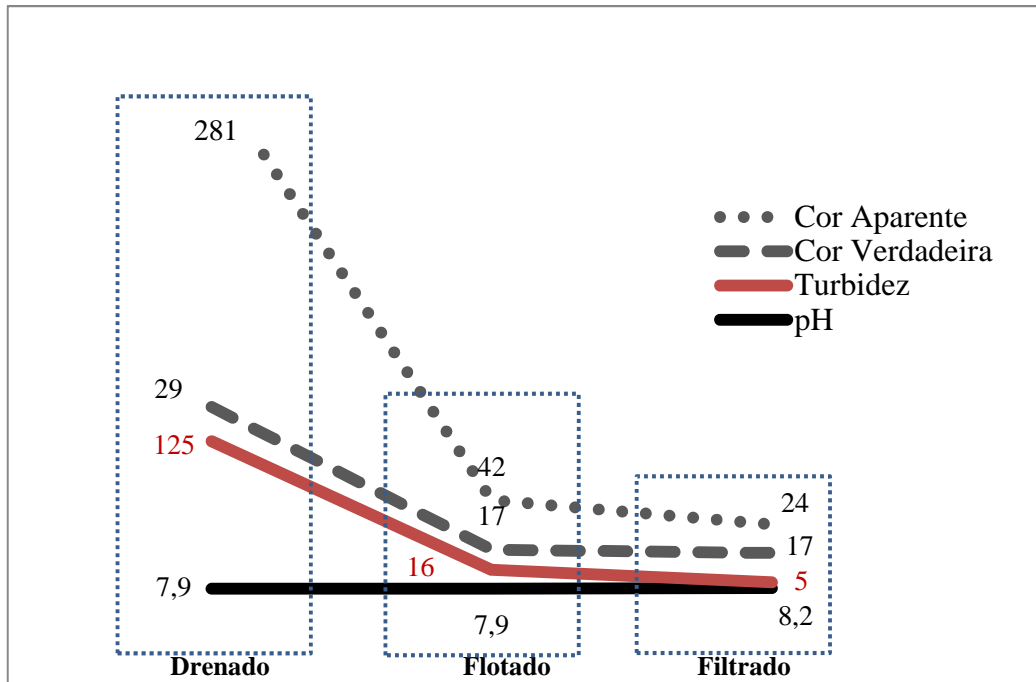


Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Os resultados encontrados a partir da análise do efluente do Filtro 01 demonstraram eficiência global na remoção de 91% de cor aparente, 41% de cor verdadeira e 97% de turbidez. O meio filtrante utilizado (areia com granulometria de 0,42 mm) removeu parcela significativa de sólidos suspensos presentes no efluente da FAD. Segundo Sperling (2014), valores de turbidez da água bruta inferior a 20 UNT dispensam a coagulação química em seu tratamento, podendo ser utilizada para tratá-la apenas a filtração lenta. Neste contexto, e considerando-se apenas o parâmetro turbidez, o efluente da FAD poderia ser tratado apenas por uma unidade sequencial de filtração lenta.

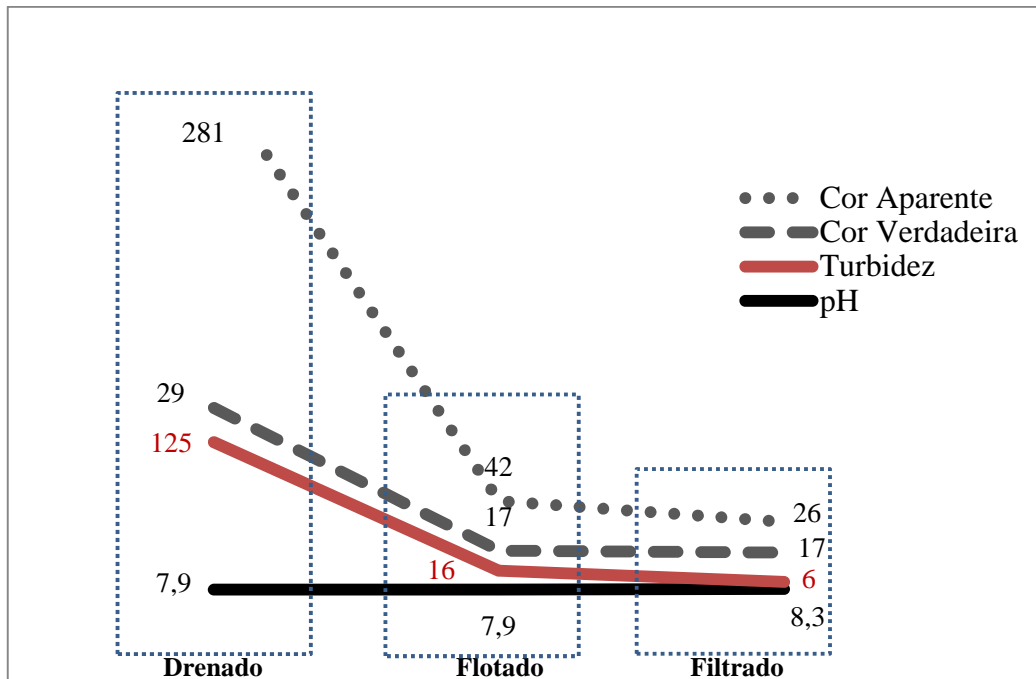
A partir dos resultados obtidos foi possível verificar a robustez da FAD que, mesmo sem adição de qualquer agente coagulante externo foi suficiente para produzir efluente de muito boa qualidade se comparado à qualidade do drenado. Observa-se que a inclusão dos filtros proporcionou um polimento final no efluente.

Gráfico 5 – Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-26, efluente da FAD e efluente do Filtro 02



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Gráfico 6 – Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-26, efluente da FAD e efluente do Filtro 03



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

A cor aparente, após a unidade de Filtração, sofreu redução de mais de 90% tanto no Filtro 02 como no Filtro 03. Isto explica a eficiência dos meios filtrantes utilizados nos dois filtros, quanto a retenção de partículas de sólidos presentes na amostra antes da filtração. É possível observar pouca diferença entre as eficiências de remoção verificadas. A cor verdadeira permaneceu invariável, ou seja, não houve remoção, nos filtros, das substâncias que conferiam esta característica no efluente. Em outras palavras, como a cor verdadeira é predominantemente provocada pela presença de substâncias dissolvidas, e, como não houve adição de qualquer agente coagulante externo, não houve sua precipitação e, portanto, seu valor não foi reduzido. Os valores do pH apresentaram pequena oscilação com as amostras coletadas nas saídas dos três filtros. Esta variação não alterou o desempenho do sistema de tratamento da água, aqui utilizado.

5.2.3 Manta RT-31

As análises para avaliação do drenado foram conduzidas em amostras coletadas nas saídas dos jarros e filtros. Estas amostras foram analisadas quanto aos seus parâmetros físicos cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH, conforme podem ser observados seus resultados nas Tabelas 16 e 17.

Os resultados comprovaram que com a utilização da manta RT-31 foram observados os maiores valores de turbidez e cor aparente tanto após a unidade de FAD, como após a unidade de filtração. A deficiência de retenção de sólidos suspensos e dissolvidos nos LD e/ou a pouca eficiência de formação de flocos na unidade de FAD podem ter contribuído para esta queda de eficiência.

O Gráfico 7 ilustra os valores dos parâmetros medidos para o drenado, efluentes da FAD e do Filtro 01. Verifica-se que houve a remoção de 45% de cor aparente nas saídas dos jarros e que 74% de sólidos ficaram retidos no meio filtrante utilizado no Filtro 01. Já o grau de interferência quanto à passagem da luz nas amostras coletadas nas saídas dos jarros e do filtro, tiveram eficiência de 34% e 78%, respectivamente. A cor verdadeira nas amostras coletadas nas saídas dos jarros reduziu 65%. Esta remoção permaneceu constante quando comparados os resultados das análises conduzidas com as amostras coletadas nas saídas dos jarros com os resultados das análises conduzidas com as amostras coletadas na saída do filtro.

Tabela 16 - Parâmetros analisados nas saídas dos jarros - Manta RT-31

<i>Parâmetros</i>	<i>JARROS 01, 02 e 03</i>
Cor Aparente (UC)	166
Cor Verdadeira (UC)	17
Turbidez (UNT)	87
pH	8,4

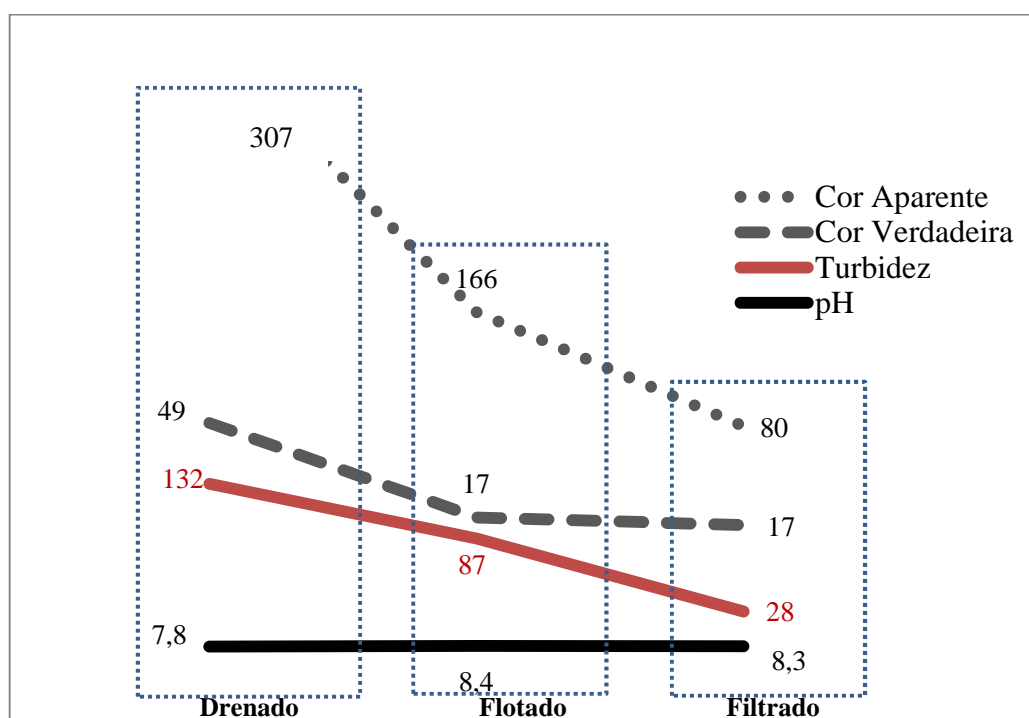
Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Tabela 17 - Parâmetros analisados nas saídas dos filtros - Manta RT-31

<i>Parâmetros</i>	<i>Filtro 01</i>	<i>Filtro 02</i>	<i>Filtro 03</i>
Cor Aparente (UC)	80	81	82
Cor Verdadeira (UC)	17	17	17
Turbidez (UNT)	28	22	20
pH	8,3	8,3	8,5

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Gráfico 7 – Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-31, efluente da FAD e efluente do Filtro 01

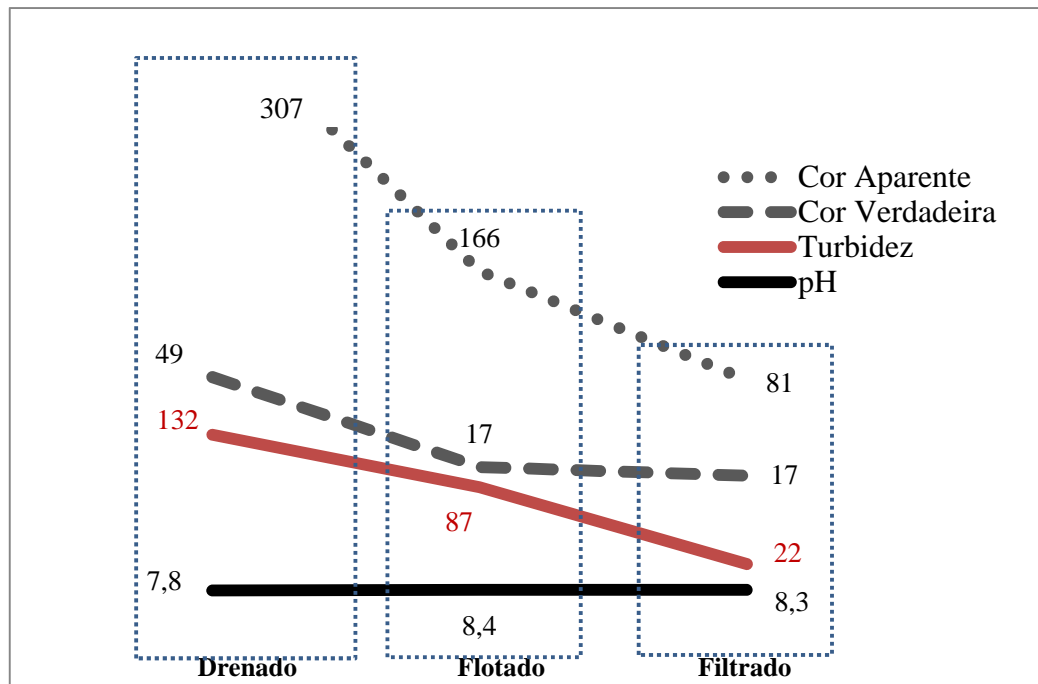


Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Nos Gráficos 8 e 9, os valores encontrados de cor aparente e turbidez nas saídas dos Filtros 02 e 03, são quase imperceptíveis a variação na remoção de cor aparente nas amostras coletadas.

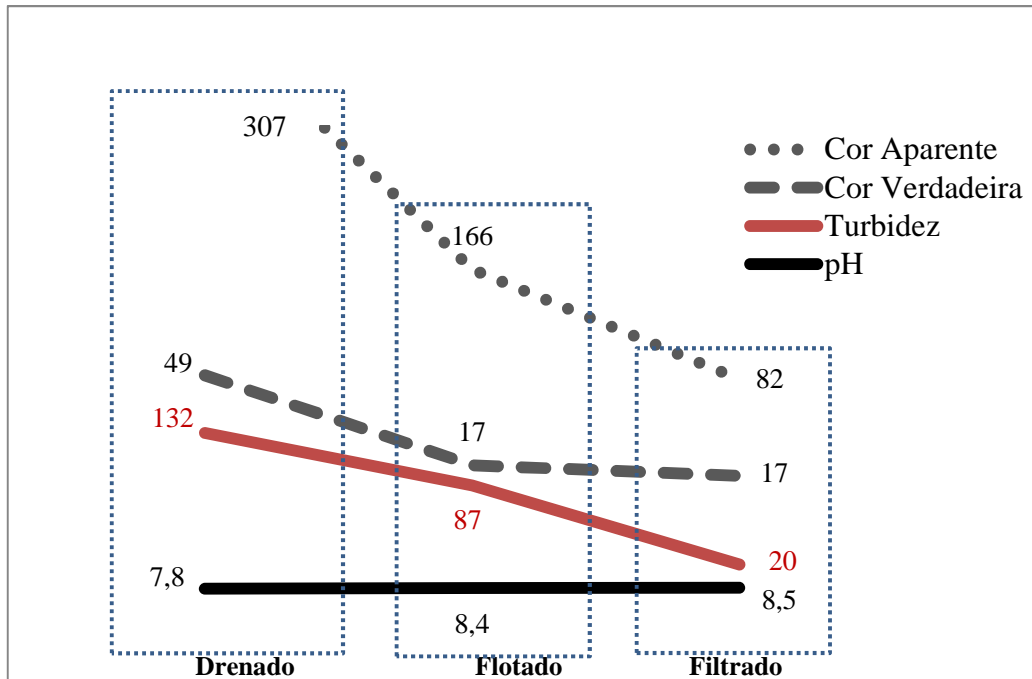
Quando comparados os resultados das análises de cor aparente e cor verdadeira das amostras coletadas nas saídas dos jarros, verifica-se uma remoção superior a 10%. Já os resultados das amostras coletadas nas saídas dos três filtros demonstraram remoção de pouco mais de 21%, destes dois parâmetros.

Gráfico 8 – Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-31, efluente da FAD e efluente do Filtro 02



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Gráfico 9 – Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-31, efluente da FAD e efluente do Filtro 03



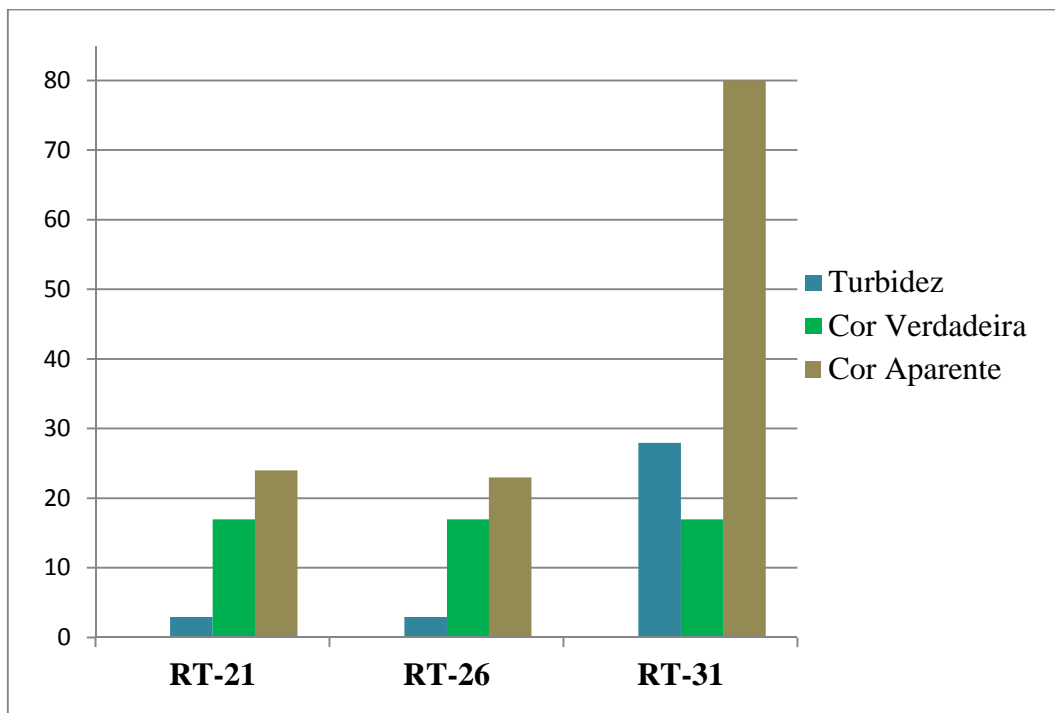
Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Os Gráficos 10, 11 e 12 mostram a eficiência dos Filtros 01, 02 e 03 instalados após a unidade de FAD submetida aos drenados dos LD constituídos pelas mantas RT-21, RT-26 e RT-31.

Percebe-se ao longo do sistema composto por LD-FAD-Filtro 01, que o resultado cor aparente, quando utilizado no sistema o drenado na manta geotêxtil RT-31, foi o que se manteve mais elevado com remoção de 73,9% deste parâmetro. Porém, quando utilizados no sistema os drenados das mantas geotêxtis RT-21 e RT-26, a remoção foi 90,4% e 91,8%, respectivamente. Ao longo do sistema os resultados referentes à turbidez para o drenado das três mantas trabalhadas (RT-21, RT-26, RT31), foi 89,6% de redução (média aritmética).

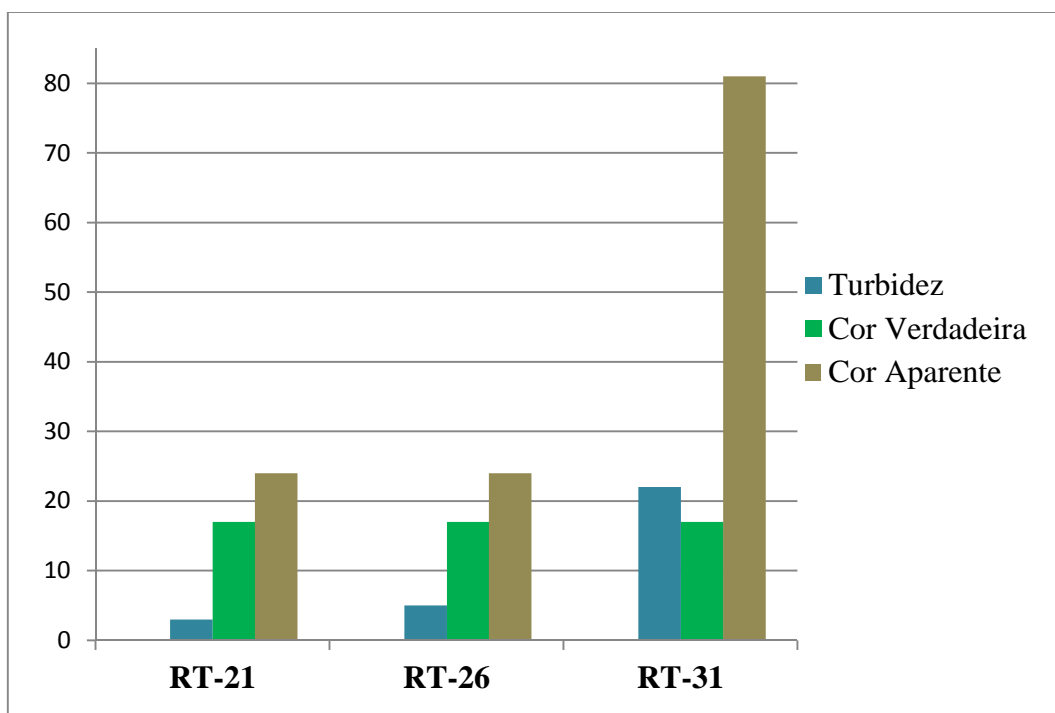
No sistema composto por LD-FAD-Filtro 02, a remoção de turbidez foi 90,4% (Manta RT-21), 91,4% (Manta RT-26) e 73,6% (Manta RT-31). Na mesma sequência, temos remoção de 95,8%, 96,0% e 83,3% de cor aparente. Observa-se melhor retenção de partículas em suspensão ao longo do sistema, quando utilizados os drenados das mantas RT-21 e RT-26, nas unidades sequenciais FAD e Filtração e, conseqüentemente queda no valor de turbidez e cor aparente.

Gráfico 10 - Eficiência de remoção de turbidez, cor verdadeira e cor aparente do sistema composto por LD (mantas RT-21, RT-26, RT-31), FAD e Filtro 01



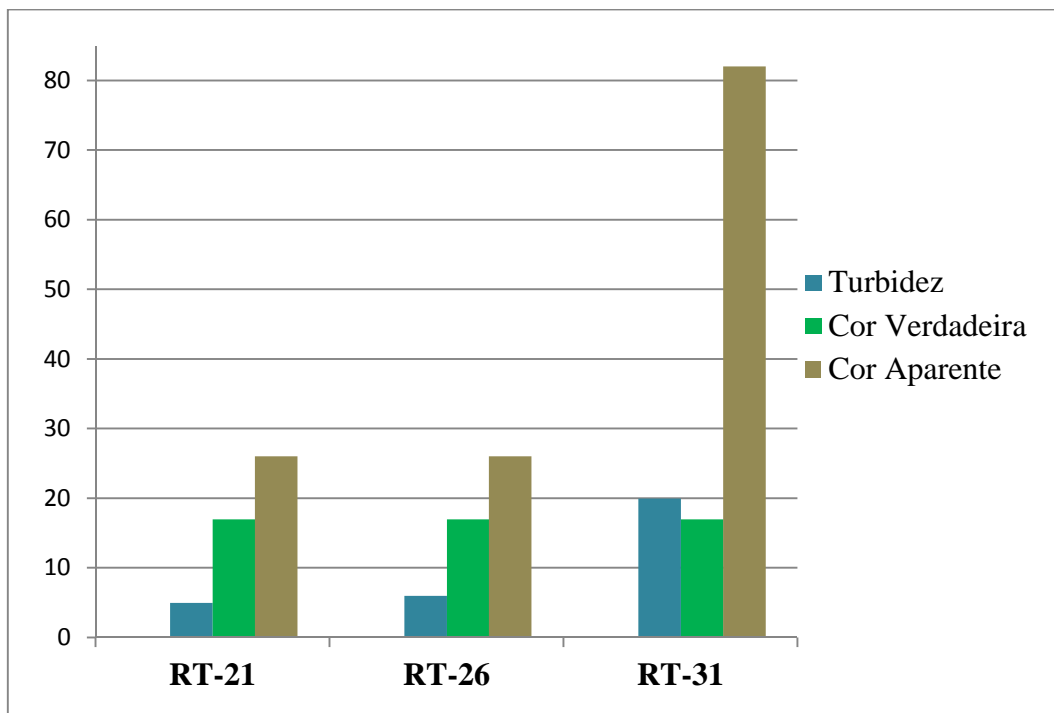
Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

Gráfico 11 - Eficiência de remoção de turbidez, cor verdadeira e cor aparente do sistema composto por LD (mantas RT-21, RT-26, RT-31), FAD e Filtro 02



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Gráfico 12 - Eficiência de remoção de turbidez, cor verdadeira e cor aparente do sistema composto por LD (mantas RT-21, RT-26, RT-31), FAD e Filtro 03



Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

Os resultados de cor aparente e turbidez, em todo o sistema composto por LD-FAD-Filtro 03, submetidos na unidade de FAD os drenados das mantas RT-21, RT-26 e RT-31, demonstraram remoção de 84,1% e 90,6%, respectivamente. Quando comparados os valores de cor aparente e turbidez encontrados nessa unidade de filtração (Filtro 03) com as demais unidades de filtração utilizadas nesse trabalho (Filtros 01 e 02), verifica-se uma menor remoção de sólidos suspensos que passaram da unidade de FAD para os filtros. Tal fato se justifica pelo fato do meio filtrante utilizado no Filtro 03 ser constituído por areia de granulometria 1,19 mm, tamanho este superior aos utilizados nos demais filtros.

A cor verdadeira em todos os ensaios realizados nesta etapa, tanto nas análises das amostras coletas após a unidade de FAD, como nas amostras coletadas após a unidade de filtração ficaram em 17 UC. Sabendo que as águas do manancial de abastecimento da cidade de Uberlândia são classificadas como classe II e que a resolução CONAMA nº 357/2005 impõe que águas de classe 2 deve possuir limite máximo de cor verdadeira até 75 UC, o valor encontrado nas análises também é considerado favorável e, demonstra o quão o sistema aqui utilizado é eficiente.

Em todos os ensaios realizados nesta etapa os valores de pH oscilaram entre 7,6 e 8,5, o que segundo a Portaria do Ministério da Saúde nº 2.914/2011, está dentro da faixa

recomendada (6,0 a 9,5). Esta variação foi considerada desprezível e não alterou o desempenho do sistema de tratamento de água utilizado neste trabalho.

5.3 ETAPA II – Ensaios com adição de agente coagulante

Neste item são demonstrados e discutidos os resultados encontrados no sistema constituído por leito de drenagem, flotação por ar dissolvido (FAD) e filtração, com adição de solução de Sulfato de Alumínio, como agente coagulante. Nesta etapa, foram conduzidos ensaios semelhantes aos realizados na Etapa I, entretanto, adicionando-se na unidade da FAD 5 mg/L, 10 mg/L e 15 mg/L de sulfato de alumínio como agente coagulante. Os ensaios foram realizados visando uma melhor remoção de sólidos dissolvidos e em suspensão verificada pelo acompanhamento dos valores dos parâmetros físicos cor aparente, cor verdadeira e turbidez. Foi verificada também a variação do pH para mantê-lo dentro da faixa ótima de utilização evitando-se oscilações que pudessem prejudicar o desempenho do sistema de tratamento de água aqui utilizado.

Com os parâmetros da mistura rápida ($T_{mr} = 10$ s, $G_{mr} = 1000$ s⁻¹ e $V_{mr} = 500$ RPM), floculação ($T_f = 10$ min, $G_f = 25$ s⁻¹ e $V_f = 35$ RPM) e flotação ($P = 400$ KPa, $T_{sat} = 8$ min e $R = 10\%$) conhecidos, foram conduzidos ensaios de flotação nos três jarros do equipamento e, posteriormente, de filtração. Foram obtidos, conforme esperado, melhores resultados de turbidez, cor aparente e cor verdadeira do que os encontrados na Etapa I.

Em todos os ensaios realizados nesta etapa, os valores de pH oscilaram entre 6,8 e 7,9, dentro da faixa recomendada (6,0 a 9,5) pela Portaria do Ministério da Saúde nº 2.914/2011.

5.3.1 Manta RT-21– DSA 5,0 mg/L

As análises para avaliação do drenado foram conduzidas em amostras coletadas nas saídas dos jarros e filtros. Estas amostras foram analisadas quanto aos seus parâmetros físicos cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH, conforme podem ser observados seus resultados nas Tabelas 18 e 19. Em todo este procedimento foi adicionado, na FAD, 5,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante.

Tabela 18 - Parâmetros analisados nas saídas dos jarros - RT-21 - DSA 5 mg/L

<i>Parâmetros</i>	<i>Jarro 01</i>	<i>Jarro 02</i>	<i>Jarro 03</i>
Cor Aparente (UC)	45		
Cor Verdadeira (UC)	11		
Turbidez (UNT)	14		
pH	7,14		

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Tabela 19 - Parâmetros analisados nas saídas dos filtros - RT-21 - DSA 5 mg/L

<i>Parâmetros</i>	<i>Filtro 01</i>	<i>Filtro 02</i>	<i>Filtro 03</i>
Cor Aparente (UC)	23	23	23
Cor Verdadeira (UC)	11	11	11
Turbidez (UNT)	2	2	2
pH	7,25	7,26	7,25

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Os valores de cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH do efluente do LD constituído com a manta RT-21 foram de 250 UC, 42 UC, 72 UNT e 7,8 respectivamente. Estes valores foram os mesmos para todos os ensaios conduzidos com a utilização do LD com esta configuração.

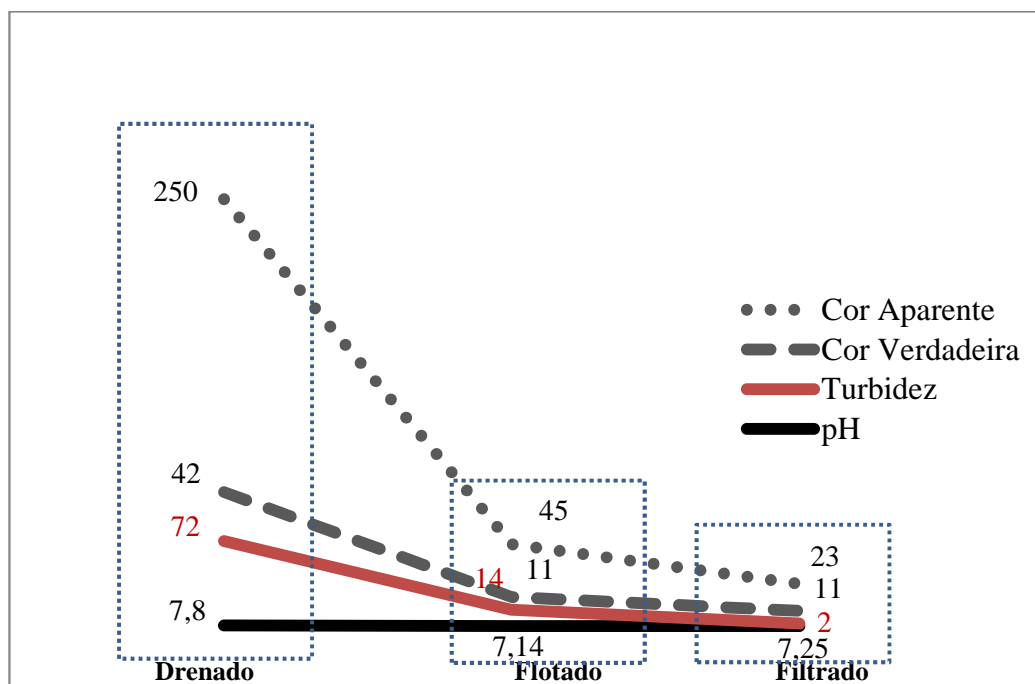
Os Gráficos 13, 14 e 15, demonstram a variação dos parâmetros analisados para o drenado após passagem pelas unidades de FAD e filtração. Analisando-se os gráficos percebe-se comportamento semelhante dos parâmetros avaliados em cada uma das unidades verificadas. Observa-se uma queda significativa dos valores dos parâmetros do drenado após passagem por estas unidades.

Considerando as unidades de leito de drenagem e flotação por ar dissolvido ($LD > FAD$), verifica-se após a FAD remoção de 82% da cor aparente, 80,5% da turbidez e 73,8% da cor verdadeira. Esta redução é devida a eficiência da unidade de FAD na remoção de sólidos pela formação de flocos e agregados. Entretanto, é importante ressaltar que, conforme também se espera na sedimentação, o processo combinado de coagulação/floculação antecedente deve ser eficiente, como observado.

Quando consideradas as unidades de flotação por ar dissolvido e filtração, referentes ao Filtro 01 ($FAD > Filtro\ 01$) e Filtro 02 ($FAD > Filtro\ 02$), removeram-se nas saídas das duas unidades de filtração 48,8% da cor aparente e 85,7% da turbidez. Já nas unidades $FAD > Filtro\ 03$, a eficiência de remoção foi de 51,1% e 85,7%, respectivamente.

Os valores de cor verdadeira mantiveram-se constantes nas saídas das três unidades de filtração, ou seja, as substâncias dissolvidas que conferem cor a água não foram removidas pelos meios filtrantes utilizados. De fato este parâmetro é melhor removido a partir da coagulação química, fenômeno intrínseco do processo de tratamento anterior (FAD), pouco representativo no processo de filtração.

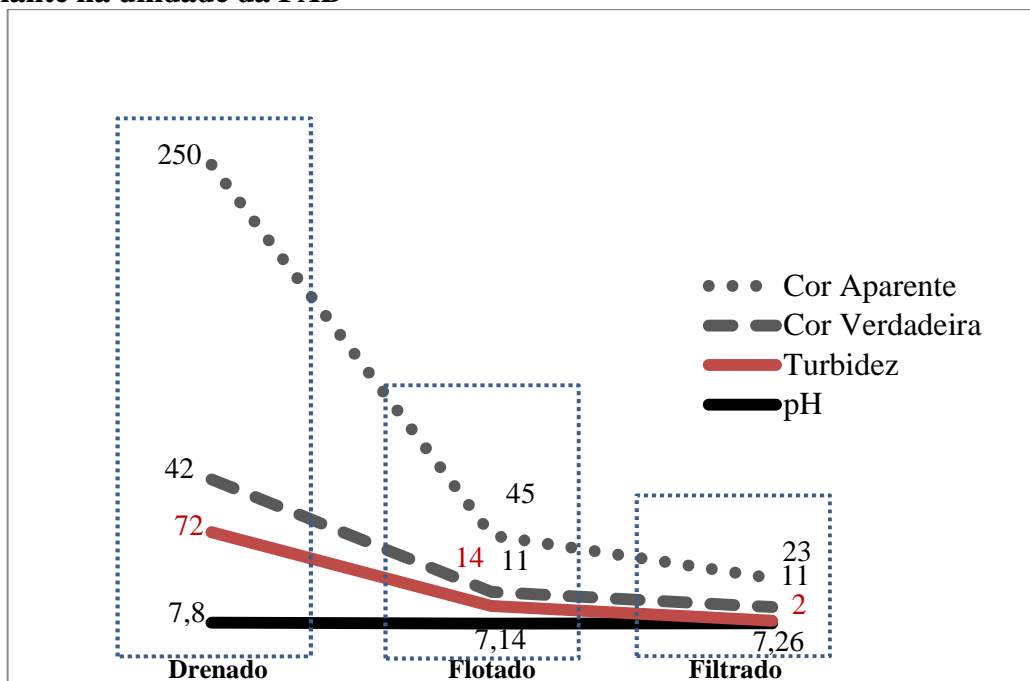
Gráfico 13 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-21, efluente da FAD e efluente do Filtro 01, sobre a influência de 5,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

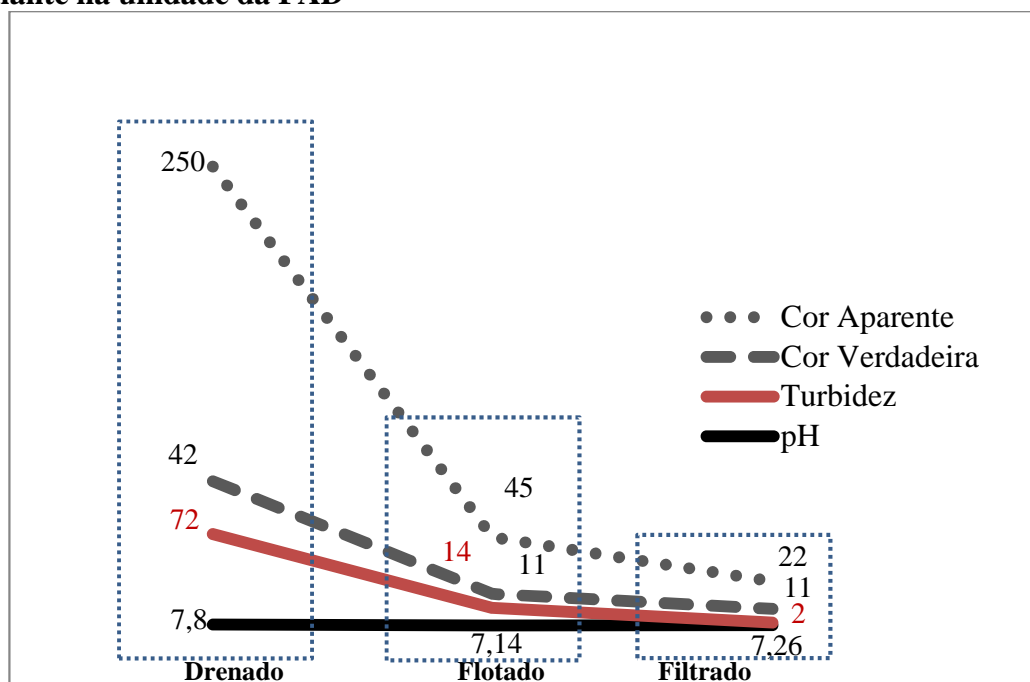
Nas unidades de leito de drenagem, flotação por ar dissolvido e filtração ($LD > FAD > Filtração$) a remoção da turbidez nas saídas dos três filtros foi 97,2%. A cor aparente neste sistema removeu 90,8% nas saídas dos Filtros 01 e 02 e 91,2% na saída do Filtro 03. Estes valores expressam a eficiência de todo sistema na remoção de sólidos presentes no drenado. Os valores de cor verdadeira nas saídas dos três filtros foram os mesmos encontrados nas saídas dos jarros (FAD), ou seja, não houve remoção de cor verdadeira.

Gráfico 14 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-21, efluente da FAD e efluente do Filtro 02, sobre a influência de 5,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD



Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

Gráfico 15 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-21, efluente da FAD e efluente do Filtro 03, sobre a influência de 5,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

5.3.2 Manta RT-21 – DSA 10,0 mg/L

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos dos parâmetros físicos cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH, após as unidades da FAD e filtração. Foi adicionado na FAD, 10 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante. Os resultados destas análises podem ser observados nas Tabelas 20 e 21.

Tabela 20 - Parâmetros analisados nas saídas dos jarros - RT-21 - DSA 10 mg/L

<i>Parâmetros</i>	<i>Jarro 01</i>	<i>Jarro 02</i>	<i>Jarro 03</i>
Cor Aparente (UC)	34		
Cor Verdadeira (UC)	10		
Turbidez (UNT)	10		
pH	7,06		

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Tabela 21 - Parâmetros analisados nas saídas dos filtros - RT-21 - DSA 10 mg/L

<i>Parâmetros</i>	<i>Filtro 01</i>	<i>Filtro 02</i>	<i>Filtro 03</i>
Cor Aparente (UC)	21	19	20
Cor Verdadeira (UC)	10	10	10
Turbidez (UNT)	2	2	2
pH	7,26	7,21	7,41

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Conforme ilustram os Gráficos 16, 17 e 18, nas unidades de leito de drenagem e flotação por ar dissolvido ($LD > FAD$), verifica-se após a FAD remoção de 86,4% da cor aparente, 86,1% da turbidez e 76,2% da cor verdadeira. Estes resultados expressam a eficiência da FAD na formação de flocos dentro dos jarros em consequência da ação do coagulante utilizado nesta unidade. Outra contribuição para esta remoção foi a recirculação de água saturada com ar nos interiores dos jarros, responsável pela formação de agregados (microbolhas/flocos).

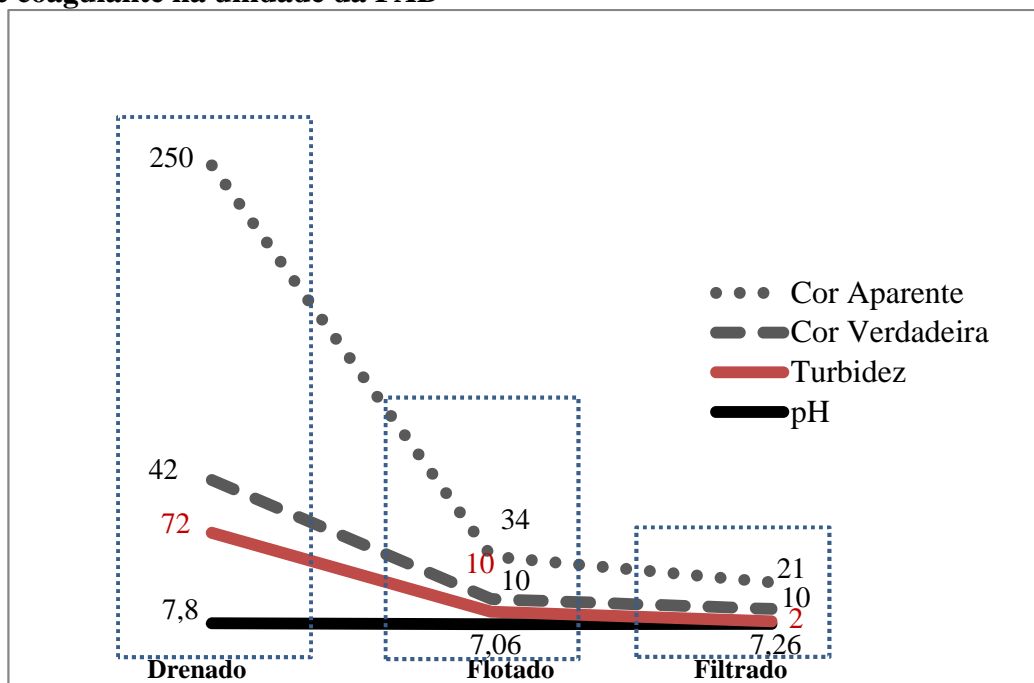
Quando consideradas as unidades de flotação por ar dissolvido e filtração, referentes aos três filtros utilizados ($FAD > Filtração$), verifica-se nas saídas dos três filtros remoção de

80% da turbidez. Esta redução é devida a eficiência dos meios filtrantes utilizados na remoção de sólidos presentes nas amostras coletadas após a FAD.

Nas unidades $FAD > Filtro\ 01$, $FAD > Filtro\ 02$ e $FAD > Filtro\ 03$, a cor aparente nas saídas dos três filtros reduziu 38,2%, 44,1% e 41,2%, respectivamente. O meio filtrante utilizado no Filtro 02, cuja composição era areia de granulometria 0,84 mm, mostrou ser o mais eficiente na remoção de sólidos presentes nas saídas dos jarros, entretanto, os outros filtros apresentaram eficiência similar.

Os valores de cor verdadeira nas unidades $FAD > Filtração$, nas saídas dos três filtros, mantiveram-se constantes pelos mesmos motivos descritos na seção 5.3.1.

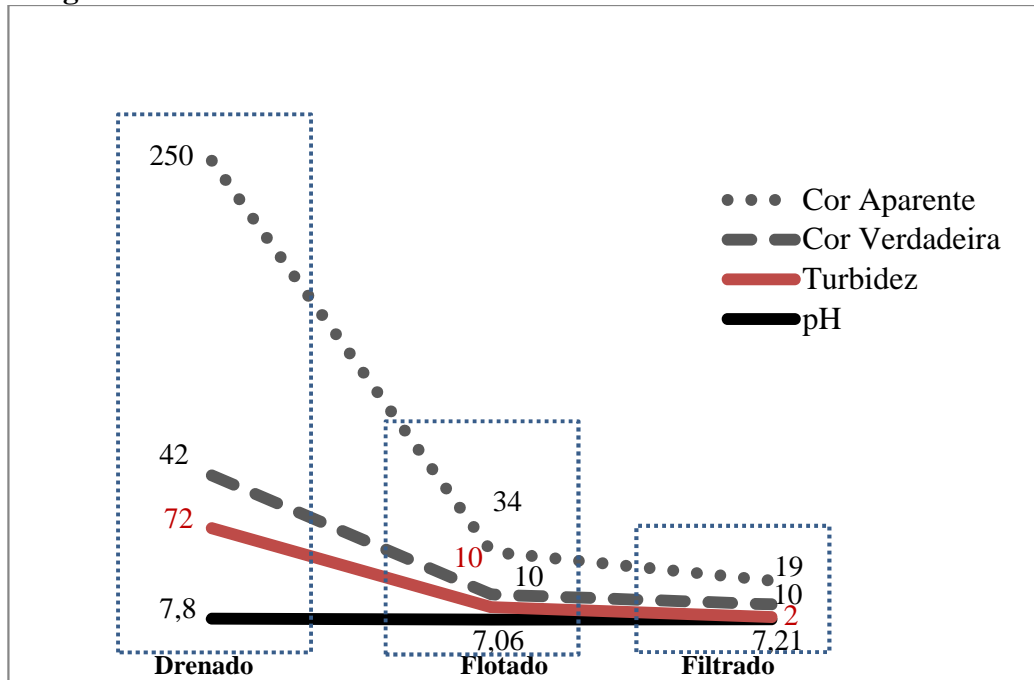
Gráfico 16 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-21, efluente da FAD e efluente do Filtro 01, sobre a influência de 10,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

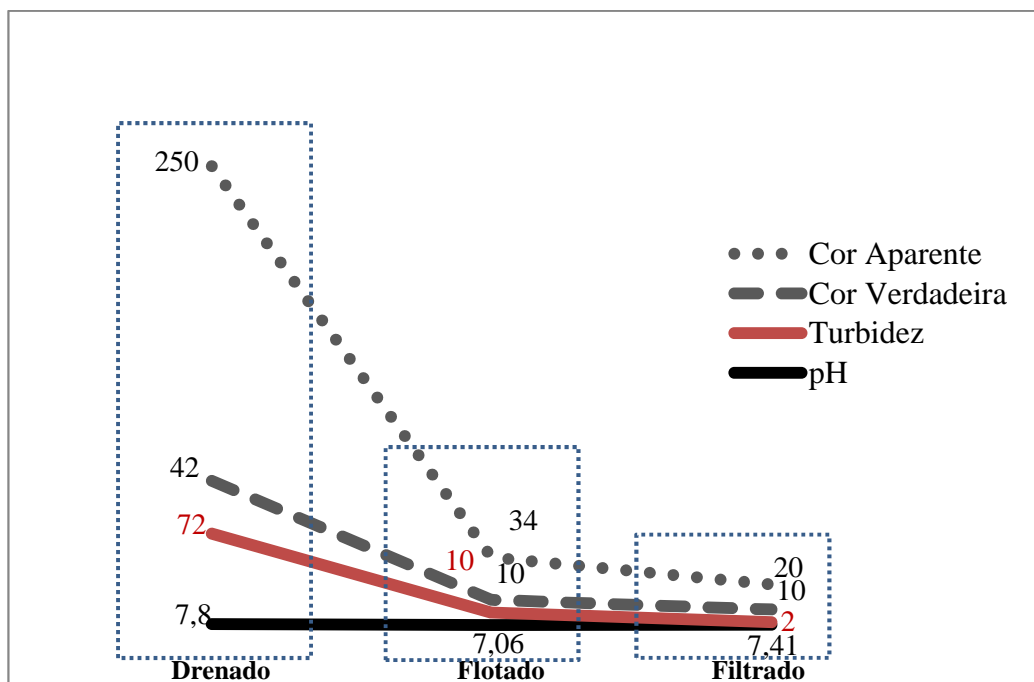
Nas unidades de leito de drenagem, flotação por ar dissolvido e filtração ($LD > FAD > Filtração$) a remoção da turbidez nas saídas dos três filtros foi 97,2%. A cor aparente neste sistema removeu 91,6% na saída do Filtro 01, 92,4% na saída do Filtro 02 e 92% na saída do Filtro 03. Estes valores expressam a eficiência de todo sistema na remoção de sólidos suspensos presentes no drenado. Os valores de cor verdadeira nas saídas dos três filtros foram os mesmos encontrados nas saídas dos jarros (FAD).

Gráfico 17 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-21, efluente da FAD e efluente do Filtro 02, sobre a influência de 10,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Gráfico 18 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-21, efluente da FAD e efluente do Filtro 03, sobre a influência de 10,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

5.3.3 Manta RT-21 – DSA 15,0 mg/L

As análises para avaliação do drenado foram conduzidas em amostras coletadas nas saídas dos jarros e filtros. Foram analisados os parâmetros físicos cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH, conforme podem ser observados os seus resultados nas Tabelas 22 e 23. Em todo este procedimento foi adicionado, na FAD, 15,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante.

Tabela 22 - Parâmetros analisados nas saídas dos jarros - RT-21 - DSA 15 mg/L

<i>Parâmetros</i>	<i>Jarro 01</i>	<i>Jarro 02</i>	<i>Jarro 03</i>
Cor Aparente (UC)	24		
Cor Verdadeira (UC)	7		
Turbidez (UNT)	7		
pH	7,01		

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Tabela 23 - Parâmetros analisados nas saídas dos filtros - RT-21 - DSA 15 mg/L

<i>Parâmetros</i>	<i>Filtro 01</i>	<i>Filtro 02</i>	<i>Filtro 03</i>
Cor Aparente (UC)	19	18	17
Cor Verdadeira (UC)	7	7	7
Turbidez (UNT)	1	1	1
pH	7,2	7,22	7,26

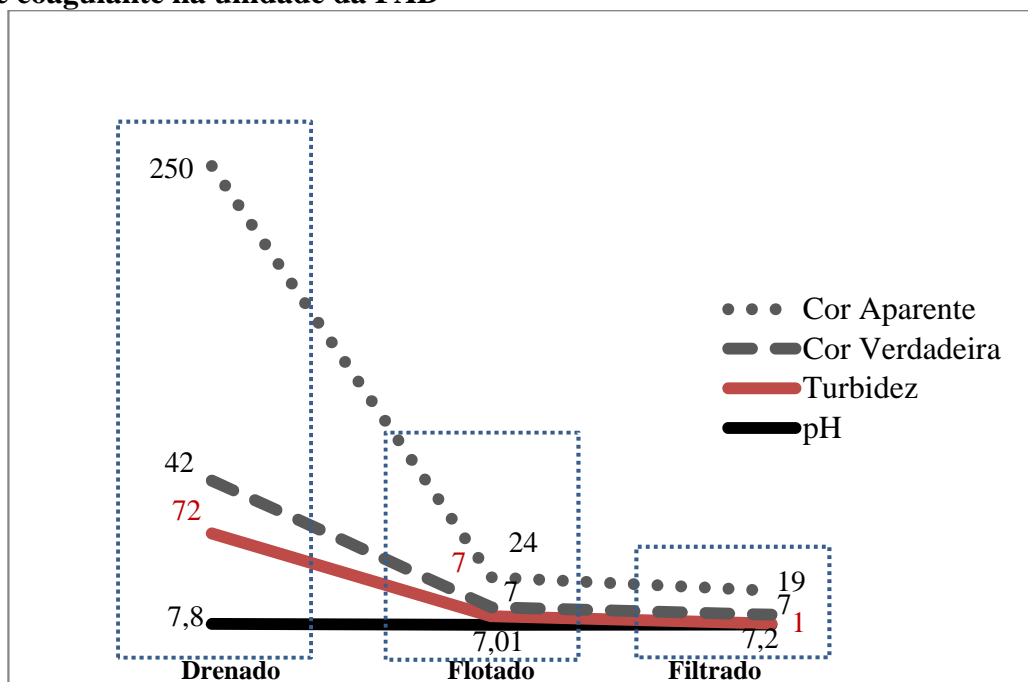
Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Os resultados referentes à cor aparente, cor verdadeira e turbidez ao longo das etapas podem ser observados nos Gráficos 19, 20 e 21. Nas unidades de leito de drenagem e flotação por ar dissolvido ($LD > FAD$), verifica-se após a FAD remoção de 90,4% da cor aparente, 90,3% da turbidez e 83,3% da cor verdadeira. Esta remoção é consequência da ação do coagulante utilizado na FAD na formação de flocos e pela ação das microbolhas de água saturada com ar na formação de aglomerados.

A remoção da turbidez nas unidades $FAD > Filtração$ foi de 85,7% nas saídas dos três filtros. A cor aparente reduziu 20,8% na saída do Filtro 01, 25% na saída do Filtro 02 e

29,2% na saída do Filtro 03. Os valores de cor verdadeira nas unidades $FAD > Filtração$ mantiveram-se constantes pelos mesmos motivos descritos na seção 5.3.1.

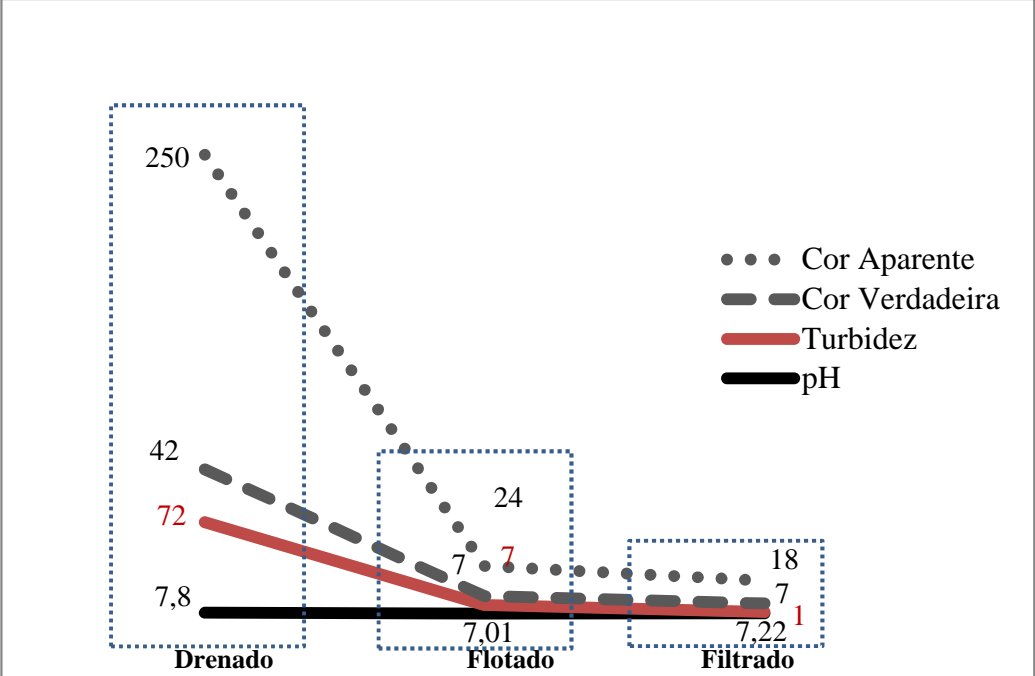
Gráfico 19 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-21, efluente da FAD e efluente do Filtro 01, sobre a influência de 15,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

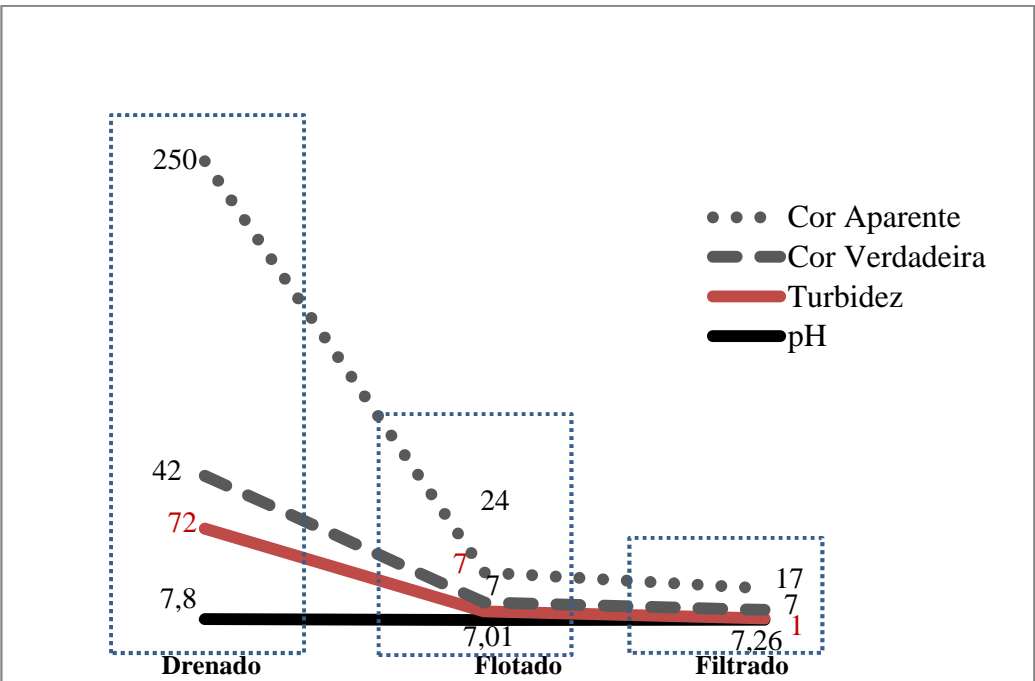
Nas unidades de leito de drenagem, flotação por ar dissolvido e filtração ($LD > FAD > Filtração$) a remoção da turbidez nas saídas dos três filtros foi 98,6%. Considerando-se esta configuração, a cor aparente foi reduzida em 92,4% na saída do Filtro 01, 92,8% na saída do Filtro 02 e 93,2% na saída do Filtro 03. Estes valores expressam a eficiência de todo sistema na remoção de sólidos suspensos presentes no drenado. Não foi observada remoção de cor verdadeira nos filtros.

Gráfico 20 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-21, efluente da FAD e efluente do Filtro 02, sobre a influência de 15,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD



Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

Gráfico 21 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-21, efluente da FAD e efluente do Filtro 03, sobre a influência de 15,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD



Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

5.3.4 Manta RT-26 – DSA 5,0 mg/L

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos nas análises das amostras coletadas após as unidades FAD/Filtração dos parâmetros físicos cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH. Foi adicionado na FAD, 5,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante. Os resultados destas análises podem ser observados nas Tabelas 24 e 25.

Tabela 24 - Parâmetros analisados nas saídas dos jarros - RT-26 - DSA 5 mg/L

<i>Parâmetros</i>	<i>Jarro 01</i>	<i>Jarro 02</i>	<i>Jarro 03</i>
Cor Aparente (UC)	16		
Cor Verdadeira (UC)	6		
Turbidez (UNT)	1		
pH	6,9		

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Tabela 25 - Parâmetros analisados nas saídas dos filtros - RT-26 - DSA 5 mg/L

<i>Parâmetros</i>	<i>Filtro 01</i>	<i>Filtro 02</i>	<i>Filtro 03</i>
Cor Aparente (UC)	13	12	12
Cor Verdadeira (UC)	6	6	6
Turbidez (UNT)	0,9	0,8	0,8
pH	7,23	7,26	7,26

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

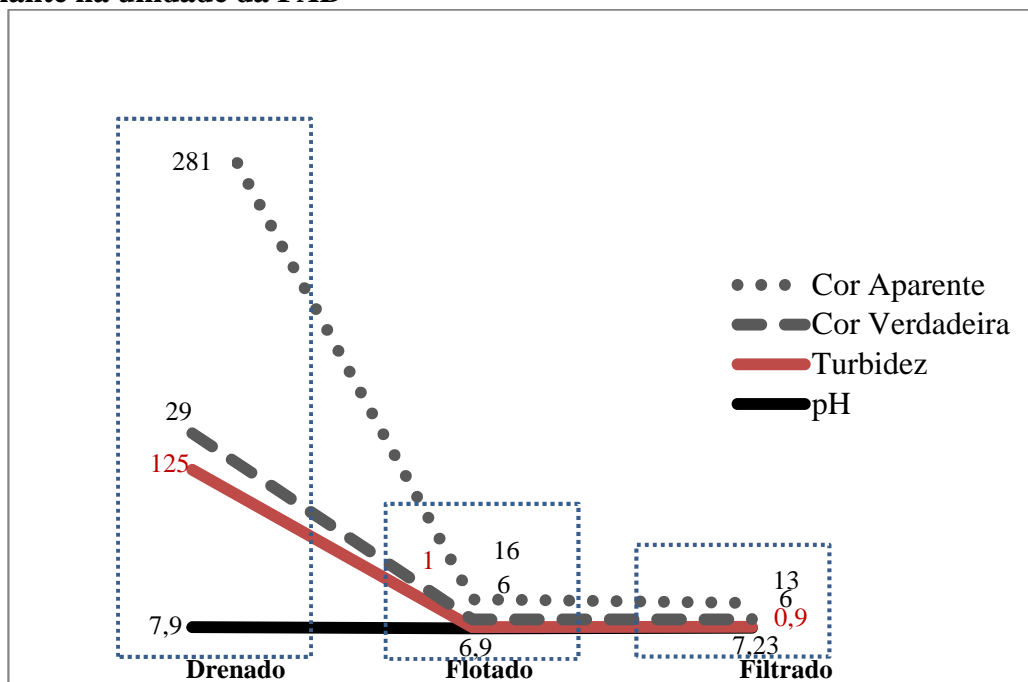
Os Gráficos 22, 23 e 24 mostram a variação dos parâmetros físicos analisados após a passagem pelas unidades de leito de drenagem, flotação por ar dissolvido e filtração.

Considerando as unidades de leito de drenagem e flotação por ar dissolvido ($LD > FAD$), verifica-se após a FAD remoção de 94,3% da cor aparente, 99,2% da turbidez e 79,3% da cor verdadeira. Tal eficiência é explicada pela ação do coagulante adicionado na FAD e pela adição de água saturada com ar nos interiores dos jarros que possibilitou o surgimento de microbolhas de ar, auxiliando na formação de aglomerados.

Nas unidades de flotação por ar dissolvido e filtração, referente aos Filtros 02 ($FAD > Filtro 02$) e ao Filtro 03 ($FAD > Filtro 03$), verifica-se após as duas unidades de filtração

remoção de 25% da cor aparente e 20% da turbidez. Na saída do Filtro 01 ($FAD > Filtro\ 01$), houve uma redução de 18,7% da cor aparente e 10% da turbidez. Os valores de cor verdadeira nas saídas dos três filtros mantiveram-se constantes após as unidades da FAD e filtração.

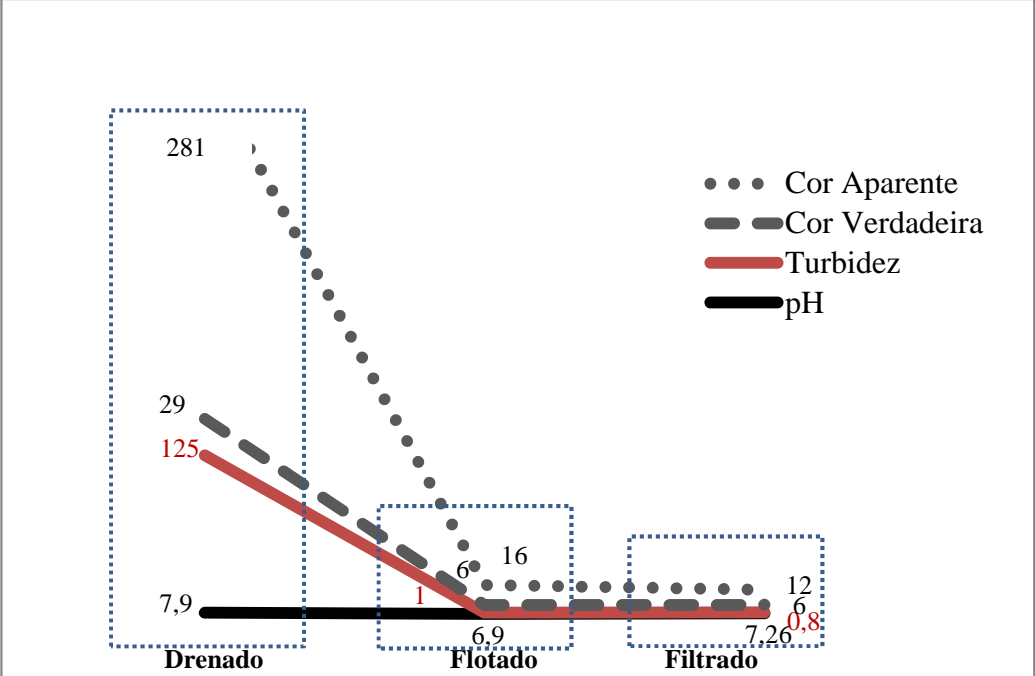
Gráfico 22 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-26, efluente da FAD e efluente do Filtro 01, sobre a influência de 5,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD



Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

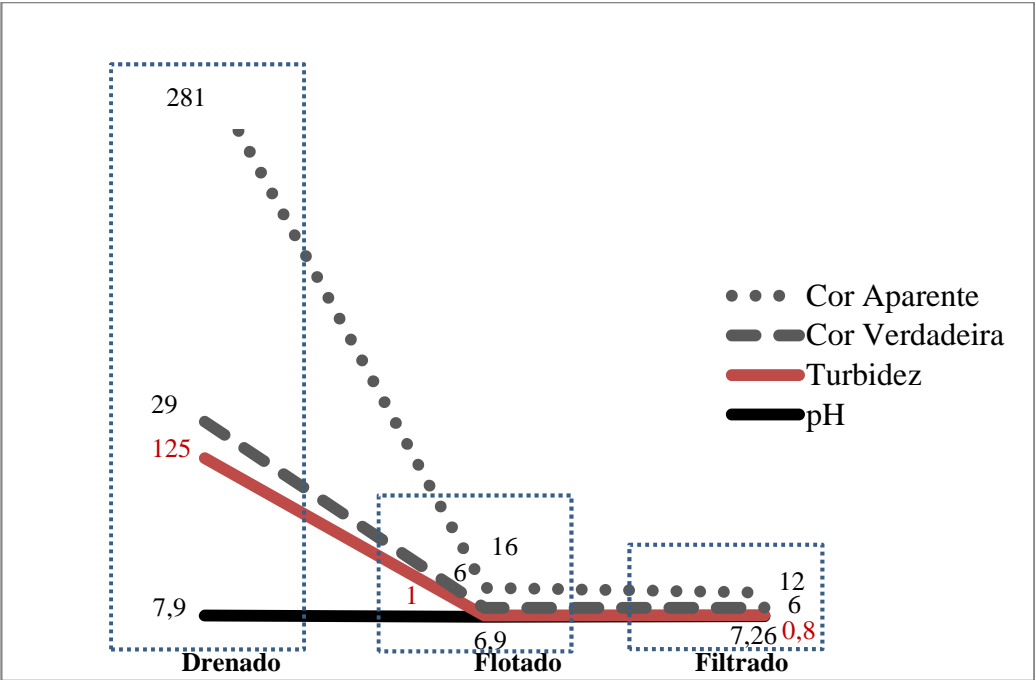
Nas unidades leito de drenagem, flotação por ar dissolvido e filtração ($LD > FAD > Filtração$) a remoção da turbidez nas saídas dos Filtros 02 e 03 foi 99,4% e na saída do Filtro 01 foi 99,3%. Considerando-se esta configuração do sistema, houve remoção de cor aparente de 95,4% no Filtro 01 e de 95,7% nos Filtros 02 e 03. Estes valores expressam a grande eficiência do sistema na remoção de sólidos suspensos presentes no drenado. Os valores medidos de cor verdadeira nas saídas dos três filtros foram os mesmos encontrados nas saídas dos jarros (FAD). Como já elucidado anteriormente, os filtros compostos de areia não são hábeis na remoção de material dissolvido.

Gráfico 23 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-26, efluente da FAD e efluente do Filtro 02, sobre a influência de 5,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Gráfico 24 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-26, efluente da FAD e efluente do Filtro 03, sobre a influência de 5,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

5.3.5 Manta RT-26 – DSA 10,0 mg/L

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para o sistema LD>FAD>Filtros aplicando-se a dosagem de 10,0 mg/L de sulfato de alumínio na unidade de FAD. As amostras obtidas nas saídas destas unidades foram analisadas quanto aos seus parâmetros físicos cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH cujos resultados são apresentados nas Tabelas 26 e 27.

Tabela 26 - Parâmetros analisados nas saídas dos jarros - RT-26 - DSA 10 mg/L

<i>Parâmetros</i>	<i>Jarro 01</i>	<i>Jarro 02</i>	<i>Jarro 03</i>
Cor Aparente (UC)	13		
Cor Verdadeira (UC)	3		
Turbidez (UNT)	1		
pH	6,8		

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Tabela 27 - Parâmetros analisados nas saídas dos filtros - RT-26 - DSA 10 mg/L

<i>Parâmetros</i>	<i>Filtro 01</i>	<i>Filtro 02</i>	<i>Filtro 03</i>
Cor Aparente (UC)	12	12	12
Cor Verdadeira (UC)	3	3	3
Turbidez (UNT)	0,7	0,7	0,7
pH	7,23	7,26	7,26

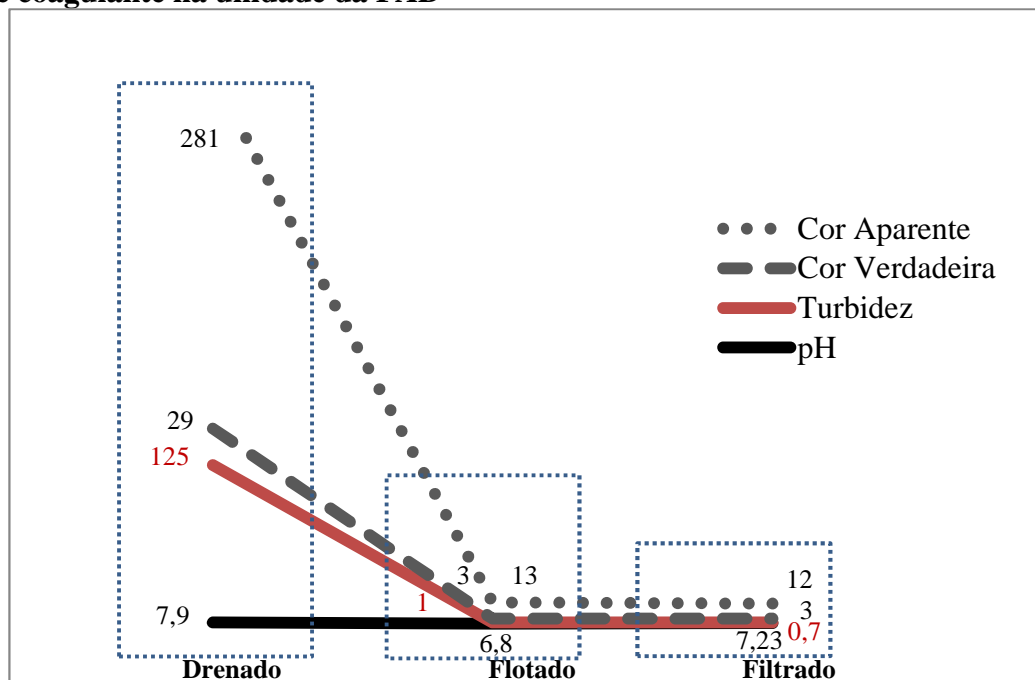
Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Os Gráficos 25, 26 e 27, demonstram os comportamentos dos parâmetros físicos cor aparente, cor verdadeira e turbidez após passagem pelas unidades de leito de drenagem, flotação por ar dissolvido e filtração.

Considerando as unidades de leito de drenagem e flotação por ar dissolvido (*LD > FAD*), verifica após a FAD remoção de 95,4% da cor aparente, 99,2% da turbidez e 89,7 % da cor verdadeira. Estes resultados expressam a eficiência da unidade da FAD na remoção de sólidos presentes na amostra do drenado.

Quando analisadas as unidades de flotação por ar dissolvido e filtração ($FAD > Filtração$), verifica-se nas saídas dos três filtros remoção de 7,7% da cor aparente e 30% da turbidez. Os valores da cor verdadeira mantiveram-se constante nas saídas das três unidades de filtração, ou seja, as substancias dissolvidas que conferem cor a água não foram removidas pelos meios filtrantes utilizados, de fato, substâncias dissolvidas dificilmente seriam removidas.

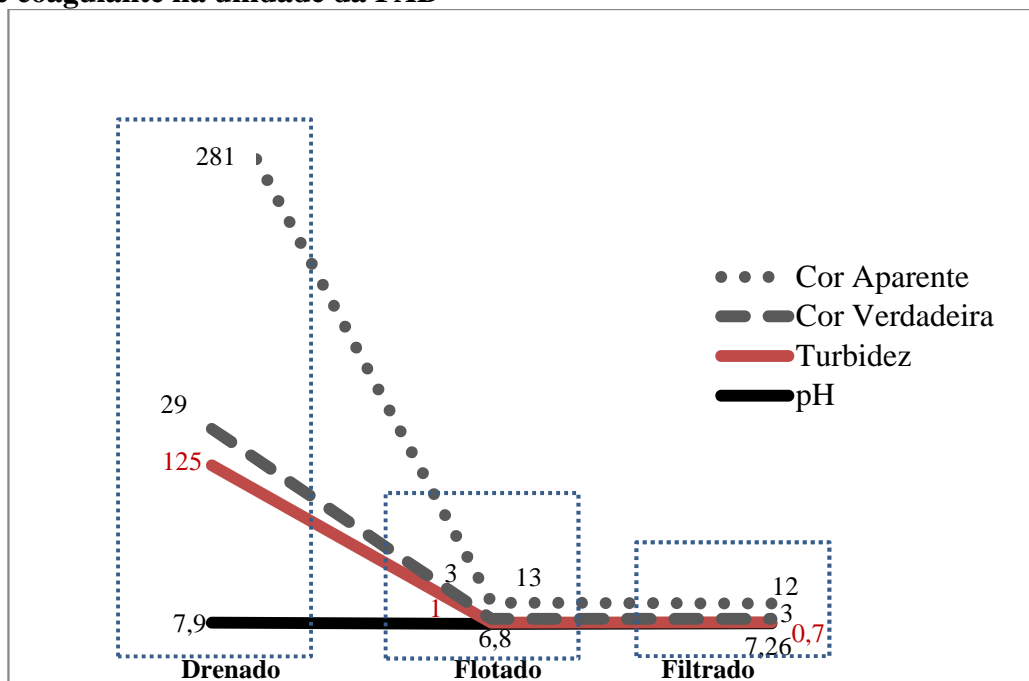
Gráfico 25 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-26, efluente da FAD e efluente do Filtro 01, sobre a influência de 10,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

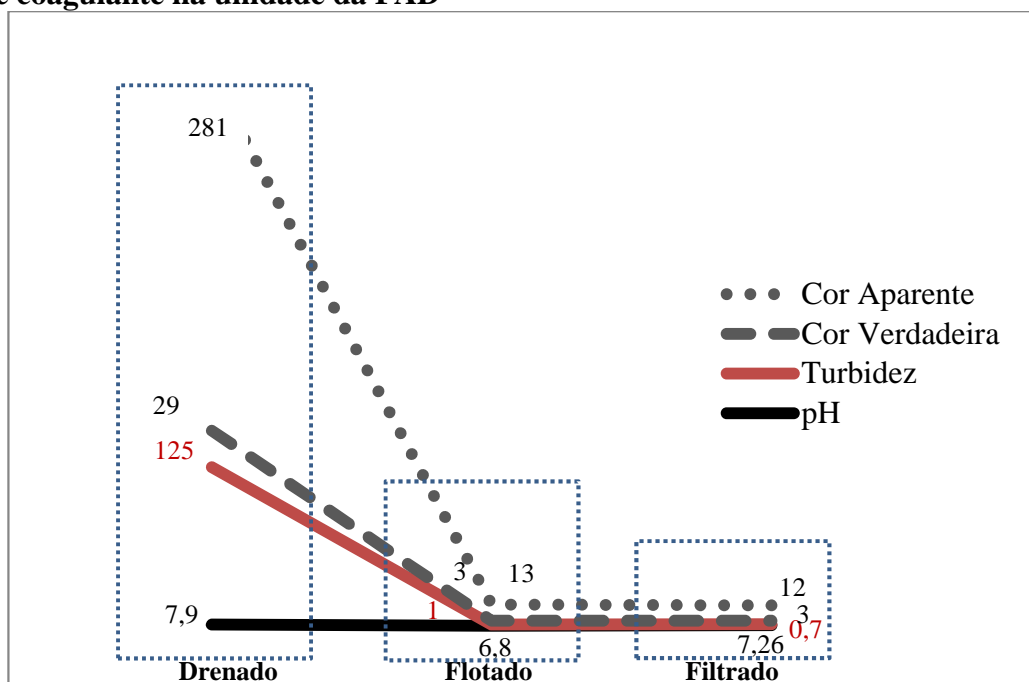
Nas unidades de leito de drenagem, flotação por ar dissolvido e filtração ($LD > FAD > Filtração$) a remoção da cor aparente e da turbidez nas saídas dos três filtros foi 95,7% e 99,4%, respectivamente. Estes valores expressam a eficiência de todo sistema na remoção de sólidos suspensos presentes no drenado.

Gráfico 26 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-26, efluente da FAD e efluente do Filtro 02, sobre a influência de 10,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Gráfico 27 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-26, efluente da FAD e efluente do Filtro 03, sobre a influência de 10,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

5.3.6 Manta RT-26 – DSA 15,0 mg/L

As análises para avaliação do drenado foram conduzidas em amostras coletadas após as unidades FAD/Filtração. Estas amostras foram analisadas quanto aos seus parâmetros físicos cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH, conforme podem ser observados os seus resultados nas Tabelas 28 e 29. Em todo este procedimento foi adicionado, na FAD, 15,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante.

Tabela 28 - Parâmetros analisados nas saídas dos jarros - RT-26 - DSA 15 mg/L

<i>Parâmetros</i>	<i>Jarro 01</i>	<i>Jarro 02</i>	<i>Jarro 03</i>
Cor Aparente (UC)	12		
Cor Verdadeira (UC)	4		
Turbidez (UNT)	1		
pH	6,8		

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Tabela 29 - Parâmetros analisados nas saídas dos filtros - RT-26 - DSA 15 mg/L

<i>Parâmetros</i>	<i>Filtro 01</i>	<i>Filtro 02</i>	<i>Filtro 03</i>
Cor Aparente (UC)	9	10	9
Cor Verdadeira (UC)	4	4	4
Turbidez (UNT)	0,7	0,5	0,6
pH	7,24	7,25	7,26

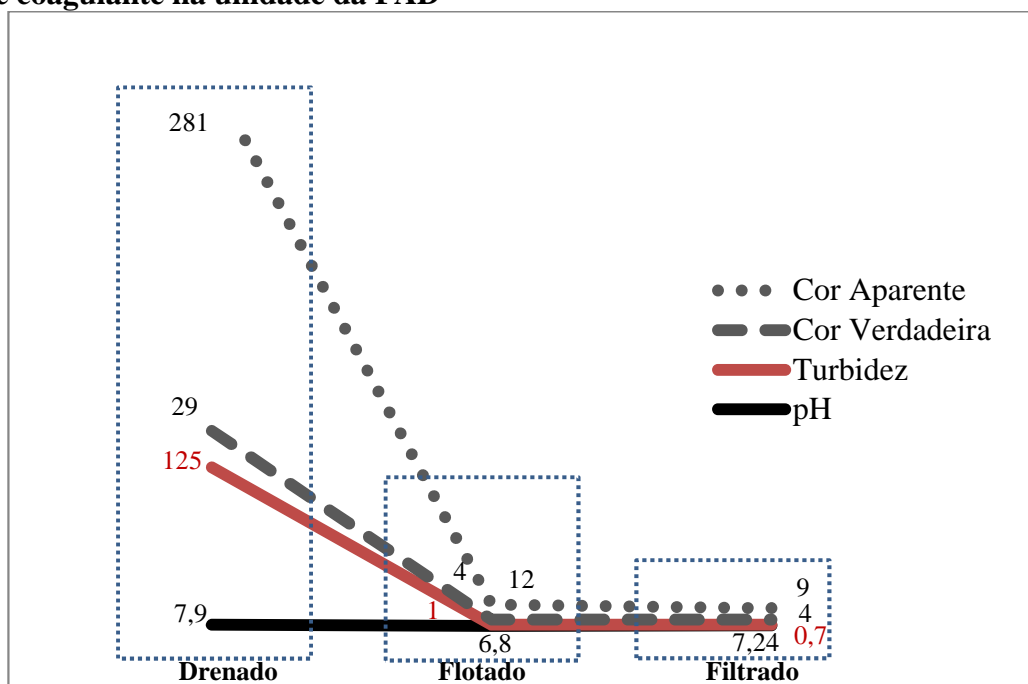
Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Conforme ilustram os Gráficos 28, 29 e 30, e, considerando as unidades de leito de drenagem e flotação por ar dissolvido ($LD > FAD$), verifica-se após a FAD redução de 95,7% da cor aparente, 99,2% da turbidez e 86,2% da cor verdadeira. Estes resultados expressam a eficiência da unidade da FAD na remoção de sólidos presentes na amostra do drenado. Esta retenção ocorreu pela floculação advinda da ação do coagulante utilizado e da atuação das microbolhas na formação de aglomerados, devida à inserção de água saturada com ar nos interiores dos jarros.

Quando consideradas as unidades flotação por ar dissolvido e filtração, referentes ao Filtro 01 ($FAD > Filtro\ 01$), verifica-se após a unidade de filtração remoção de 25% da cor aparente e 30% da turbidez. Considerando as unidades $FAD > Filtro\ 02$ esta remoção foi de 16,6% da cor aparente e 50% da turbidez. Nas unidades $FAD > Filtro\ 03$, os valores da cor aparente e da turbidez após a unidade de filtração foram 25% e 40%, respectivamente.

A flotação/floculação seguida de filtração utilizando grãos de areia com tamanho de 0,84 mm (Filtro 02) proporcionou o melhor desempenho desta etapa. A turbidez encontrada foi de 0,5 UNT, o que para a portaria do Ministério da Saúde 2.914/2011, está dentro dos limites de potabilidade da água, para que a mesma possa ser tratada por filtração rápida. Na unidade de filtração referente aos Filtros 01 e 03, os valores encontrados foram de 0,7 UNT e 0,6 UNT, respectivamente.

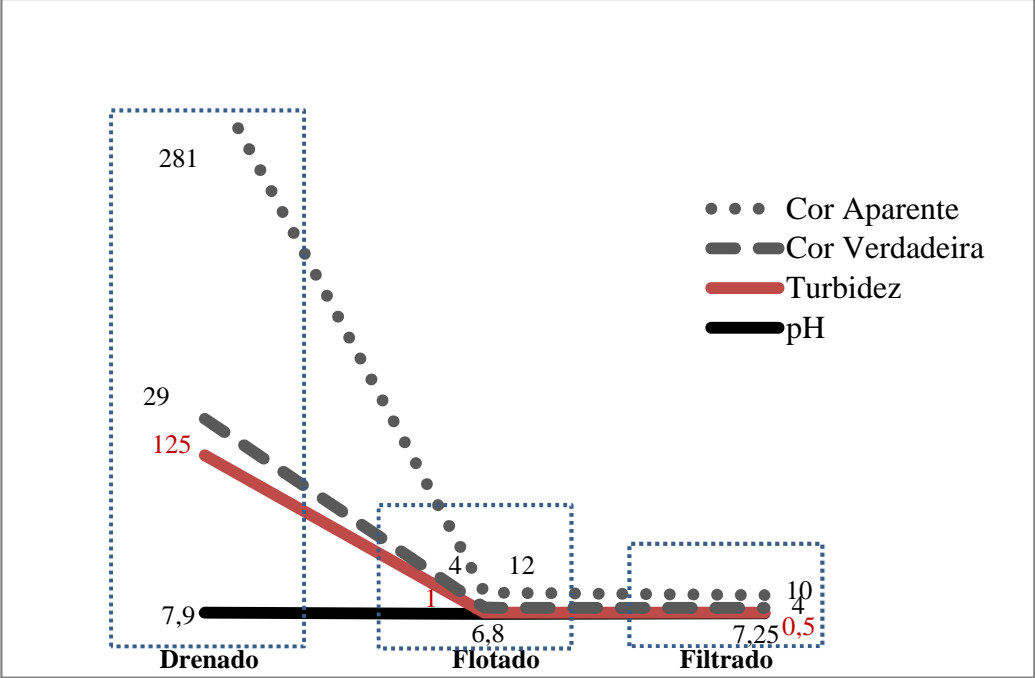
Gráfico 28 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-26, efluente da FAD e efluente do Filtro 01, sobre a influência de 15,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD



Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

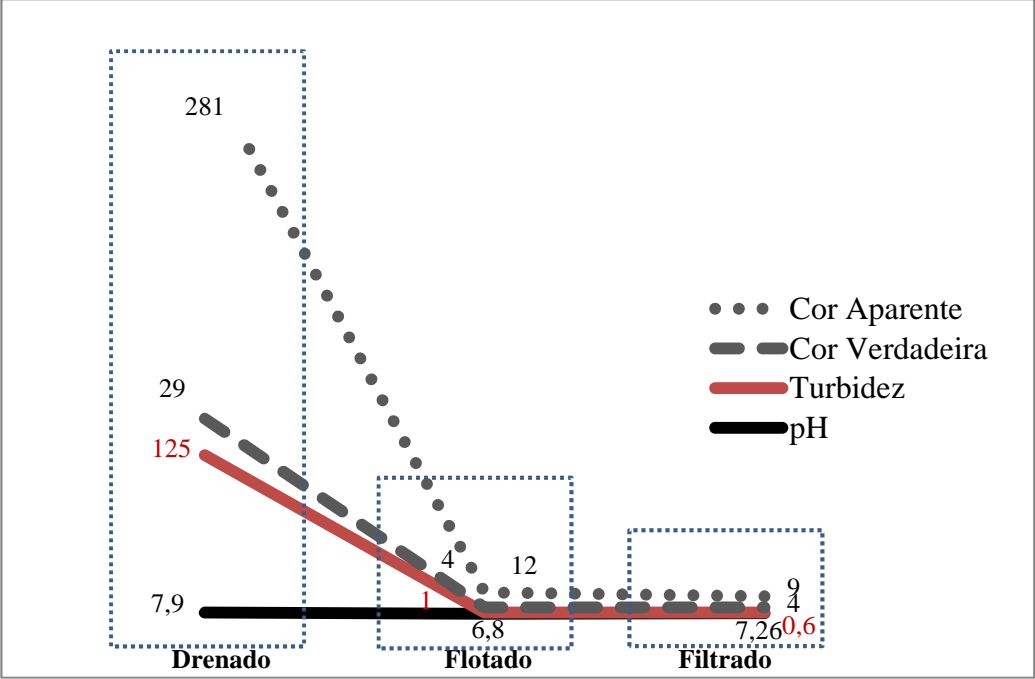
Nas unidades leito de drenagem, flotação por ar dissolvido e filtração ($LD > FAD > Filtração$) a remoção da turbidez nas saídas dos Filtros 01, 02 e 03 foi 99,4%, 99,6% e 99,5%, respectivamente. A remoção da cor aparente foi de 96,8% (Filtros 01 e 03) e 96,4% (Filtro 02). Estes valores expressam a eficiência de todo sistema na remoção de sólidos suspensos presentes no drenado.

Gráfico 29 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-26, efluente da FAD e efluente do Filtro 02, sobre a influência de 15,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Gráfico 30 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-26, efluente da FAD e efluente do Filtro 03, sobre a influência de 15,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD



Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

5.3.7 Manta RT-31 – DSA 5,0 mg/L

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados das análises para avaliação do drenado. As amostras foram coletadas após as unidades FAD/Filtração e tiveram suas análises quanto aos parâmetros físicos cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH. Os resultados podem ser observados nas Tabelas 30 e 31. Em todo este procedimento foi adicionado, na FAD, 5,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante.

Tabela 30 - Parâmetros analisados nas saídas dos jarros - RT-31 - DSA 5 mg/L

<i>Parâmetros</i>	<i>Jarro 01</i>	<i>Jarro 02</i>	<i>Jarro 03</i>
Cor Aparente (UC)	54		
Cor Verdadeira (UC)	16		
Turbidez (UNT)	13		
pH	6,8		

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Tabela 31 - Parâmetros analisados nas saídas dos filtros - RT-31 - DSA 5 mg/L

<i>Parâmetros</i>	<i>Filtro 01</i>	<i>Filtro 02</i>	<i>Filtro 03</i>
Cor Aparente (UC)	22	21	21
Cor Verdadeira (UC)	16	16	16
Turbidez (UNT)	10	10	9
pH	7,16	7,18	7,19

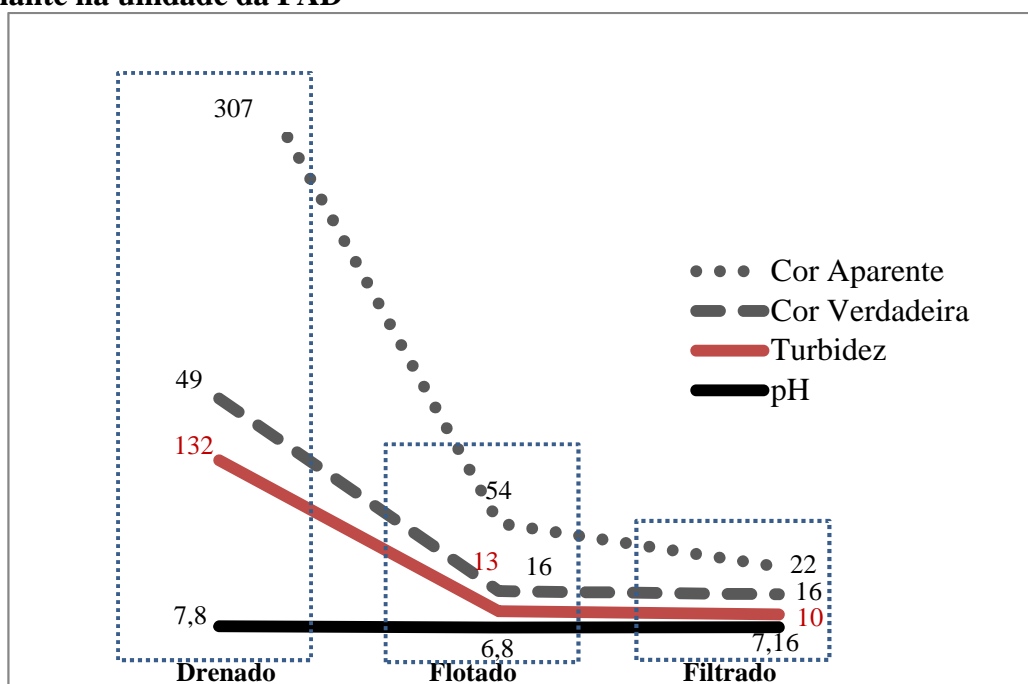
Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Os resultados referentes à cor aparente, cor verdadeira e turbidez ao longo das etapas podem ser observados nos Gráficos 31, 32 e 33.

Quando consideradas as unidades de leito de drenagem e flotação por ar dissolvido ($LD > FAD$), verifica-se após a FAD redução de 82,4% da cor aparente, 90,1% da turbidez e 67,3% da cor verdadeira. A remoção da cor aparente e da turbidez após a FAD, representam a parcela de sólidos presentes no drenado que ficaram retidos nos interiores dos jarros, pela ação da flotação/floculação. A remoção na cor verdadeira se dá pela eficiência da FAD na remoção de substâncias dissolvidos presentes no drenado.

Nas unidades de flotação por ar dissolvido e filtração, referentes ao Filtro 01 ($FAD > Filtro\ 01$) e ao Filtro 02 ($FAD > Filtro\ 02$), verifica-se após as unidades de filtração remoção de 23,1% na turbidez. A cor aparente, tanto na saída do Filtro 02 ($FAD > Filtro\ 02$), como na saída do Filtro 03 ($FAD > Filtro\ 03$) reduziu 61,1%. Os resultados da cor verdadeira mantiveram-se constantes nas saídas dos três filtros. As substâncias dissolvidas que conferem cor às amostras, não foram retidas nos meios filtrantes utilizados, quando considerados apenas estas duas unidades ($FAD/Filtração$). Neste ensaio a flotação/floculação seguida de filtração proporcionou baixo desempenho, quando comparados todos os ensaios realizados nas seções anteriores.

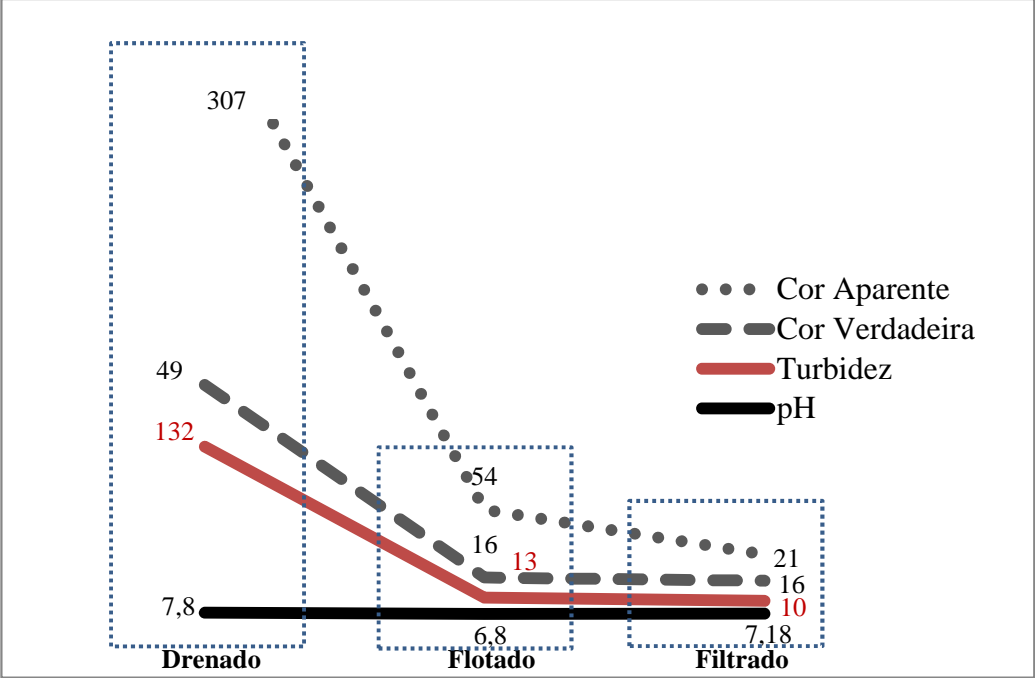
Gráfico 31 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-31, efluente da FAD e efluente do Filtro 01, sobre a influência de 5,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

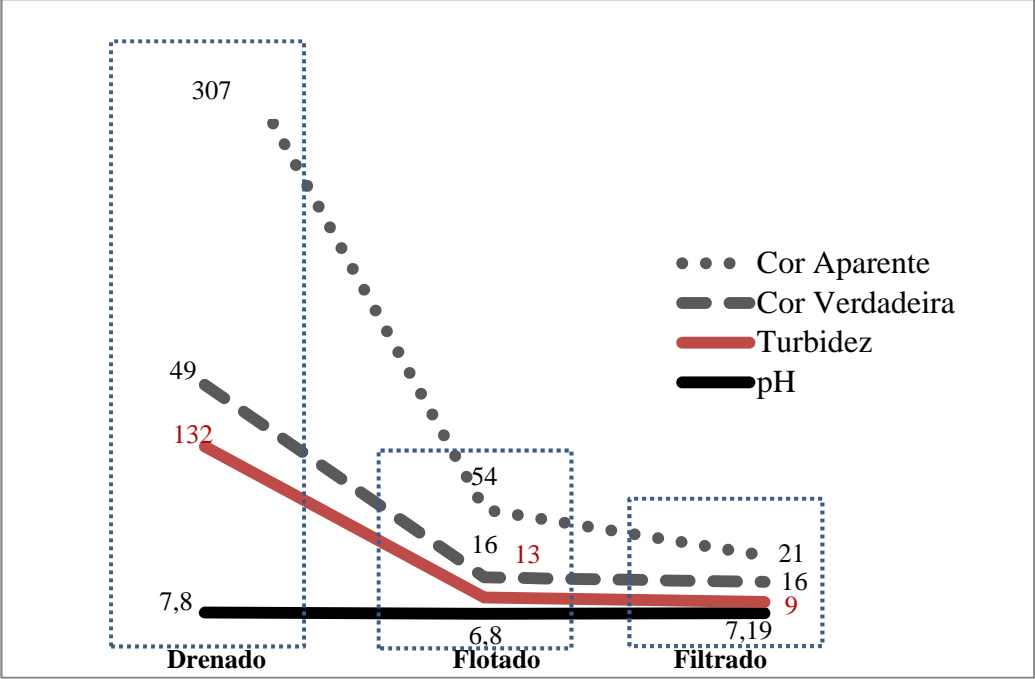
Nas unidades de leito de drenagem, flotação por ar dissolvido e filtração ($LD > FAD > Filtração$) a remoção da cor aparente nas saídas dos Filtros 01, 02 e 03 foi 92,8%, 93,1% e 93,1%, respectivamente. A turbidez teve remoção de 92,4% (Filtros 01 e 02) e 93,1% (Filtro 03). Estes valores expressam a eficiência de todo sistema na remoção de sólidos presentes no drenado.

Gráfico 32 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-31, efluente da FAD e efluente do Filtro 02, sobre a influência de 5,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Gráfico 33 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-31, efluente da FAD e efluente do Filtro 03, sobre a influência de 5,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

5.3.8 Manta RT-31 – DSA 10,0 mg/L

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos nas análises das amostras coletadas após as unidades FAD/Filtração dos parâmetros físicos cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH. Foi adicionado na FAD, 10,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante. Os resultados destas análises podem ser observados nas Tabelas 32 e 33.

Tabela 32 - Parâmetros analisados nas saídas dos jarros - RT-31 - DSA 10 mg/L

<i>Parâmetros</i>	<i>Jarro 01</i>	<i>Jarro 02</i>	<i>Jarro 03</i>
Cor Aparente (UC)	50		
Cor Verdadeira (UC)	17		
Turbidez (UNT)	14		
pH	6,9		

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Tabela 33 - Parâmetros analisados nas saídas dos filtros - RT-31 - DSA 10 mg/L

<i>Parâmetros</i>	<i>Filtro 01</i>	<i>Filtro 02</i>	<i>Filtro 03</i>
Cor Aparente (UC)	24	25	25
Cor Verdadeira (UC)	17	17	17
Turbidez (UNT)	5	5	5
pH	7,23	7,26	7,26

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

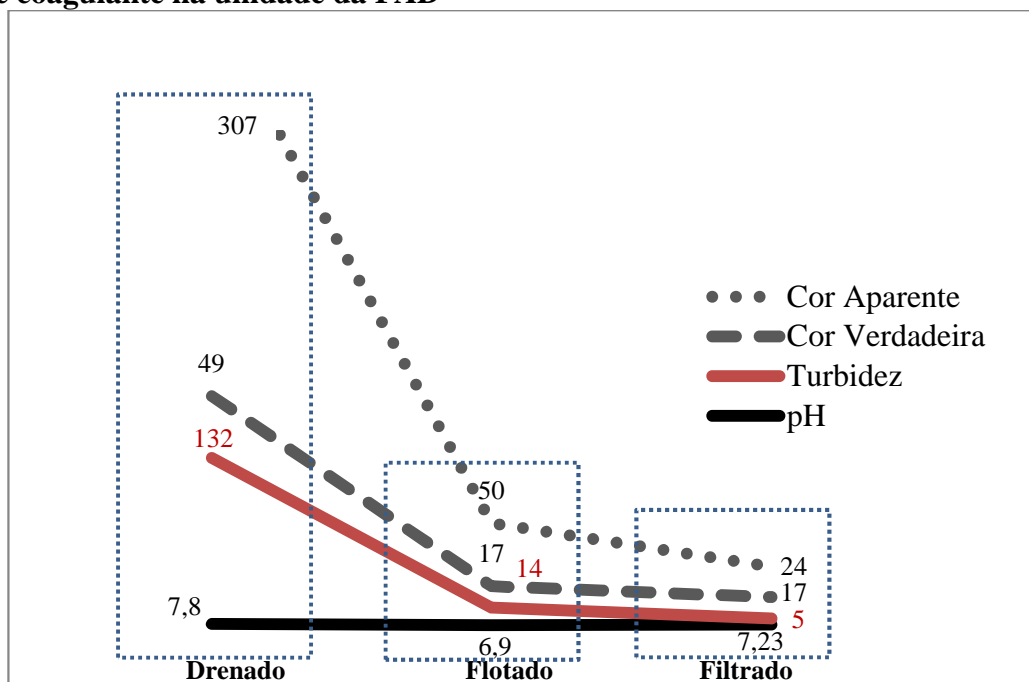
Os Gráficos 34, 35 e 36 demonstram a variação dos parâmetros físicos cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH, ao longo das unidades de tratamento utilizadas neste trabalho.

Considerando as unidades de leito de drenagem e flotação por ar dissolvido, verifica-se após a FAD redução de 83,7% da cor aparente, 89,4% da turbidez e 65,3% da cor verdadeira. Estes resultados expressam a eficiência da unidade da FAD na remoção de sólidos presentes na amostra do drenado.

Quando consideradas as unidades de flotação por ar dissolvido e filtração (*FAD > Filtração*), verifica-se remoção de 50% da cor aparente e 92,8% da turbidez nas saídas dos Filtros 02 e 03. Na saída do Filtro 01 a cor aparente reduziu 52%. A cor verdadeira nas saídas

dos três filtros manteve-se constante. As substâncias dissolvidas que conferem cor às amostras, não foram retidas nos meios filtrantes utilizados.

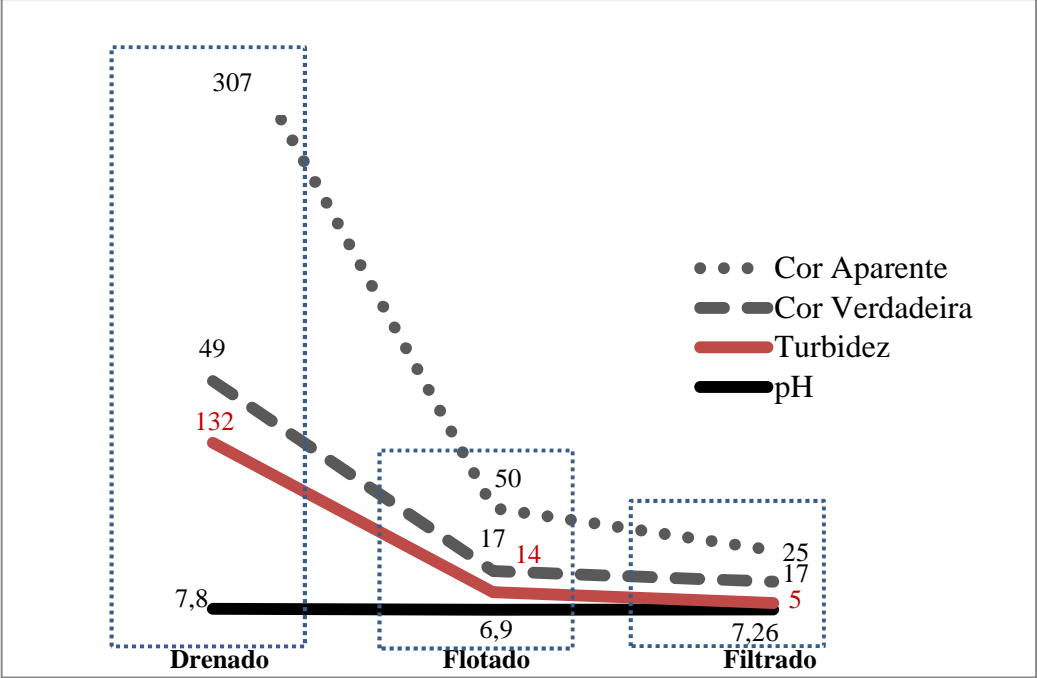
Gráfico 34 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-31, efluente da FAD e efluente do Filtro 01, sobre a influência de 10,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

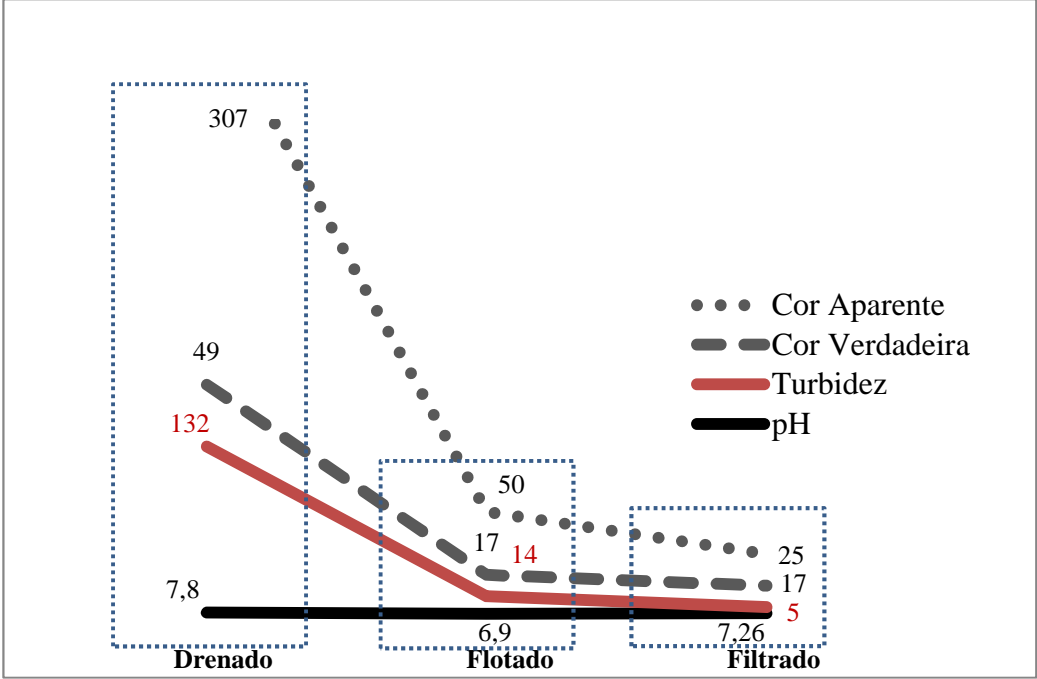
Nas unidades de leito de drenagem, flotação por ar dissolvido e filtração ($LD > FAD > Filtração$) a remoção da turbidez nas saídas dos três filtros foi 96,2%. A cor aparente foi reduzida em 92,1% na saída do Filtro 01 e 91,8% nas saídas dos Filtros 02 e 03. Estes valores expressam a eficiência de todo sistema na remoção de sólidos suspensos presentes no drenado.

Gráfico 35 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-31, efluente da FAD e efluente do Filtro 02, sobre a influência de 10,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Gráfico 36 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT- 31, efluente da FAD e efluente do Filtro 03, sobre a influência de 10,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

5.3.9 Manta RT-31 – DSA 15,0 mg/L

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos dos parâmetros físicos cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH, após as unidade FAD e Filtração. Foi adicionado na FAD, 15 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante. Os resultados destas análises podem ser observados nas Tabelas 34 e 35.

Tabela 34 - Parâmetros analisados nas saídas dos jarros - RT-31 - DSA 15 mg/L

<i>Parâmetros</i>	<i>Jarro 01</i>	<i>Jarro 02</i>	<i>Jarro 03</i>
Cor Aparente (UC)	47		
Cor Verdadeira (UC)	16		
Turbidez (UNT)	13		
pH	6,9		

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Tabela 35 - Parâmetros analisados nas saídas dos filtros - RT-31 - DSA 15 mg/L

<i>Parâmetros</i>	<i>Filtro 01</i>	<i>Filtro 02</i>	<i>Filtro 03</i>
Cor Aparente (UC)	23	22	23
Cor Verdadeira (UC)	16	15	16
Turbidez (UNT)	4	4	4
pH	7,24	7,25	7,26

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

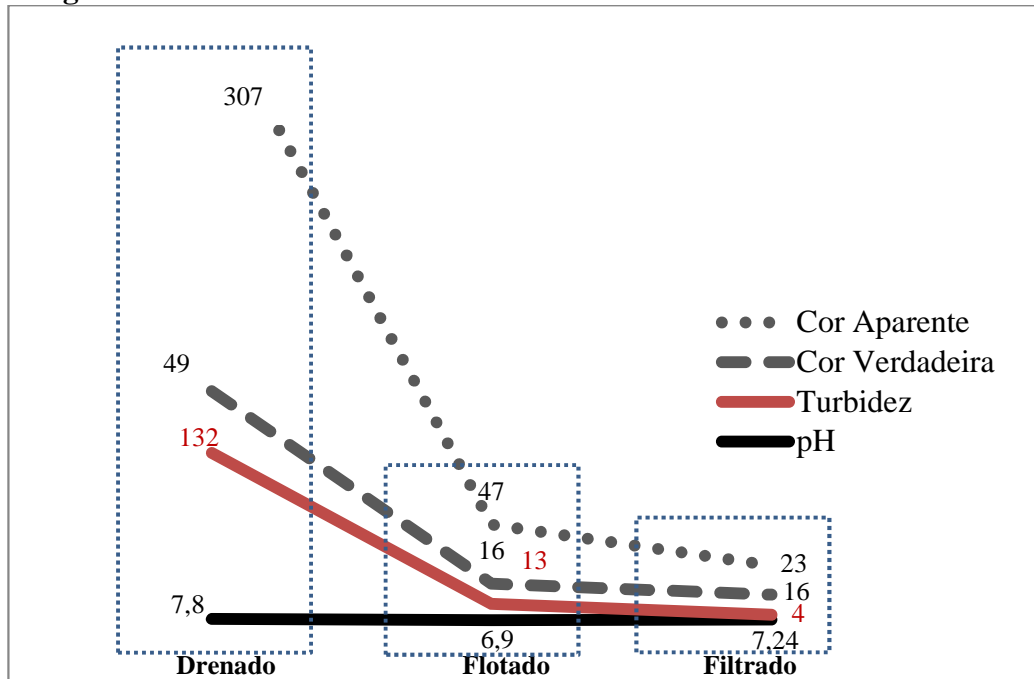
Os Gráficos 37, 38 e 39, mostram o comportamento dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira e turbidez em todas as unidades constituintes do sistema.

Considerando as unidades de leito de drenagem e flotação por ar dissolvido (*LD > FAD*), verifica-se após a FAD remoção de 84,6% da cor aparente, 90,1% da turbidez e 67,3% da cor verdadeira. Esta redução é devida a eficiência da unidade de FAD na remoção de sólidos pela formação de flocos e agregados.

Quando consideradas as unidades de flotação por ar dissolvido e filtração (*FAD > Filtração*), referentes aos Filtros 01 e 03, verifica-se remoção de 51,1% da cor aparente e 69,2% da turbidez. Após o Filtro 02, esta remoção foi de 53,1% e 69,2%, respectivamente. A

cor verdadeira nas saídas dos três filtros manteve-se constante. Como nos outros ensaios, não houve remoção de cor verdadeira nas unidades de filtração.

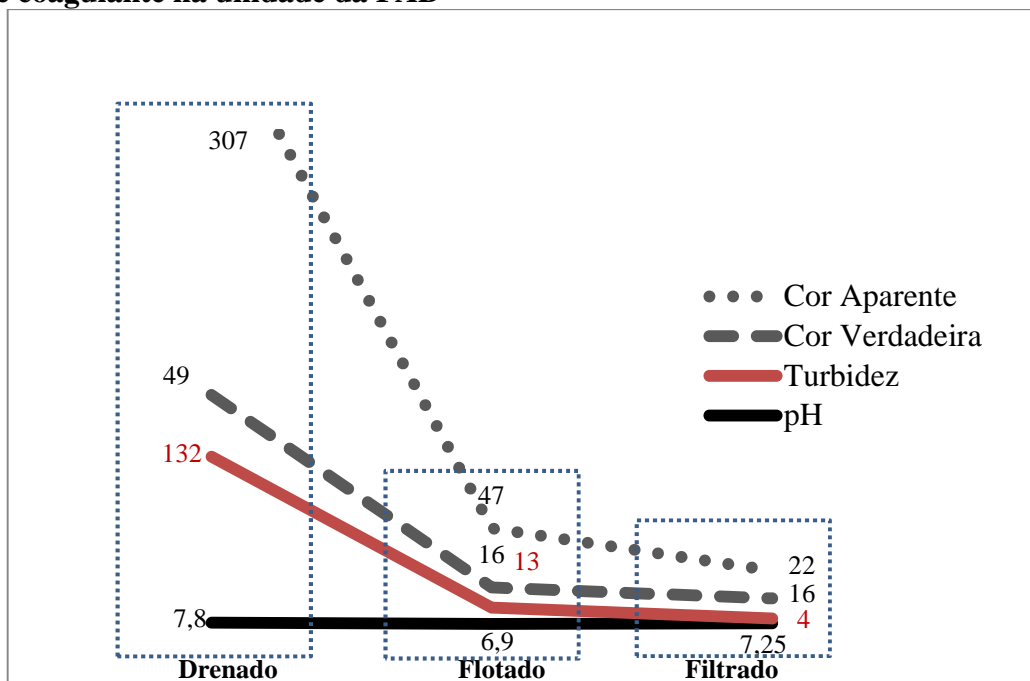
Gráfico 37 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-31, efluente da FAD e efluente do Filtro 01, sobre a influência de 15,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

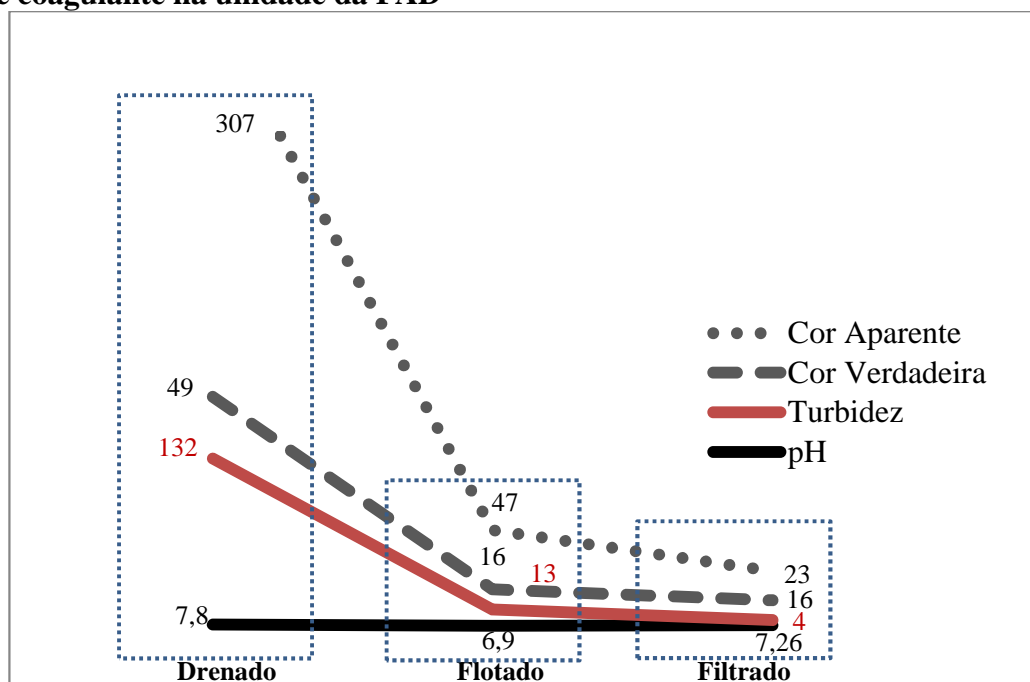
Nas unidades de leito de drenagem, flotação por ar dissolvido e filtração ($LD > FAD > Filtração$) a remoção da turbidez nas saídas dos três filtros foi 96,9%. A cor aparente neste sistema removeu 92,5% nas saídas dos Filtros 01 e 03. Na saída do Filtro 02 esta remoção foi de 92,8%. Estes valores expressam a eficiência de todo sistema na remoção de sólidos suspensos presentes no drenado.

Gráfico 38 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-31, efluente da FAD e efluente do Filtro 02, sobre a influência de 15,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Gráfico 39 - Valores dos parâmetros cor aparente, cor verdadeira, turbidez e pH medidos para o efluente do LD composto com a manta RT-31, efluente da FAD e efluente do Filtro 03, sobre a influência de 15,0 mg/L de Sulfato de Alumínio como agente coagulante na unidade da FAD



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ideia central deste trabalho foi avaliar a possibilidade de se utilizar um sistema compacto de tratamento de água, altamente empregado na área de saneamento, para tratamento de água de lavagem de filtros e lodo de decantadores de ETAs. Para tanto foi utilizado o sistema de Leito de Drenagem seguido por Flotação por Ar Dissolvido, reconhecidamente eficiente na remoção de material particulado, e filtração, ambos em escala de bancada. Para verificação desta ideia, conforme discutido no texto, foram conduzidos, inicialmente, experimentos sem adição de coagulante na FAD e, posteriormente, foram conduzidos experimentos com dosagem de 5 mg/L, 10 mg/L e 15 mg/L de sulfato de alumínio. Esperava-se, e os dados obtidos confirmaram, que haveria uma boa eficiência de tratamento mesmo sem adição de coagulante. De fato, este tipo de efluente (água de lavagem de filtro + lodo de decantador) é altamente rico em metais, no caso deste estudo, o alumínio, o que favorece a floculação e o sucesso posterior das etapas seguintes. O Apêndice 3 traz um resumo de todos os resultados obtidos. Apesar de haver remoção de turbidez e cor sem adição de coagulante é notada uma melhora nos resultados com sua utilização, produzindo água de elevada qualidade, considerando-se os parâmetros monitorados. Ressalta-se que esta configuração mostrou-se promissora, é possível que seja uma boa alternativa à recirculação de água no próprio sistema, e certamente ao lançamento em curso de água, entretanto, estudos mais aprofundados devem ser conduzidos, principalmente no que diz respeito à segurança sanitária da água produzida se o objetivo for o uso potável. Sugere-se a utilização de outros coagulantes, variação mais ampla dos parâmetros envolvidos nos processos e, principalmente, ampliação de escala.

Com base nos estudos realizados com os equipamentos projetados e testados neste trabalho, concluiu-se que:

- A caracterização quanto aos parâmetros físicos, químicos e biológicos da mistura do lodo do decantador com água de lavagem dos filtros da ETA estudada, possibilitou perceber que este resíduo não pode ser lançado diretamente nos corpos d'água, haja vista que os valores encontrados estão bem acima do que é permitido pelas legislações vigentes;
- A caracterização quanto aos parâmetros físicos do drenado das três mantas utilizadas neste trabalho (RT-21, RT-26 e RT-31), possibilitou avaliar a eficiência dos leitos

de drenagens na retenção da cor aparente. Valores de turbidez nas três mantas trabalhadas sofreram redução de 98% a 99% de retenção quando comparados com os valores encontrados na amostra bruta da mistura do lodo do decantador com água de lavagem dos filtros;

Etapa I - Ensaios sem adição de agente coagulante

- Os valores de turbidez ficaram acima dos valores máximos permitidos determinados pela Portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011, como padrão de potabilidade que é de 0,5 UNT para filtração rápida e 1,0 UNT para filtração lenta. Porém quando utilizado o drenado da manta RT-21 nas saídas dos três filtros e o drenado da manta RT-26 nas saídas dos Filtros 01 e 02, os valores encontrados mantiveram dentro do limite máximo permitido ao longo da rede de distribuição da concessionária de água que é de 5 UNT;

- Quando submetido o drenado da manta RT-21 no *jartest*, percebe-se uma redução de 69% da cor aparente na saída do jarro. Nas saídas dos três Filtros esta redução foi de 90%. A turbidez na saída do jarro apresentou eficiência na remoção de 54% e de 96% na saída do Filtro 01. Isto comprova que mesmo sem adição de agente coagulante externo na FAD, o sistema demonstrou eficiência na remoção da cor aparente tanto nas saídas dos jarros como nas saídas dos filtros. Este filtro foi o que demonstrou melhor desempenho, tanto com o drenado da manta RT-21, como com o drenado da manta RT-26;

- Quando comparados os valores da cor verdadeira nas amostras de todos os ensaios realizados na Etapa I, com o estabelecido na resolução CONAMA 357/2005, verifica-se que estas amostras poderiam ser descartadas diretamente nos cursos de água;

- O drenado da manta RT-31 foi o que apresentou o pior desempenho. A turbidez passou de 132 UNT na saída do leito para 87 UNT nas saídas dos jarros e 28 UNT na saída do Filtro 01. Isto representa uma redução na turbidez de 79% em todo sistema. Mesmo com os resultados apontado para o pior desempenho de todos os ensaios realizados nesta etapa, verifica-se uma significativa redução dos sólidos presentes nas amostras;

- Tanto na Etapa I como na Etapa II, o pH ficou dentro da faixa de 6,0 a 9,5 recomendada pela mesma portaria para o sistema de distribuição;

- O equipamento de floteste (*jartest* modificado) mostrou-se importante para a execução de estudos visando a remoção da cor aparente presentes nas amostras trabalhadas, mesmo sem a aplicação de agente coagulante externo na FAD;

- A flotação seguida de filtração utilizando como meio filtrante areia de granulometrias 0,42 mm , proporcionou resultados melhores na remoção de turbidez quando comparados os resultados utilizando grãos de areia de 1,19 mm;

Etapas II - Ensaios com adição de agente coagulante

- Trabalhou-se com concentrações diferentes de solução de sulfato de alumínio (5 mg/L, 10 mg/L e 15 mg/L). As condições apropriadas para coagulação obtidas foram de dosagem de sulfato de alumínio de 15 mg/L e pH de coagulação em torno de 6,8 para o drenado da manta RT-26 Filtro 02. A redução na turbidez em todo o sistema foi de 99,6%. A cor aparente nos jarros e no meio filtrante do Filtro 02 foi de 96,4%. A cor verdadeira passou de 29 UC nas saídas dos leitos para 4 UC nas saídas dos jarros e Filtro 02. Esta redução foi de pouco mais de 86%. Todos esses parâmetros estão dentro dos limites de potabilidade da água determinada pela portaria do Ministério da Saúde nº 2.914/2011;

- O estudo das condições de mistura rápida nas duas etapas (I e II) mostrou-se importante para a escolha do tempo e gradiente de velocidade apropriados utilizados neste trabalho;

- A taxa de recirculação de ar aqui trabalhada (R=10%), foi suficiente e eficiente na remoção de sólidos suspensos e dissolvidos presentes nas amostras dos drenados;

- Através das duas etapas desenvolvidas neste trabalho, foi possível comprovar o desempenho e a eficiência do sistema composto por LD-FAD-Filtração, no entanto, são necessários mais estudos sobre o tema, diante do contexto político e ambiental dos últimos anos, os quais exigem providências das ETAs para a garantia da manutenção e preservação do meio ambiente, com destaque para os recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

ACHON, C. L.; CORDEIRO, J. S. **Gerenciamento de lodo de ETAs - Remoção de água livre através de Leitos de secagem e Lagoas**. Anais. Joinvile: 22º.Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental , 2003.

ADIN, A. (1999). Particle Characteristics: **a Key Factor in Effluent Treatment and Reuse**. *Water Science and Technology*, v 40, n 4-5, pp 67-74.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA) 2005a.**Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.Standard Methods on line**. 2005. Section 9060.Samples. Disponível em: <<http://www.standardmethods.org>>. Acesso em 15 de janeiro de 2014.

AMIRTHARAJAH, A. (1988). **Some Theoretical and Conceptual Views of Filtration**.*Journal of the Water Works Association*, v 80, pp 36-46.

AMIRTHARAJAH, A. & MILLS, K. M. (1982).**Rapid-Mix Design for Mechanism of Alum Coagulation**. *Journal of the Water Works Association*, v. 74, n. 4, pp 210-216.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004**: Resíduos sólido - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.216**: Projeto de Estação de Tratamento de Água para abastecimento público. Rio de Janeiro, 1992.

BABATUNDE A. O., ZHAO Y. Q. Constructive Approaches Toward Water Treatment Works Sludge Management: **An International Review of Beneficial Reuses**. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, v. 37, n. 2, p. 129-164, 2007.

BARROSO, M. M. **Influencia das micro e macropropriedades dos lodos de Estações de Tratamento de Águas no desaguamento por LD**. 2007. 249f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR), São Carlos, 2007.

BRAGA, Benedito et al. **Introdução à Engenharia Ambiental**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005. 318 p.

BRASIL. Lei nº9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Lex**: Política Nacional de Recursos Hídricos, 1997.

BRASIL. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. **Lex**: Crimes Ambientais, 1998.

BRASIL. Lei nº12.305, de 2 de agosto de 2010. **Lex**: Política Nacional de Resíduos Sólidos, 2010.

BRASIL. Portaria do Ministério da Saúde nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011. **Lex**: Ministro de Estado da Saúde, no uso das atribuições que lhe conferem os incisos I e II do parágrafo único do art. 87 da Constituição Federativa do Brasil. Dispõe sobre os

procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

CARNEIRO A. L. S., DINIZ H. N., SILVA V. H. A., JUNIOR N. G. P., MENDES C. G. N. **Avaliação dos aquíferos da cidade de Jacareí - SP, através da caracterização hidrogeológica de poços tubulares profundos.** Anais. Campo Grande/MS: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005.

CIKUREL, H. REBHUM, M., AMIRTHARAJAH, A. & ADIN, A. (1996). **Wastewater Effluent reuse by In-line Flocculation Filtration Process.** *Water Science Technology*, vol. 33, n. 10-11, pp. 203-211.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução no357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Lex:** Diário Oficial da União, n.053, p. 58-63, 2005.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA, 2011.

CORDEIRO J. S. **O problema dos lodos gerados em decantadores de estações de tratamento de águas.** 1993. 342f. Tese (doutorado)- Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), São Carlos, 1993.

CORDEIRO J. S., SALES A., POSSATO J. F., COSTA C. R., SOUZA F. R., ACHON C. L., BUTLER A. M., FREITAS A. A. Remoção de água de lodo de ETAs através de leitos de secagem modificados e incorporação da fase sólida em matrizes de cimento inclusive com o reaproveitamento do entulho de construção. 282p. Separata de: ANDREOLI C. V. **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. PROSAB 2 – TEMA IV.** Rio de Janeiro, 2001.

DI BERNARDO, L. **Algas e suas influências na qualidade das águas e nas tecnologias de tratamento.** ABES, Rio de Janeiro, 2001.

DI BERNARDO, LUIZ; DANTAS, ÂNGELA DI BERNARDO. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água** – segunda edição / volume 1 – São Carlos: RiMa, 792p., 2005.

DI BERNARDO, L; PAZ, L. P. S. **Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água.** ABES, Rio de Janeiro. 1ª edição, 2008.

EDZWALD, J. K. (1995). **Principles and Applications of Dissolved Air Flotation.** *Water Science and Technology*, v 31, n 3-4, pp 1-23.

FONTANA, A. O. **Sistema de LD e Sedimentador como solução para redução de volume de lodo de Decantadores e Reuso de água de Lavagem de Filtros** – Estudo de Caso – ETA Cardoso. 2004. 164f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR), São Carlos, 2004.

GHOSH, M., AMIRTHARAJAH, A. and ADIN, A. (1994). **Particle Destabilization for Tertiary Treatment of Municipal Wastewater by Filtration**. *Water Science and Technology*, vol 30, n. 9, pp. 209-218.

HAHN, H. H. (1982). Wastewater Treatment. In: **The Scientific Basis of Flotation** (K.J. Ives, editor). Martinus Nijhoff, USA, 1984.

HAMODA, M. F.; AL-GHUSAIN, I. & AL-MUTAIRI, N. Z. (2004). **Sand Filtration of Wastewater for Tertiary Treatment and Water Reuse**. *Desalination*, v. 164, pp 203-211.

LUNDH, M.; JONSSON, L.; DAHLQUIST, J. **The Influence of Contact Zone Configuration on the Flow Structure in a Dissolved Air Flotation Pilot Plant**. *Water Research*, v. 36, p. 1585-1595, 2002.

Malley Jr., J.P. and Edwald, J.K. (1991), Laboratory comparison of DAF with conventional treatment, **Journal AWWA**, Sept. 1991, 56-61.

MARTEL C. J. Dewaterability of freeze-thaw conditioned sludges. **Journal WPCF**, v. 61, n. 2, p. 237-241, 1989.

MINAS GERAIS. Lei nº13.199, de 29 de janeiro de 1999. **Lex:Política Estadual de Recursos Hídricos**, 1999.

MOTT G. J., ROMANOW S. Sludge characterization, removal and dewatering. **Journal of Hazardous Materials**, n. 29, p. 127-140, 1992.

OLIVEIRA, A. L. **Floto-Filtração como pós-tratamento do efluente de reator anaeróbio tratando esgoto sanitário**. 2007. 233 f. Tese (Doutorado-Programa de Pós-Graduação em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2007.

REALI M. A. P. **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água - PROSAB**. Rio de Janeiro : ABES, 240 p, 1999.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água**. Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 2001.

SANTOS, Bruna. **Avaliação da aplicação do sistema de Leito de Drenagem como tratamento de lodo da estação de tratamento de água Bom Jardim em Uberlândia-MG**. Dissertação de Mestrado, 2012.

SPERLING, Marcos Von. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Editora UFMG, Belo Horizonte, 2014.

THÉRIAULT, S. M. **The use of Geotextile Membranes for the dewatering of Aerobically Digested Sludge**. 1991.11f. Dissertação (Mestrado): The University of New Brunswick, Canadá, 1991.

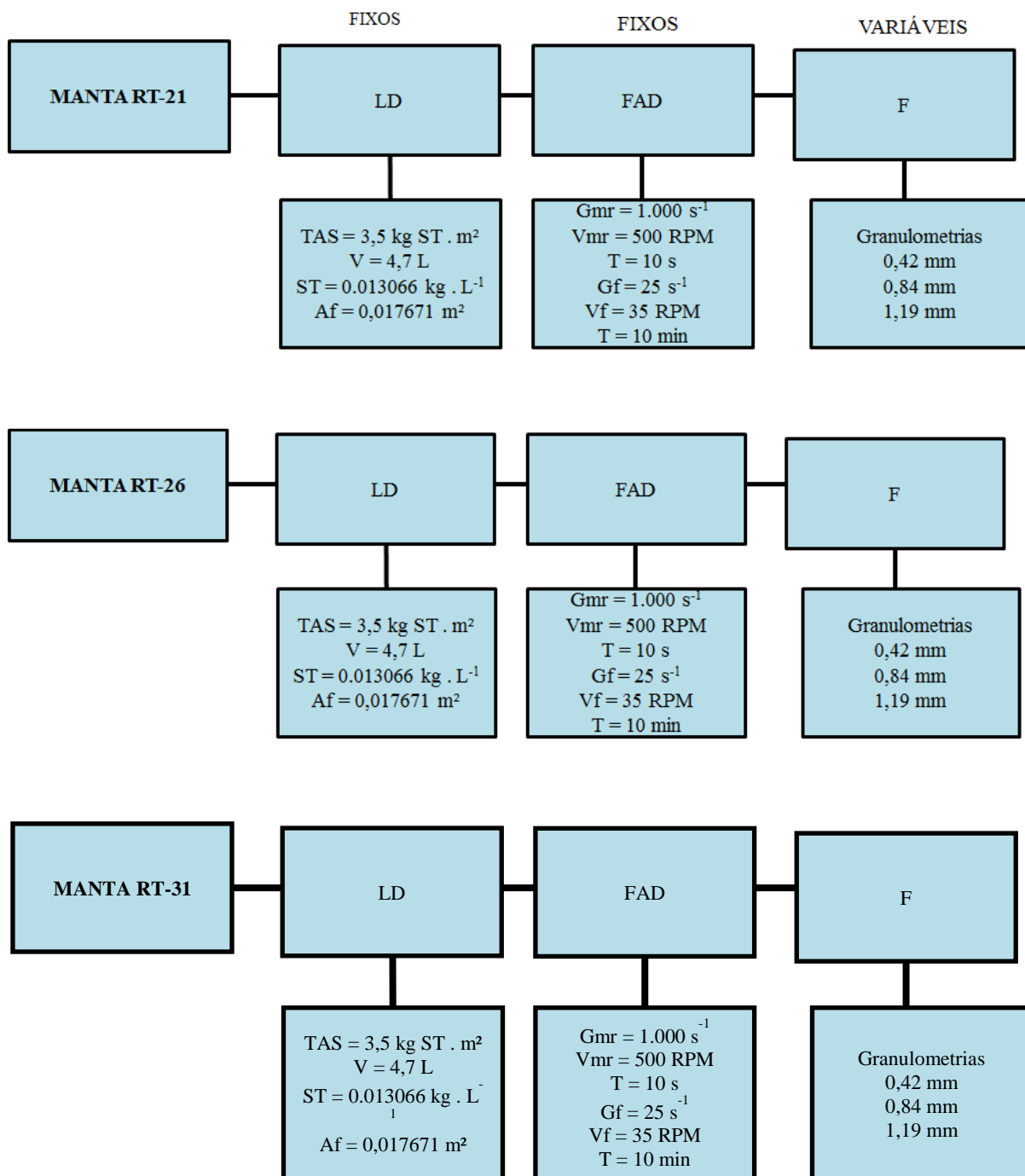
TIEHM, A.; HERWIG, V. & NEIS, U. (1999). **Particle Size Analysis for Improved Sedimentation and Filtration in Wastewater Treatment**. *Water Science and Technology*, vol. 39, n. 8, pp. 99-106.

VLASKI, A.; VAN BREEMEN, N. A. & ALAERTS, G. J. (1997). **The Role of Particle Size and Density in Dissolved Air Flotation and Sedimentation.** *Water Science and Technology*, v 36, n 4, pp 177-189.

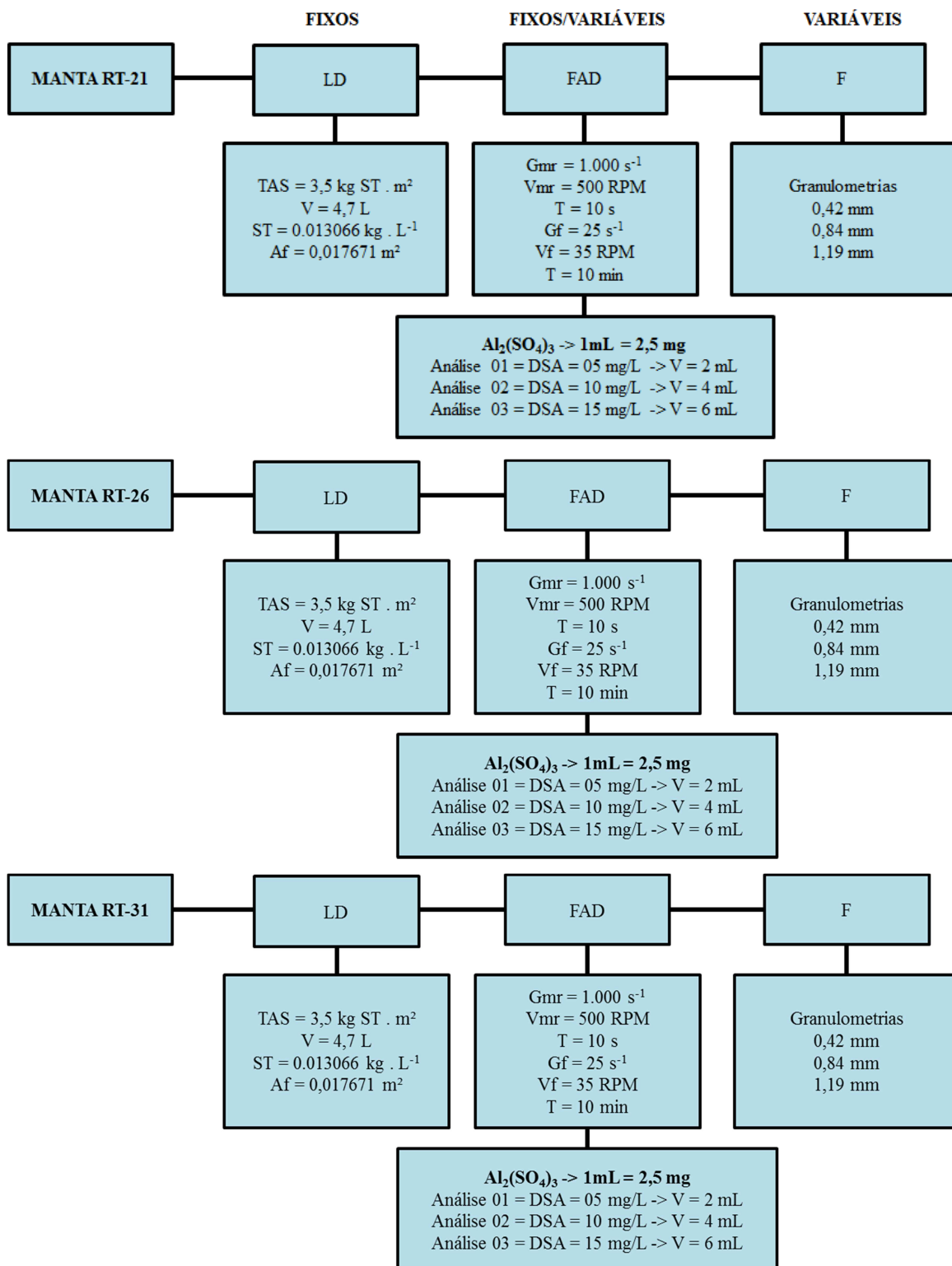
ZABEL (1985). The Advantages of Dissolved Air Flotation for Water Treatment. *Journal AWWA*, pp 42-46.

Apêndices

Apêndice 1 – Resumo de todas as atividades realizadas com a unidade de Leito de Drenagem, Flotação por Ar Dissolvido e Filtração – Ensaios – Etapa I



Apêndice 2 – Resumo de todas as atividades realizadas com a unidade de Leito de Drenagem, Flotação por Ar Dissolvido e Filtração – Ensaios – Etapa II



Apêndice 3 – Resumo de todos os resultados encontrados nas duas etapas desenvolvidas neste trabalho

Sem coagulante	LD- RT21	Eficiências de remoção (%)							
		FAD	F1	F2	F3	LD>FAD	LD>FAD>F1	LD>FAD>F2	LD>FAD>F3
Cor Aparente (UC)	250	77	24	24	26	69	90	90	90
Cor Verdadeira (UC)	42	17	17	17	17	60	60	60	60
Turbidez (UNT)	72	33	3	3	5	54	96	96	93
pH	7,8	7,6	7,9	8,2	7,9				
	LD- RT26	FAD	F1	F2	F3	LD>FAD	LD>FAD>F1	LD>FAD>F2	LD>FAD>F3
Cor Aparente (UC)	281	42	23	24	26	85	92	91	91
Cor Verdadeira (UC)	29	17	17	17	17	41	41	41	41
Turbidez (UNT)	125	16	3	5	6	87	98	96	95
pH	7,9	7,9	8,4	8,2	8,3				
	LD- RT31	FAD	F1	F2	F3	LD>FAD	LD>FAD>F1	LD>FAD>F2	LD>FAD>F3
Cor Aparente (UC)	307	166	80	81	82	46	74	74	73
Cor Verdadeira (UC)	49	17	17	17	17	65	65	65	65
Turbidez (UNT)	132	87	28	22	20	34	79	83	85
pH	7,8	8,4	8,3	8,3	8,5				
5 mg/L de SA	LD- RT21	FAD	F1	F2	F3	LD>FAD	LD>FAD>F1	LD>FAD>F2	LD>FAD>F3
Cor Aparente (UC)	250	45	23	23	23	82	91	91	91
Cor Verdadeira (UC)	42	11	11	11	11	74	74	74	74
Turbidez (UNT)	72	14	2	2	2	81	97	97	97
pH	7,8	7,14	7,25	7,26	7,25				
	LD- RT26	FAD	F1	F2	F3	LD>FAD	LD>FAD>F1	LD>FAD>F2	LD>FAD>F3
Cor Aparente (UC)	281	16	13	12	12	94	95	96	96
Cor Verdadeira (UC)	29	6	6	6	6	79	79	79	79
Turbidez (UNT)	125	1	0,9	0,8	0,8	99	99	99	99
pH	7,9	6,9	7,23	7,26	7,26				
	LD- RT31	FAD	F1	F2	F3	LD>FAD	LD>FAD>F1	LD>FAD>F2	LD>FAD>F3
Cor Aparente (UC)	307	54	22	21	21	82	93	93	93
Cor Verdadeira (UC)	49	16	16	16	16	67	67	67	67
Turbidez (UNT)	132	13	10	10	9	90	92	92	93
pH	7,8	6,8	7,16	7,18	7,19				
10 mg/L de SA	LD- RT21	FAD	F1	F2	F3	LD>FAD	LD>FAD>F1	LD>FAD>F2	LD>FAD>F3
Cor Aparente (UC)	250	34	21	19	20	86	92	92	92
Cor Verdadeira (UC)	42	10	10	10	10	76	76	76	76
Turbidez (UNT)	72	10	2	2	2	86	97	97	97

pH	7,8	7,06	7,26	7,21	7,41				
	LD-RT26	FAD	F1	F2	F3				
Cor Aparente (UC)	281	13	12	12	12	95	96	96	96
Cor Verdadeira (UC)	29	3	3	3	3	90	90	90	90
Turbidez (UNT)	125	1	0,7	0,7	0,7	99	99	99	99
pH	7,9	6,8	7,23	7,26	7,26				
	LD-RT31	FAD	F1	F2	F3				
Cor Aparente (UC)	307	50	24	25	25	84	92	92	92
Cor Verdadeira (UC)	49	17	17	17	17	65	65	65	65
Turbidez (UNT)	132	14	5	5	5	89	96	96	96
pH	7,8	6,9	7,23	7,26	7,26				
15 mg/L de SA	LD-RT21	FAD	F1	F2	F3	LD>FAD	LD>FAD>F1	LD>FAD>F2	LD>FAD>F3
Cor Aparente (UC)	250	24	19	18	17	90	92	93	93
Cor Verdadeira (UC)	42	7	7	7	7	83	83	83	83
Turbidez (UNT)	72	7	1	1	1	90	99	99	99
pH	7,8	7,01	7,2	7,22	7,26				
	LD-RT26	FAD	F1	F2	F3				
Cor Aparente (UC)	281	12	9	10	9	96	97	96	97
Cor Verdadeira (UC)	29	4	4	4	4	86	86	86	86
Turbidez (UNT)	125	1	0,7	0,5	0,6	99	99	100	100
pH	7,9	6,8	7,24	7,25	7,26				
	LD-RT31	FAD	F1	F2	F3				
Cor Aparente (UC)	307	47	23	22	23	85	93	93	93
Cor Verdadeira (UC)	49	16	16	15	16	67	67	69	67
Turbidez (UNT)	132	13	4	4	4	90	97	97	97
pH	7,8	6,9	7,24	7,25	7,26				

