

WANDERLEI ELIAS PEREZ

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA FILTRAÇÃO EM MÚLTIPLAS
ETAPAS (FiME) NO TRATAMENTO DA ÁGUA DO RIBEIRÃO SOZINHA
EM GOIANÁPOLIS-ESTADO DE GOIÁS**

Goiânia/GO

- Agosto, 2009 -

WANDERLEI ELIAS PEREZ

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA FILTRAÇÃO EM MÚLTIPLAS
ETAPAS (FiME) NO TRATAMENTO DA ÁGUA DO RIBEIRÃO SOZINHA
EM GOIANÁPOLIS-ESTADO DE GOIÁS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia do Meio Ambiente da Universidade Federal de Goiás, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia do Meio Ambiente.

Área de Concentração: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Queija de Siqueira.

Goiânia/GO

- Agosto, 2009 -

WANDERLEI ELIAS PEREZ

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA FILTRAÇÃO EM MÚLTIPLAS
ETAPAS (FiME) NO TRATAMENTO DA ÁGUA DO RIBEIRÃO SOZINHA
EM GOIANÁPOLIS-ESTADO DE GOIÁS**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Engenharia do Meio Ambiente no Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia do Meio Ambiente da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, aprovada em 17 de agosto de 2009 pela seguinte Banca Examinadora:

Prof. Dr. Eduardo Queija de Siqueira – UFG
Presidente da Banca

Prof. Dra. Nora Kátia Saavedra del Águila – UFG
Examinador Interno

Prof. Dra. Cristina Célia Silveira Brandão – UNB
Examinadora Externa

À minha esposa Divina Lúcia e às minhas
filhas Wanessa, Larissa e Thaissa, e, em
especial, à minha neta Rafaela.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo amor sem limites.

Ao professor Eduardo Queija de Siqueira, pela orientação, dedicação e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

À professora Luiza Cintra, pela disposição em ler o trabalho e dar sugestões valiosas para seu desenvolvimento.

À professora Cristina Brandão, pela oportunidade de trabalhar com outra tecnologia de tratamento de água, ter disponibilizado a ETA piloto e por aceitar compor a banca avaliadora.

Aos professores do PPGEMA, pela dedicação e competência na transmissão dos conhecimentos durante o curso.

Aos professores José Emerenciano Grande e Antônio Pasqualetto, pelas cartas de recomendação.

Aos colegas da SANEAGO Washington Luiz Alves de Oliveira e Roberto Divino Martins, pelo apoio na operação e manutenção da ETA piloto durante os experimentos.

Aos funcionários do Laboratório Aqualit, pelo auxílio na realização das análises de água.

Ao professor do IFGO Geovani Batalhone, pela realização do ensaio de granulometria da areia.

À professora Nora Kátia Saavedra del Águila, pela atenção e disponibilidade, aceitando compor a banca avaliadora.

À mestranda Daniela Fonseca, pela parceria na operação da ETA piloto.

Agradecimento especial à Tecnóloga Luciana Inácio Pauletti, pelo profissionalismo, dedicação, competência e apoio durante a realização do trabalho.

À SANEAGO, pelo apoio na instalação e manutenção da ETA piloto durante todo período da pesquisa.

À EEC – UFG, pela oportunidade de realização da pesquisa.

Em especial, à minha esposa Divina Lúcia, minhas filhas Wanessa, Larissa e Thaissa, pelo carinho e por compartilhar todas as minhas dificuldades e angústias.

Enfim, à todas as pessoas que me acompanharam nessa jornada, em diferentes momentos, e que contribuíram para a concretização deste sonho com palavras de incentivo e amizade.

À todos meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

PEREZ, W.E. **Avaliação do desempenho da filtração em múltiplas etapas (FiME) no tratamento da água do Ribeirão Sozinha em Goianápolis - Estado de Goiás.** Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, 2009.

Este trabalho apresenta uma avaliação do desempenho de um sistema de Filtração em Múltiplas Etapas (FiME), em escala piloto, no tratamento da água bruta retirada do manancial superficial (Ribeirão Sozinha) que abastece a cidade de Goianápolis-GO. O arranjo da instalação utilizado nessa pesquisa constituiu de 1 pré-filtro dinâmico (PFD), 1 pré-filtro ascendente (PFA) e 2 filtros lentos, sendo um com areia (FLA) e outro com areia e carvão ativado granular (FLACAG). As taxas de filtração utilizadas foram de 24, 48, 24 e 24 m³/m².d para o PFD; 12, 18, 12 e 12 m³/m².d para o PFA; e 3, 4, 3 e 3 m³/m².d para o FLA e FLACAG. O desempenho de cada unidade foi avaliado quanto à remoção de cor, turbidez, ferro total, sólidos suspensos, oxigênio consumido, coliformes totais e termotolerantes, e o desenvolvimento da perda de carga. Os resultados obtidos demonstraram que o PFD e o PFA são unidades importantes na preparação da água afluente aos filtros lentos, possibilitando carreiras relativamente longas em função da retenção de partículas maiores, diminuindo consideravelmente a turbidez da água bruta. Os filtros lentos apresentaram eficiência superior a 90% na remoção de cor, turbidez, sólidos suspensos e ferro total, remoção de oxigênio consumido superior a 80% e de coliformes acima de 95%. Na última carreira de filtração foi realizada uma comparação da qualidade da água produzida pela tecnologia da FiME com a ETA de ciclo completo, na remoção de cor e turbidez, comprovando que a qualidade da água produzida na FiME é compatível com a qualidade da água produzida pela tecnologia de ciclo completo. De maneira geral, os filtros lentos apresentaram rendimento satisfatório na remoção de turbidez, ferro total e coliformes, sendo que o filtro lento com camada intermediária de carvão ativado granular foi mais eficiente na remoção de cor verdadeira e oxigênio consumido do que o filtro lento com camada simples de areia. Embora tenha ocorrido picos de cor e turbidez durante a quarta e última carreira de filtração, o sistema FiME mostrou-se eficiente na remoção de coliformes totais e termotolerantes nas três últimas semanas de operação. A verificação da existência de correlação na remoção de cor, turbidez, sólidos suspensos, oxigênio consumido, coliformes totais e termotolerantes, demonstrou a existência de uma boa correlação na remoção dos parâmetros cor e turbidez nos efluentes dos filtros lentos, apresentando um coeficiente de correlação igual a 0,92. Os resultados obtidos sugerem que o sistema FiME é eficiente no tratamento de águas superficiais com elevados teores de coliformes totais e termotolerantes e com picos de cor e turbidez, produzindo, quando operado adequadamente, água com baixos teores de cor, turbidez e bactérias do grupo coliforme, atendendo as recomendações da Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde, evidenciando a viabilidade de aplicação dessa tecnologia na produção de água para consumo humano.

Palavras-chaves: Filtração em múltiplas etapas, pré-filtro dinâmico, pré-filtro ascendente, filtros lentos.

ABSTRACT

PEREZ, W.E. **Evaluation of the Efficiency of a Multi-Stage Filtration System in Treating Water of the Sozinha Creek in Goianópolis, State of Goiás, Brazil.** MSc. Dissertation, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, 2009.

This work presents an evaluation of the performance of a multi-stage filtration system (FiME) in pilot-plant scale to treat surface water from the Ribeirão Sozinha stream which supplies the city of Goianópolis-GO, Brazil. The arrangement of the installation used in this study consisted of a dynamic roughing filter (PFD), a up-flow roughing filter (PFA) and two slow sand filters, being one with sand (FLA) and the other with sand and granular activated carbon (FLACAG). The filtration rates varied from 24 to 48 m³/m².d in the PFD, 12 to 18 m³/m².d in the PFA, and 3 to 4 m³/m².d in the FLA and FLACAG. The performance of each unit was evaluated for removal of color, turbidity, total iron, suspended solids, oxygen consumption, total coliforms and E.coli, and the development of headloss. Results showed that the PFD and PFA are important units in the preparation of affluent water to the slow sand filters, allowing relatively long filtration runs resulted from the removal of larger particles by these units, reducing significantly the turbidity of raw water. The slow sand filters presented larger than 90% of removal efficiency of color, turbidity, suspended solids and total iron, removal over 80% of consumed oxygen and above 95% for coliforms removal. Overall, the slow sand filters showed satisfactory performance in removing turbidity, iron and total coliforms. In particular, the slow sand filter with sand and granular activated carbon layers was more efficient in removing true color and consumed oxygen than the filter with single sand layer. Although peaks of color and turbidity during the fourth and last filtration runs, the FiME system proved to be efficient in removing total coliforms and E.coli in the last three weeks of operation. In the last filtration run, a comparison of the effluent water quality between the FiME system and a conventional full scale treatment plant was carried out for the removal of turbidity and color. Results showed that the FiME system produced similar water quality to the conventional treatment plant when turbidity was < 1,0. In general, results suggest that the FiME is an effective system to produce water quality from surface water with high levels of total coliforms and E.coli and peaks of color and turbidity according to the recommendations of the Portaria 518/2004 of the Ministry of Health, Brazil.

Keywords: Multi-stage filtration, dynamic roughing filter, up-flow roughing filter, slow sand filters.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1: Gráfico do número de habitantes por município no Estado de Goiás	23
FIGURA 2.1: Esquema de unidades de pré-tratamento (Di Bernardo, L; DANTAS, A.D.B. 2005)	29
FIGURA 2.2: Esquema de filtração em múltiplas etapas (Di Bernardo, L; DANTAS, A.D.B. 2005)	30
FIGURA 2.3: Ilustração de um pré-filtro dinâmico de pedregulho (Di Bernardo, L; DANTAS, A.D.B. 2005)	31
FIGURA 2.4: Ilustração de um pré-filtro ascendente (PROSAB, 1999)	35
FIGURA 2.5: Ilustração de um filtro lento (Di Bernardo, L; DANTAS, A.D.B. 2005)	39
FIGURA 3.1: Vista da instalação com FiME piloto em paralelo com a ETA convencional em Goianápolis.....	57
FIGURA 3.2: Estação piloto com FiME em Goianápolis	57
FIGURA 3.3: Sistema completo da FiME piloto e da experiência realizada.....	58
FIGURA 3.4: Configuração da ETA convencional e do sistema de FiME implantado em Goianápolis (CAMPLESI, 2009)	59
FIGURA 3.5: Ribeirão Sozinha.....	60
FIGURA 3.6: Poço de sucção instalado na captação de água bruta.....	60

FIGURA 3.7: Valores de turbidez e cor da água bruta do Ribeirão Sozinha.....	60
FIGURA 3.8: Pré-filtro dinâmico – dimensões (em metros)	61
FIGURA 3.9: Imagem do pré-filtro dinâmico.....	61
FIGURA 3.10: Pré-filtro ascendente – dimensões (em metros).....	63
FIGURA 3.11: Imagem do pré-filtro ascendente	63
FIGURA 3.12: Filtro lento – dimensões (em metros)	65
FIGURA 3.13: Imagem dos filtros lentos	65
FIGURA 3.14: Curva de distribuição granulométrica.....	66
FIGURA 4.1: Gráfico da variação da perda de carga.....	74
FIGURA 4.2: Valores de cor na 1ª carreira de filtração.....	76
FIGURA 4.3: Valores de turbidez na 1ª carreira de filtração.....	76
FIGURA 4.4: Valores de sólidos suspensos na 1ª carreira de filtração	78
FIGURA 4.5: Valores de oxigênio consumido na 1ª carreira de filtração	80
FIGURA 4.6: Valores de ferro total na 1ª carreira de filtração.....	81
FIGURA 4.7: Valores de coliformes totais na 1ª carreira de filtração	83
FIGURA 4.8: Valores de coliformes termotolerantes na 1ª carreira de filtração.....	83

FIGURA 4.9: Valores de cor na 2ª carreira de filtração.....	85
FIGURA 4.10: Valores de turbidez na 2ª carreira de filtração.....	86
FIGURA 4.11: Valores de ferro total na 2ª carreira de filtração.....	86
FIGURA 4.12: Valores de oxigênio consumido na 2ª carreira de filtração	87
FIGURA 4.13: Valores de sólidos suspensos na 2ª carreira de filtração	87
FIGURA 4.14: Valores de coliformes totais na 2ª carreira de filtração	89
FIGURA 4.15: Valores de coliformes termotolerantes na 2ª carreira de filtração.....	90
FIGURA 4.16: Valores de cor na 3ª carreira de filtração.....	92
FIGURA 4.17: Valores de turbidez na 3ª carreira de filtração.....	92
FIGURA 4.18: Valores de sólidos suspensos na 3ª carreira de filtração	93
FIGURA 4.19: Valores de ferro total na 3ª carreira de filtração.....	94
FIGURA 4.20: Valores de oxigênio consumido na 3ª carreira de filtração	94
FIGURA 4.21: Valores de coliformes totais na 3ª carreira de filtração	96
FIGURA 4.22: Valores de coliformes termotolerantes na 3ª carreira de filtração.....	96
FIGURA 4.23: Valores de cor na 4ª carreira de filtração.....	99
FIGURA 4.24: Valores de turbidez na 4ª carreira de filtração.....	99

FIGURA 4.25: Valores de sólidos suspensos na 4ª carreira de filtração	100
FIGURA 4.26: Valores de ferro total na 4ª carreira de filtração	101
FIGURA 4.27: Valores de oxigênio consumido na 4ª carreira de filtração	102
FIGURA 4.28: Valores de coliformes totais na 4ª carreira de filtração	103
FIGURA 4.29: Valores de coliformes termotolerantes na 4ª carreira de filtração	103
FIGURA 4.30: Comparação do sistema FiME com a ETA convencional	104
FIGURA 4.31: Correlação entre a remoção de turbidez e cor	105
FIGURA 4.32: Boxplot dos dados de remoção de turbidez no FLA e no FLACAG	106
FIGURA 4.33: Boxplot dos dados de remoção de cor no FLA e no FLACAG	107
FIGURA 4.34: Boxplot dos dados de remoção de ferro no FLA e no FLACAG	107
FIGURA 4.35: Boxplot dos dados de remoção de coliformes totais no FLA e no FLACAG	108
FIGURA 4.36: Boxplot dos dados de remoção de coliformes termotolerantes no FLA e no FLACAG	108
FIGURA 4.37: Boxplot dos dados de remoção de cor em alta e baixa turbidez	109
FIGURA 4.38: Boxplot dos dados de remoção de ferro em alta e baixa turbidez	110
FIGURA 4.39: Boxplot dos dados de remoção de coliformes totais em alta e baixa turbidez	110
FIGURA 4.40: Boxplot dos dados de remoção de coliformes termotolerantes em alta e baixa turbidez	111

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1: Atividades de operação e manutenção do pré-filtro dinâmico (DI BERNARDO <i>et al.</i> , 1999).....	33
TABELA 2.2: Atividades de operação e manutenção do pré-filtro ascendente (DI BERNARDO <i>et al.</i> , 1999)	36
TABELA 2.3: Desempenho de filtros lentos (VERAS, 1999 – modificado)	41
TABELA 2.4: Qualidade da água recomendável para tratamento por filtração lenta (DI BERNARDO <i>et al.</i> , 1999).....	41
TABELA 2.5: Atividades de operação e manutenção do filtro lento (DI BERNARDO <i>et al.</i> , 1999).....	42
TABELA 3.1: Composição granulométrica do pré-filtro dinâmico.....	62
TABELA 3.2: Composição granulométrica do pré-filtro ascendente	64
TABELA 3.3: Composição granulométrica dos filtros lentos	66
TABELA 3.4: Composição granulométrica dos filtros lentos com carvão.....	67
TABELA 3.5: Parâmetros de qualidade da água, métodos e equipamentos utilizados, sendo a frequência de amostragem semanal	69
TABELA 4.1: Período e duração das carreiras avaliadas	71

TABELA 4.2: Valores mínimos e máximos da água bruta durante as quatro carreiras de filtração	72
TABELA 4.3: Coeficiente de correlação Pearson com base nas variáveis analisadas.....	72
TABELA 4.4: Tabela de Rugg para aquilatar os valores do coeficiente de correlação de Pearson	73
TABELA 4.5: Taxa de filtração e vazão para as diferentes unidades do sistema adotadas durante a 1ª, 2ª, 3ª e 4ª carreira de filtração	73
TABELA 4.6: Perda de carga na 1ª carreira de filtração.....	75
TABELA 4.7: Perda de carga na 2ª carreira de filtração.....	84
TABELA 4.8: Perda de carga na 3ª carreira de filtração.....	90
TABELA 4.9: Perda de carga na 4ª carreira de filtração.....	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAIP	Carvão Ativado Impregnado com Prata.
CAG	Carvão Ativado Granular.
CAP	Carvão Ativado em Pó.
cm	Centímetro.
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente.
CorA	Cor Afluente
CorE	Cor Efluente
CteA	Coliformes termotolerantes Afluente
CteE	Coliformes termotolerantes Efluente
CtoA	Coliformes totais Afluente
CtoE	Coliformes totais Efluente
d	Dia.
DDT	Dicloro Difenil Tricloroetano.
DL	Dosagem Letal.
DQO	Demanda Química de Oxigênio.
EEC	Escola de Engenharia Civil.
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos.
ETA	Estação de Tratamento de Água.
Fe	Ferro.
FeA	Ferro Afluente
FeE	Ferro Efluente
FiME	Filtração em Múltiplas Etapas.
FL	Filtro Lento
FLA	Filtro Lento de Areia
FLACAG	Filtro Lento de Areia e Carvão Ativado Granular.
h	Hora.
Hab	Habitantes.
H ₂ O ₂	Água Oxigenada.
IAE	Inibição da Atividade Enzimática.

Km	Quilômetro.
L	Litro.
m	Metro.
m ²	Metro Quadrado.
m ³	Metro Cúbico.
mm	Milímetro.
mg	Miligrama.
mL	Mililitro.
Mn	Manganês.
NMP	Número Mais Provável.
O ₃	Ozônio.
PFA	Pré-filtro Ascendente.
PFD	Pré-filtro Dinâmico.
PFPAC	Pré-filtração em Pedregulho com Escoamento Ascendente em Camadas.
PFPAS	Pré-filtração em Pedregulho com Escoamento Ascendente em Série.
pH	Potencial Hidrogeniônico.
PPGEMA	Programa de Pós-Graduação <i>Stricto Sensu</i> em Engenharia do Meio Ambiente.
ppm	Parte por Milhão.
PROSAB	Programa de Pesquisas em Saneamento Básico.
s	Segundo.
SANEAGO	Saneamento de Goiás.
TuA	Turbidez Afluente
TuE	Turbidez Efluente
uC	Unidades de Cor.
UFG	Universidade Federal de Goiás.
UnB	Universidade de Brasília.
UNESP	Universidade Estadual Paulista.
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas.
USP	Universidade de São Paulo.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	20
1.1 INTRODUÇÃO.....	20
1.2 JUSTIFICATIVA	22
1.3 OBJETIVOS.....	23
1.3.1 Objetivo geral	23
1.3.2 Objetivos específicos.....	24
 CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1 FILTRAÇÃO EM MÚLTIPLAS ETAPAS (FiME)	25
2.1.1 Pré-tratamento	27
2.1.2 Unidades da FiME	29
2.1.3 Pré-filtro dinâmico (PFD).....	30
2.1.4 Pré-filtro ascendente (PFA).....	33
2.1.5 Filtração lenta (FL).....	36
2.1.6 Características da <i>Schmutzdecke</i>	43
2.1.7 Limitações da FiME	45
2.1.8 Desempenho da FiME	46
2.2 REMOÇÃO DE POLUENTES.....	49
2.2.1 Remoção de turbidez e sólidos totais	49
2.2.2 Remoção de microrganismos	50
2.2.3 Remoção de cor e matéria orgânica.....	54
2.3 USO DO CARVÃO ATIVADO GRANULAR	55
 CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS	57
3.1 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL	57
3.2 DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO	59
3.2.1 Captação	59
3.2.2 Pré-filtro dinâmico.....	61
3.2.3 Pré-filtro ascendente.....	62
3.2.4 Filtros lentos	64

3.3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO EXPERIMENTAL	67
3.3.1 Parâmetros de controle	68
3.3.2 Coleta e frequência de amostragem.....	69
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
4.1 INTRODUÇÃO.....	71
4.2 CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS	71
4.2.1 Primeira carreira de filtração	74
4.2.1.1 Cor verdadeira	75
4.2.1.2 Turbidez.....	76
4.2.1.3 Sólidos suspensos	78
4.2.1.4 Oxigênio consumido.....	79
4.2.1.5 Ferro total	80
4.2.1.6 Alcalinidade.....	81
4.2.1.7 Coliformes totais e termotolerantes.....	82
4.2.2 Segunda carreira de filtração	84
4.2.3 Terceira carreira de filtração.....	90
4.2.4 Quarta carreira de filtração	97
4.2.4.1 Comparação da ETA de ciclo completo e do sistema de FiME	104
4.2.5 Correlação de remoção	105
4.2.6 Análise estatística	106
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116