

RICARDO FIGUEIRA BIDONE

**TRATAMENTO DE LIXIVIADO DE ATERRO
SANITÁRIO POR UM SISTEMA
COMPOSTO POR FILTROS ANAERÓBIOS
SEGUIDOS DE BANHADOS
CONSTRUÍDOS:**

**Estudo de caso – Central de Resíduos do Recreio, em
Minas do Leão/RS**

2ª edição

Blucher

RICARDO FIGUEIRA BIDONE

**TRATAMENTO DE LIXIVIADO DE ATERRO
SANITÁRIO POR UM SISTEMA COMPOSTO
POR FILTROS ANAERÓBIOS SEGUIDOS DE
BANHADOS CONSTRUÍDOS:**

**Estudo de caso – Central de Resíduos do Recreio, em
Minas do Leão/RS**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia (Hidráulica e Saneamento).

Orientador: Prof. Titular Jurandyr Povinelli

Tratamento de lixo de aterro sanitário por um sistema composto por filtros anaeróbios seguidos de banhos construídos: estudo de caso – Central de Resíduos do Recreio, em Minas do Leão/RS

© 2017 Ricardo Figueira Bidone

Editora Edgard Blücher Ltda.

1ª edição – 2008

2ª edição – 2017

Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4º andar
04531-934 – São Paulo – SP – Brasil
Tel.: 55 11 3078-5366
contato@blucher.com.br
www.blucher.com.br

Segundo o Novo Acordo Ortográfico,
conforme 5. ed. do *Vocabulário
Ortográfico da Língua Portuguesa*,
Academia Brasileira de Letras, março
de 2009.

É proibida a reprodução total ou parcial
por quaisquer meios sem autorização
escrita da Editora.

Todos os direitos reservados pela
Editora Edgard Blücher Ltda.

Dados Internacionais de Catalogação
na Publicação (CIP)
Angélica Ilacqua CRB-8/7057

Bidone, Ricardo Figueira

Tratamento de lixo de aterro
sanitário por um sistema composto por
filtros anaeróbios seguidos de banhos
construídos : estudo de caso: Central
de Resíduos do Recreio, em Minas do
Leão/RS [livro eletrônico] / Ricardo
Figueira Bidone. - 2. ed. - São Paulo :
Blucher, 2017.

156 p. ; PDF

Bibliografia

ISBN 978-85-8039-148-0 (e-book)

1. Aterros sanitários 2. Banhos
construídos 3. Filtros anaeróbios
4. Lixo - tratamento I. Título.

16-0336

CDD 628.3

Índices para catálogo sistemático:
1. Tratamento de esgotos : Engenharia
sanitária

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Jurandyr Povinelli, por ter me oportunizado, como orientador, ricas experiências durante todo o mestrado na EESC.

Agradeço à Professora Maria do Carmo Calijuri, por ter intercedido por mim junto ao Programa de Pós-graduação em Hidráulica e Saneamento, fazendo valer a sua posição de Coordenadora, em um momento de dificuldade que enfrentei, acreditando no trabalho e garantindo a sua tranqüila conclusão.

Agradeço à SIL – Soluções Ambientais LTDA., em especial ao Engº Fernando Hartmann, seu Diretor Vice-Presidente, pela permissão de utilização dos dados gerados no aterro sanitário da Central de Resíduos do Recreio.

Agradeço ao Engº Adriano Locatelli da Rosa, Gerente de Operações da Central de Resíduos do Recreio, que não mediu esforços para viabilizar todo o necessário para esta pesquisa.

Agradeço de maneira especial aos técnicos do Laboratório de Saneamento.

Agradeço à Professora Ruth Gouvêa Duarte pelas várias sugestões.

Agradeço à CAPES/PROEX pela concessão da bolsa de estudos.

Agradeço, finalmente, a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

RESUMO

BIDONE, R.F. (2007). Tratamento de lixiviado de aterro sanitário por um sistema composto por filtros anaeróbios seguidos de banhados construídos: Estudo de caso – Central de Resíduos do Recreio, em Minas do Leão/RS. Dissertação de Mestrado. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A presente pesquisa abordou o estudo em escala real do tratamento de lixiviado de aterro sanitário em um sistema composto por dois filtros anaeróbios seguidos de dois banhados construídos. O trabalho foi desenvolvido na Estação de Tratamento de Lixiviado do aterro sanitário pertencente à Central de Resíduos do Recreio, localizada em Minas do Leão/RS. Pretendeu-se verificar a eficiência do sistema na remoção de matéria orgânica e de nitrogênio amoniacal. A Fase 1 da pesquisa, que avaliou o desempenho dos filtros anaeróbios quando operados em série, indicou que a quase totalidade da remoção de matéria orgânica facilmente biodegradável ocorreu no primeiro filtro, evidenciando que, para o tratamento do lixiviado em questão, não é interessante a utilização de dois filtros anaeróbios de fluxo ascendente semelhantes em série. A Fase 2 avaliou o desempenho dos filtros anaeróbios operados em paralelo e dos banhados construídos. Foi possível concluir-se que: filtros anaeróbios de fluxo ascendente são excelente alternativa para o tratamento de lixiviado de aterro sanitário, pois podem viabilizar remoções de matéria orgânica superiores a 50%; banhados construídos representam uma ecotecnologia interessante para o complemento do tratamento de lixiviado, pois podem viabilizar elevadas remoções de N-amoniacal.

Palavras-chave: tratamento de lixiviado, banhados construídos, filtros anaeróbios.

ABSTRACT

BIDONE, R.F. (2007). Sanitary landfill leachate treatment for a system composed by upflow anaerobic filters followed by constructed wetlands: Case study – Recreio Central Waste, in Minas do Leão/RS. M.Sc. Dissertation. School of Engineering at San Carlos, University of Sao Paulo, San Carlos, Brazil.

This study discussed the sanitary landfill leachate treatment in a full scale system composed by two upflow anaerobic filters followed by two constructed wetlands. The research was developed at the Landfill Leachate Treatment Station owned by Recreio Central Waste, located in Minas do Leão/RS. The objective of the study was to verify the efficiency of the system in the removal of organic matter and ammonia nitrogen. The Phase 1 of the study, which evaluated the performance of anaerobic filters when operated in series, indicated that almost all of the removal of organic matter readily biodegradable occurred in the first filter, showing that, for the treatment of leachate concerned, it is not interesting the use of two similar upflow anaerobic filters in series. The Phase 2 assessed the performance of the anaerobic filters, operated in parallel, and the constructed wetlands. It could be concluded that: upflow anaerobic filters are excellent alternative for the sanitary landfill leachate treatment, as they may facilitate removal of organic matter greater than 50%; constructed wetlands represent an interesting eco-technology to complement the leachate treatment, which can enable high removals of N-ammonia.

Keywords: sanitary landfill leachate treatment, constructed wetlands, anaerobic filters.

CONTEÚDO

Capítulo 1

INTRODUÇÃO	25
------------------	----

Capítulo 2

OBJETIVOS.....	27
2.1. Objetivo principal	27
2.2. Objetivos específicos	27

Capítulo 3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
3.1. Conceituação, geração e caracterização de lixiviado de aterro sanitário.....	29
3.2. Processos de tratamento de lixiviado de aterro sanitário.....	32
3.2.1. Remoção de amônia por aeração mecânica	33
3.2.2. Adsorção em carvão ativado	35
3.2.3. Processos de membrana.....	35
3.2.4. Evaporação.....	37
3.2.5. Aspersão sobre o solo	38
3.2.6. Coagulação, floculação, sedimentação ou flotação.....	39
3.2.7. Oxidação química.....	41
3.2.8. Processo foto-eletroquímico	42
3.2.9. Lagoas anaeróbias e lagoas facultativas	43
3.2.10. Tratamento conjunto em ETE.....	44
3.2.11. Recirculação de lixiviado.....	45
3.2.12. Tratamento em leito de vermicomposto	46
3.2.13. Processos biológicos aeróbios convencionais	46
3.2.13.1. Filtros percoladores	46

3.2.13.2. Contator biológico rotatório	48
3.2.13.3. Lagoas ou tanques de aeração mecânica	49
3.2.13.4. Lodos ativados	50
3.2.14. Processos biológicos anaeróbios convencionais	51
3.2.14.1. Reatores UASB	51
3.2.14.2. Filtros anaeróbios de fluxo ascendente	51
3.2.15. Banhados construídos	56
3.3. Padrão de emissão de efluentes	60
3.4. O Nitrogênio amoniacal e a Resolução N° 357	62
3.5. Filtros anaeróbios seguidos de banhados construídos: justificativas	63

Capítulo 4

MATERIAL E MÉTODOS	65
4.1. Descrição geral	65
4.2. Estação de tratamento de lixiviado proposta originalmente	67
4.3. Estação de tratamento de lixiviado reformulada	68
4.4. Caracterização dos filtros.....	70
4.4.1. Dimensões	70
4.4.2. Tempo médio de detenção hidráulica nos filtros	71
4.4.3. Abastecimento dos filtros.....	71
4.4.4. Construção dos filtros.....	72
4.5. Caracterização dos banhados.....	76
4.5.1. Considerações iniciais	76
4.5.2. Banhado de fluxo subsuperficial.....	76
4.5.3. Banhado de fluxo superficial.....	77
4.5.4. Operação dos banhados construídos.....	78
4.5.5. Construção dos banhados	78
4.6. Análises e exames.....	82
4.6.1. Ensaios de caracterização	82
4.6.2. Ensaios de controle	83

Capítulo 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO	85
5.1. Fase 1 – Filtros anaeróbios operados em série.....	85
5.2. Fase 2	92
5.2.1. Caracterização do lixiviado	92
5.2.2. Filtros anaeróbios operados em paralelo	93
5.2.2.1. DBO _{5,20} , DQO, COT.....	93
5.2.2.2. N-amoniaco	98
5.2.2.3. Ácidos voláteis	99
5.2.2.4. Alcalinidade total.....	99
5.2.2.5. Bactérias heterotróficas	99
5.2.3. Banhados construídos	100
5.2.3.1. DBO _{5,20} , DQO e COT.....	101
5.2.3.2. N-amoniaco	105
5.2.3.3. NTK	107
5.2.3.4. Nitrito	108
5.2.3.5. Nitrato	109
5.2.3.6. Registro fotográfico complementar.....	111
5.3. Investimento e custo operacional da CRR no tratamento	114
5.4. Intervenções estruturais já em execução no sistema de tratamento.....	115
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	117
SUGESTÕES	119
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	121
ANEXOS	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Remoção de DQO em reatores anaeróbios no tratamento de lixiviado	54
Tabela 3.2. Padrão de lançamento de efluente para fonte poluidora não-doméstica.....	61
Tabela 3.3. Concentrações máximas permitidas e eficiências mínimas exigidas na remoção de N-amoniacal e de fósforo total em lixiviados	61
Tabela 4.1. Ensaios usados na caracterização do lixiviado durante a Fase 2	83
Tabela 4.2. Ensaios usados no controle do lixiviado durante a Fase 1	84
Tabela 4.3. Ensaios usados no controle do lixiviado durante a Fase 2	84
Tabela 5.1. Caracterização expedita do lixiviado bruto (concentração em mg/L) *	85
Tabela 5.2. DBO _{5,20} , DQO, COT e eficiência média do primeiro filtro.....	86
Tabela 5.3. DBO _{5,20} , DQO, COT e eficiência média do segundo filtro.....	86
Tabela 5.4. Eficiência global média do sistema	86
Tabela 5.5. Caracterização do lixiviado do aterro	92
Tabela 5.6. Remoção de DBO _{5,20} no banhado de fluxo subsuperficial	102
Tabela 5.7. Remoção de DQO no banhado de fluxo subsuperficial.....	104
Tabela 5.8. Remoção de COT no banhado de fluxo subsuperficial	105
Tabela 5.9. Remoção de N-amoniacal no banhado	106
Tabela 5.10. Remoção de NTK no banhado	107
Tabela 5.11. Remoção de nitrito no banhado	109
Tabela 5.12. Remoção de nitrato no banhado	110

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1.	Descarga do material usado no recobrimento da massa de resíduos	66
Figura 4.2.	Vista de uma das enormes cavas de mineração existentes na área do aterro.....	66
Figura 4.3.	Vista das duas lagoas anaeróbias e das três lagoas facultativas	67
Figura 4.4.	Esquema das duas lagoas anaeróbias em série com as três lagoas facultativas.....	68
Figura 4.5.	Os dois filtros anaeróbios de fluxo ascendente (ao lado das três lagoas facultativas desativadas) e, na parte inferior da figura, os dois banhados construídos	69
Figura 4.6.	Fluxograma de funcionamento do sistema na Fase 1 da pesquisa.....	69
Figura 4.7.	Fluxograma de funcionamento do sistema na Fase 2 da pesquisa	70
Figura 4.8.	Corte esquemático dos filtros	71
Figura 4.9.	Tanque a partir do qual era bombeado o lixiviado até o divisor de águas do aterro.....	72
Figura 4.10.	(a) Vista geral da área de localização dos filtros. (b) Espalhamento de camada de areia sobre lona plástica amarela disposta, ainda, sobre manta de PEAD. (c) Sequência do espalhamento da camada de areia. (d) Começo da colocação de pranchas de madeira no fundo do filtro. (e) Sequência da colocação das pranchas de madeira sobre as quais foi colocado o leito filtrante. (f)	

Distribuição das pranchas de madeira no fundo da unidade.....	73
Figura 4.11. (a) Colocação da primeira camada de pedras (pedra-de-mão) na base dos filtros. (b) Etapa final de preenchimento do fundo dos filtros com pedra-de-mão. (c) Vista do fundo de um dos filtros com a base já preenchida. (d) Detalhe do fundo de um dos filtros. (e) Espalhamento da brita que constitui o horizonte de filtração. (f) Tubos que, durante o início da operação do sistema, introduziam o lixiviado no primeiro dos filtros.	74
Figura 4.12. (a) Estrutura partidora de vazão que foi utilizada no início da operação dos filtros. (b) Mangueiras que introduziam o lixiviado nos tubos alimentadores do primeiro filtro da série. (c) Caminhão-pipa descarregando o lixiviado em tubulação que se estendia até o partidor de vazão. (d) Ascensão da lâmina de lixiviado no filtro. (e) Vista do primeiro e do segundo filtro. (f) Estrutura partidora de vazão modificada, substituindo a distribuição inicial.....	75
Figura 4.13 No primeiro plano, os dois filtros anaeróbios e, ao fundo, as três lagoas facultativas (conjunto que compunha o sistema de tratamento originalmente)	75
Figura 4.14. Macrófita aquática da espécie <i>Typha subulata</i>	76
Figura 4.15. Corte esquemático do banhado de fluxo subsuperficial	77
Figura 4.16. Corte esquemático do banhado de fluxo superficial	77
Figura 4.17. (a) Vista do terreno onde foram executados os banhados. (b) Impermeabilização da base dos banhados. (c) Finalização do preenchimento com brita do banhado de fluxo subsuperficial.	79

Figura 4.18. (a) Vista das bases dos banhados. (b) Preparação do canal de alimentação do banhado de fluxo superficial. (c) Canal de alimentação do banhado de fluxo superficial concluído. (d) Detalhe da brita 1 utilizada no banhado de fluxo subsuperficial. (e) Coleta de mudas de macrófitas em banhado natural, dentro do próprio aterro. (f) Começo do plantio das macrófitas no banhado de fluxo sub superficial.....	80
Figura 4.19. (a) Detalhe de uma muda de <i>Typha subulata</i> . (b) Mudas plantadas no banhado de fluxo subsuperficial. (c) Vista dos dois banhados em fase de aclimação. (d) Vista da melhor adaptação das macrófitas no banhado de fluxo subsuperficial (ao fundo). (e) Transcorridos 4 meses desde o plantio, o banhado de fluxo superficial indica a dificuldade de adaptação do <i>Scirpus californicus</i>	81
Figura 4.20. (a) No banhado de fluxo subsuperficial a boa adaptação da <i>Typha</i> , 6 meses após o seu plantio. (b) Entre as duas unidades, o autor deste trabalho, evidenciando a diferença na adaptação das plantas de um banhado com relação ao outro.	81
Figura 5.1. Indicação da eficiência prevista (em vermelho) para filtro anaeróbio de fluxo ascendente com TDH = 3,8 d, na remoção de matéria orgânica de lixiviado.....	88
Figura 5.2. DQO durante a Fase 1	89
Figura 5.3. DBO _{5,20} durante a Fase 1	89
Figura 5.4. COT durante a Fase 1.....	90
Figura 5.5. Eficiências médias na remoção de DQO	90
Figura 5.6. Eficiências médias na remoção de DBO _{5,20}	91

Figura 5.7. Eficiências médias na remoção de COT	91
Figura 5.8. Remoção de DBO no FAFA 01.....	95
Figura 5.9. Remoção de DBO no FAFA 02.....	96
Figura 5.10. Remoção de COT no FAFA 01.....	96
Figura 5.11. Remoção de COT no FAFA 02.....	97
Figura 5.12. Remoção de DQO no FAFA 01	97
Figura 5.13. Remoção de DQO no FAFA 02	98
Figura 5.14. Concentrações de N-amoniaco e de NTK no lixiviado	108
Figura 5.15. Vistas dos banhados, em agosto de 2007	111
Figura 5.16. Vista das macrófitas do banhado de fluxo subsuperficial durante o inverno	112
Figura 5.17. Quatro amostras de lixiviado analisadas no Laboratório de Saneamento da EESC, em julho de 2007	112
Figura 5.18. Amostra de lixiviado coletada na saída do banhado de fluxo subsuperficial.....	113
Figura 5.19. (a) Lixiviado coletado na parte inicial do banhado; (b) Lixiviado coletado na parte central do banhado; (c) Lixiviado coletado na saída do banhado.....	114

LISTA DE ANEXOS

Tabela A1. Variáveis e metodologia analítica utilizada	125
Tabela A2. Remoção de DBO na FASE 1 da pesquisa	127
Tabela A3. Remoção de DQO na FASE 1 da pesquisa	130
Tabela A4. Remoção de COT na FASE 1 da pesquisa.....	133
Tabela A5. pH na FASE 1 da pesquisa	136
Tabela A6. Nitrogênio amoniacal na FASE 1 da pesquisa	137
Tabela A7. Sólidos totais na FASE 1 da pesquisa.....	139
Tabela A8. Remoção de DBO no FAFA 01 na Fase 2 da pesquisa.....	140
Tabela A9. Remoção de DBO no FAFA 02 na Fase 2 da pesquisa.....	141
Tabela A10. Remoção de DQO no FAFA 01 na Fase 2 da pesquisa.....	142
Tabela A11. Remoção de DQO no FAFA 02 na Fase 2 da pesquisa.....	143
Tabela A12. Remoção de COT no FAFA 01 na Fase 2 da pesquisa.....	144
Tabela A13. Remoção de COT no FAFA 02 na Fase 2 da pesquisa.....	145
Tabela A14. Concentração de N-amoniaco nos FAFAs na Fase 2 da pesquisa.....	146
Tabela A15. Ácidos voláteis nos FAFAs na Fase 2 da pesquisa	147
Tabela A16. Alcalinidade total nos FAFAs na Fase 2 da pesquisa.....	148

Tabela A17. Bactérias heterotróficas nos FAFAs na Fase 2 da pesquisa	149
Tabela A18. Série de sólidos na Fase 2 da pesquisa.....	150
Tabela A19. pH na Fase 2 da pesquisa.....	151
Tabela A20. Temperatura do ar na Fase 2 da pesquisa	152
Tabela A21. Fosfato total na Fase 2 da pesquisa.....	153
Tabela A22. Sulfato na Fase 2 da pesquisa	154
Tabela A23. Metais pesados na Fase 2 da pesquisa	154
Tabela A24. Coliformes fecais na Fase 2 da pesquisa	155

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Ac.acético	ácido acético
C	carbono
CAG	carvão ativado granular
CaCO_3	carbonato de cálcio
Cd	cádmio
Ca(OH)_2	hidróxido de cálcio (cal <i>extinta</i> ou cal <i>hidratada</i>)
CAP	carvão ativado em pó
Cr	cromo
CdS	sulfeto de cádmio
CH_4	metano
CO_2	dióxido de carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONSEMA	Conselho Estadual do Meio Ambiente (Rio Grande do Sul)
COT	carbono orgânico total
CRR	Central de Resíduos do Recreio
d	dia
D	Daltons
$\text{DBO}_{5,20}$	demanda bioquímica de oxigênio, medida após 5 dias sob temperatura de 20 °C
$\text{DBO}_{5,20}/\text{DQO}$	relação entre demanda bioquímica de oxigênio e demanda química de oxigênio
$\text{DBO}_{5,20}:\text{N:P}$	relação entre demanda bioquímica de oxigênio, nitrogênio e fósforo

DMLU	Departamento Municipal de Limpeza Urbana de Porto Alegre
DQO	demanda química de oxigênio
ETE	estação de tratamento de esgoto
EUA	Estados Unidos da América
FAFA 01	filtro anaeróbio de fluxo ascendente número 1
FAFA 02	filtro anaeróbio de fluxo ascendente número 2
FEPAM	Fundação Estadual de Proteção Ambiental (Rio Grande do Sul)
FIBGE	Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
FWS	<i>free water surface</i> (superfície líquida livre)
h	hora
ha	hectare
Hg	mercúrio
H ₂ S	ácido sulfídrico
kcal	quilocalorias
kN	quiloNewtons
L	litro
m	metro
m ²	metro quadrado
m ³	metro cúbico
mA/cm ²	micro Ampère por centímetro quadrado
mg	miligramas
min	minuto
mm	milímetro
N	nitrogênio
N-amoniacal	nitrogênio amoniacal
NaOH	hidróxido de sódio
NBR	Norma Brasileira

ND	não detectável
NH ₃	amônia gasosa
NH ₄ ⁺	íon amônio
Ni	níquel
Nm ³	metro cúbico de gás nas condições normais de temperatura e pressão
NMP/100 mL	número mais provável por cem mililitros
NO ₂ ⁻	ânion nitrito
NO ₃ ⁻	ânion nitrato
NTK	nitrogênio total de Kjeldahl
O ₂	oxigênio molecular
°C	graus Celsius
OR	osmose reversa
P	fósforo
Pb	chumbo
PE	Pernambuco
PEAD	polietileno de alta densidade
pH	potencial hidrogeniônico
PO ₄ ³⁻	ânion fosfato
PR	Paraná
PVC	cloreto de polivinila
rpm	rotações por minuto
RS	Rio Grande do Sul
RuO ₂	dióxido de rutênio
s	segundo
SABESP	Companhia de Saneamento Básico de São Paulo
SBQ	sistema de barreira bioquímica
SDT	sólidos dissolvidos totais
SO ₄ ²⁻	ânion sulfato

SSF	sólidos suspensos fixos
SSV	sólidos suspensos voláteis
SST	sólidos suspensos totais
ST	sólidos totais
STF	sólidos totais fixos
STV	sólidos totais voláteis
t	toneladas
TDH	tempo de detenção hidráulica
Ti	titânio
TiO ₂	dióxido de titânio
UFC	unidades formadoras de colônias
ZnO	óxido de zinco