

no 354 REPIDISCA

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO**

**TRATAMENTO BIOLÓGICO DE LÍQUIDOS PERCOLADOS GERADOS
EM ATERROS SANITÁRIOS UTILIZANDO REATOR ANAERÓBIO
COMPARTIMENTADO**

CLAUDIA REGINA CLARETO

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSÉ ROBERTO CAMPOS

DEDALUS - Acervo - EESC



31100017087

DISSERTAÇÃO apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, para obtenção do Título de Mestre em Hidráulica e Saneamento.



SÃO CARLOS/SP

Janeiro, 1997

Class.	TESE
Curr.	C.1515
Tombo	T094/97

Área: Hidráulica e Saneamento.

31100017087

at 0747827

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

C591t Clareto, Claudia Regina
Tratamento biológico de líquidos percolados gerados em aterros sanitários utilizando reator anaeróbio compartimentado / Claudia Regina Clareto. -- São Carlos, 1997.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1997.
Orientador: Prof. Dr. José Roberto Campos

1. Líquidos percolados. 2. Tratamento anaeróbio. 3. Reator compartimentado. I. Título

✓

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO**

**TRATAMENTO BIOLÓGICO DE LÍQUIDOS PERCOLADOS GERADOS
EM ATERROS SANITÁRIOS UTILIZANDO REATOR ANAERÓBIO
COMPARTIMENTADO**

Ver como do papelão

CLAUDIA REGINA CLARETO



DISSERTAÇÃO apresentada à Escola de Engenharia de
São Carlos, Universidade de São Paulo, para obtenção
do Título de Mestre em Hidráulica e Saneamento.

SÃO CARLOS/SP

Janeiro, 1997

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em 01-4-1997
pela Comissão Julgadora:



Prof. Titular **JOSE ROBERTO CAMPOS (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Doutor **VALDIR SCHALCH**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Doutor **DEOVALDO DE MORAES JUNIOR**
(Universidade Federal de São Carlos - UFSCar)



Prof. Doutor **HARRY EDMAR SCHULZ**
Coordenador da Área de Hidráulica e Saneamento



JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

*Dedico este trabalho aos meus pais, Lázaro e
Neuza, às minhas irmãs, Vania e Sônia, à
minha sobrinha Mariana, ao Cid, à Inês e ao
Landinho.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. José Roberto Campos, pela orientação, incentivo e atenção durante o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

À FAPESP pela bolsa de estudos e pela verba auxílio de pesquisa.

À Capes pela bolsa de estudos.

Aos funcionários do Departamento de Limpeza Urbana (D.L.U.) de Campinas/SP, em especial ao Eng. Alexandre, à Eng^a Dinah e ao Sr. Jair Donizete, pelo fornecimento dos líquidos percolados e coleta de amostras.

Aos técnicos do laboratório de Saneamento, Paulo, Júlio, Cidinha e Miguel (*in memorian*), pela ajuda na realização das análises.

Às meninas da secretaria do Departamento de Hidráulica e Saneamento, Pavi, Sá, Valderez, Márcia e Cecília, por todos “galhos quebrados” no decorrer deste curso de mestrado.

Aos técnicos do laboratório de Hidráulica, Luís e Roberto, pela confecção do reator.

Ao Prof. Dr. Fazal Hussein Chaudry, pela tradução do resumo.

Às amigas Ângela Barreto, Susete Breviglieri, Jane Alves, Neide Pessin e ao amigo Edson Nour pela ajuda e contribuição no desenvolvimento do trabalho.

À minha família, em especial ao Cid, a Inês, a Valéria e Vovó Geralda, pelo apoio e compreensão dispensados.

Ao Landinho, amigo e companheiro, pela inestimável ajuda, carinho e incentivo na finalização do trabalho.

À CONFLORA, em especial ao Erides e ao João Paulo, amigos que contribuíram na digitação e na formatação final deste trabalho.

Aos meus pais, pelo amor e confiança.

A todos que contribuíram de alguma forma para realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	iii
LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE QUADROS.....	xi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xii
RESUMO.....	xiii
SUMMARY.....	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	6
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
3.1. GENERALIDADES.....	7
3.2. ATERROS SANITÁRIOS.....	8
3.3. LÍQUIDOS PERCOLADOS.....	13
3.4. REATORES COMPARTIMENTADOS PARA TRATAMENTO BIOLÓGICO.....	20
3.4.1. GENERALIDADES.....	20
3.4.2. PROCESSO ANAERÓBIO.....	21
3.5. TRATAMENTOS USUAIS DE LÍQUIDOS PERCOLADOS.....	28
4. METODOLOGIA.....	40
4.1. GENERALIDADES.....	40
4.2. ATERRO SANITÁRIO.....	41
4.3. LÍQUIDOS PERCOLADOS.....	45
4.4. DESCRIÇÃO DA MONTAGEM DE LABORATÓRIO.....	48

4.4.1. DESCRIÇÃO DO SISTEMA.....	48
4.4.2. CONSTRUÇÃO DO REATOR.....	53
4.5. OPERAÇÃO.....	54
4.5.1. ADAPTAÇÃO DO LODO.....	55
4.5.2. PARTIDA DO REATOR.....	57
4.5.3. OPERAÇÃO.....	57
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	60
5.1. INTRODUÇÃO.....	60
5.2. LÍQUIDOS PERCOLADOS EMPREGADOS.....	61
5.3. DESEMPENHO DO REATOR.....	63
5.3.1. 1ª ETAPA (θ_h DE 80 DIAS).....	64
5.3.2. 2ª ETAPA (θ_h DE 45 DIAS).....	70
5.3.3. 3ª ETAPA (θ_h DE 15 DIAS).....	75
5.4.4. 4ª ETAPA (θ_h DE 5 DIAS).....	80
5.4. INFLUÊNCIA DA TCO NA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DA DQO..	87
5.4.1. REATOR.....	87
5.4.2. CÂMARAS.....	90
5.5. ALGUNS COMENTÁRIOS SOBRE O DESEMPENHO DO REATOR ANAERÓBIO COMPARTIMENTADO.....	94
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	95
6.1. CONCLUSÕES.....	95
6.2. RECOMENDAÇÕES.....	98
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100
ANEXOS DE TABELAS.....	107

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 - Corte transversal do sistema de impermeabilização de fundo dos aterros sanitários.....	10
FIGURA 3.2 - Representação esquemática das interações do Aterro Sanitário.....	12
FIGURA 3.3 - Desenho esquemático do reator anaeróbio compartimentado.....	21
FIGURA 3.4 - Desenho esquemático de reator anaeróbio compartimentado em série com escoamento ascendente e descendente alternadamente.....	32
FIGURA 4.1 - Vista parcial do Aterro Sanitário Delta IA, mostrando os reservatórios onde os líquidos percolados foram coletado.....	32
FIGURA 4.2 - Foto mostrando etapa de formação de uma célula no Aterro Sanitário Delta IA: Compactação do resíduo com trator de esteira....	43
FIGURA 4.3 - Após a compactação do resíduo, este é recoberto por fina camada de terra. (fotografia de operação no Aterro Delta IA).....	44
FIGURA 4.4 - Construção de drenos horizontais de líquidos percolados: colocação da manta impermeabilizante antes da disposição do resíduo.....	44
FIGURA 4.5 - Foto de um dos reservatório onde os líquidos percolados foram coletados. Tais reservatórios possuem diâmetro de 1,20 m.....	45
FIGURA 4.6 - Local de coleta dos líquidos percolados no Aterro Sanitário Delta IA.....	46
FIGURA 4.7 - Vista frontal esquemática da instalação de laboratório.....	49
FIGURA 4.8 - Planta esquemática da instalação de laboratório.....	50
FIGURA 4.9 - Vista do reator anaeróbio compartimentado.....	52
FIGURA 4.10 - “Filtro” do reator anaeróbio compartimentado.....	53
FIGURA 4.11 - Montagem para adaptação do lodo anaeróbio.....	55
FIGURA 5.1 - Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de pH no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta.....	64
FIGURA 5.2 - Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Alcalinidade no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta.....	65

FIGURA 5.3 - Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de DQO no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta.....	65
FIGURA 5.4 - Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Ácidos Voláteis no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta.....	66
FIGURA 5.5 - Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Sólidos Totais no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta.....	66
FIGURA 5.6 - Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Sólidos Suspensos Totais no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta.....	67
FIGURA 5.7 - Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Sólidos Suspensos Voláteis no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta.....	67
FIGURA 5.8 - Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de pH no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta.....	70
FIGURA 5.9 - Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Alcalinidade no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta.....	71
FIGURA 5.10 - Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de DQO no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta.....	71
FIGURA 5.11 - Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Ácidos Voláteis afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta.....	72
FIGURA 5.12 - Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Sólidos Totais no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta.....	72
FIGURA 5.13 - Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Sólidos Suspensos Totais no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta.....	73
FIGURA 5.14 - Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Sólidos Suspensos Voláteis no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta.....	73
FIGURA 5.15 - Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de pH no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta.....	76
FIGURA 5.16 - Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Alcalinidade no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta.....	76

FIGURA 5.17 - Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de DQO no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta.....	77
FIGURA 5.18 - Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Ácidos Voláteis no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta.....	77
FIGURA 5.19 - Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Sólidos Totais no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta.....	78
FIGURA 5.20 - Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Sólidos Suspensos Totais no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta.....	78
FIGURA 5.21 - Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Sólidos Suspensos Voláteis no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta.....	79
FIGURA 5.22 - Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de pH no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta.....	81
FIGURA 5.23 - Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Alcalinidade no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta.....	82
FIGURA 5.24 - Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de DQO no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta.....	82
FIGURA 5.25 - Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Ácidos Voláteis no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta.....	83
FIGURA 5.26 - Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Sólidos Totais no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta.....	83
FIGURA 5.27 - Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Sólidos Suspensos Totais no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta.....	84
FIGURA 5.28 - Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Sólidos Suspensos Voláteis no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta.....	84

- FIGURA 5.29 - Reator Anaeróbio Compartimentado: Eficiência na remoção da DQO em relação à TCO média aplicada nos diversos θ_h testados durante o experimento.....88
- FIGURA 5.30 - Eficiência na remoção da DQO em relação à TCO empregada, nos diversos θ_h testados durante o experimento. Valores encontrados para Câmara 1.....90
- FIGURA 5.31 - Eficiência na remoção da DQO em relação à TCO empregada, nos diversos θ_h testados durante o experimento. Valores encontrados para Câmara 2.....91
- FIGURA 5.32 - Eficiência na remoção da DQO em relação à TCO empregada, nos diversos θ_h testados durante o experimento. Valores encontrados para Câmara 3.....91
- FIGURA 5.33 - Eficiência na remoção da DQO em relação à TCO empregada, nos diversos θ_h testados durante o experimento. Valores encontrados para Câmara 4.....92

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1. Comparação na composição de líquido percolado de acordo com a idade do aterro sanitário, situados no Canadá.....	16
TABELA 3.2. Variação na composição de líquidos percolados gerados em aterros sanitários de diferentes locais e idades.....	18
TABELA 3.3. Valores máximos de concentração de ácidos voláteis encontrados em líquidos percolados gerados em aterros sanitários jovens (fase acidogênica).....	19
TABELA 3.4. Dados sobre o desempenho de reator compartimentado híbrido para diferentes taxas de carregamento orgânico (TCO).....	26
TABELA 3.5. Composição do líquido percolado gerado em aterro sanitário contendo herbicidas fenólicos e clorofenóis.....	35
TABELA 4.1. Características do líquido percolado gerado no aterro sanitário Delta IA.....	47
TABELA 4.2. Características do reator compartimentado.....	51
TABELA 5.1. Comparação do desempenho do Reator Anaeróbio Compartimentado (RAC) com o de outros reatores.....	89
TABELA A.1: Valores de pH no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ_h de 80 dias.....	107
TABELA A.2: Valores de Alcalinidade no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ_h de 80 dias.....	107
TABELA A.3: Valores de DQO no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ_h de 80 dias.....	107
TABELA A.4: Valores de Ácidos Voláteis no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ_h de 80 dias.....	108

TABELA A.5: Valores de Sólidos Totais no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 80 dias.....	108
TABELA A.6: Valores de Sólidos Suspensos Totais no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 80 dias.....	108
TABELA A.7: Valores de Sólidos Suspensos Voláteis no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 80 dias.....	108
TABELA A.8: Valores de pH no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 45 dias.....	109
TABELA A.9: Valores de Alcalinidade no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 45 dias.....	109
TABELA A.10: Valores de DQO no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 45 dias.....	109
TABELA A.11: Valores de Ácidos Voláteis no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 45 dias.....	109
TABELA A.12: Valores de Sólidos Totais no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 45 dias.....	110
TABELA A.13: Valores de Sólidos Suspensos Totais no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 45 dias.....	110
TABELA A.14: Valores de Sólidos Suspensos Voláteis no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 45 dias.....	110
TABELA A.15: Valores de pH no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 15 dias.....	110

TABELA A.16: Valores de Alcalinidade no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 15 dias.....	111
TABELA A.17: Valores de DQO no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 15 dias.....	111
TABELA A.18: Valores de Ácidos Voláteis no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 15 dias.....	111
TABELA A.19: Valores de Sólidos Totais no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 15 dias.....	111
TABELA A.20: Valores de Sólidos Suspensos Totais no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 15 dias.....	112
TABELA A.21: Valores de Sólidos Suspensos Voláteis no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 15 dias.....	112
TABELA A.22: Valores de pH no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 5 dias.....	112
TABELA A.23: Valores de Alcalinidade no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 5 dias.....	112
TABELA A.24: Valores de DQO no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 5 dias.....	113
TABELA A.25: Valores de Ácidos Voláteis no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 5 dias.....	113
TABELA A.26: Valores de Sólidos Totais no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 5 dias.....	113

TABELA A.27: Valores de Sólidos Suspensos Totais no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ_h de 5 dias.....	113
TABELA A.28: Valores de Sólidos Suspensos Voláteis no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ_h de 5 dias.....	114
TABELA A.29: Desempenho do Reator Anaeróbio Compartimentado na eficiência de remoção da DQO em relação à TCO média aplicada, nos θ_h empregados durante o experimento.....	114
TABELA A.30: Desempenho do Reator Anaeróbio Compartimentado na eficiência de remoção da DQO em relação à TCO média aplicada, nos θ_h empregados durante o experimento. Valores encontrados na Câmara 1.....	115
TABELA A.31: Desempenho do Reator Anaeróbio Compartimentado na eficiência de remoção da DQO em relação à TCO média aplicada, nos θ_h empregados durante o experimento. Valores encontrados na Câmara 2.....	116
TABELA A.32: Desempenho do Reator Anaeróbio Compartimentado na eficiência de remoção da DQO em relação à TCO média aplicada, nos θ_h empregados durante o experimento. Valores encontrados na Câmara 3.....	117
TABELA A.33: Desempenho do Reator Anaeróbio Compartimentado na eficiência de remoção da DQO em relação à TCO média aplicada, nos θ_h empregados durante o experimento. Valores encontrados na Câmara 4.....	118

LISTA DE QUADROS

QUADRO 3.1. Alguns estudos realizados para tratamento de líquidos percolados...	39
QUADRO 4.1. Parâmetros analisados e seus respectivos métodos para afluente e efluente.....	52
QUADRO 5.1. Valores de θ_h para cada câmara do reator, em relação ao θ_h global aplicado durante o experimento.....	93

LISTA DE SÍMBOLOS

θ_c -	Tempo de retenção celular, T
θ_h -	Tempo de detenção hidráulico, T
COT -	Carbono Orgânico Total, M.L ⁻³
DBO -	Demanda Bioquímica de Oxigênio, M. L ⁻³
DQO -	Demanda Química de Oxigênio, M.L ⁻³
N-Amoniacal -	Nitrogênio Amoniacal, M.L ⁻³
NTK -	Nitrogênio Total Kjeldhal, M.L ⁻³
Q -	Vazão, L ³ T ⁻¹
SST -	Sólidos Suspensos Totais, M.L ⁻³
SSV -	Sólidos Suspensos Voláteis, M.L ⁻³
ST -	Sólidos Totais, M.L ⁻³
TCO -	Taxa de Carregamento Orgânico, M.L ⁻³ .T ⁻¹
UASB -	Upflow Anaerobic Sludge Bed (Reator Anaeróbio de Manta de Lodo)

RESUMO

CLARETO, C.R. (1997) *Tratamento de líquidos percolados gerados em aterros sanitários utilizando reator anaeróbio compartimentado*. São Carlos, 1997. 119p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Este trabalho apresenta o estudo do tratamento de líquidos percolados gerados em um aterro sanitário jovem com DQO de aproximadamente 60.000 mg/l (Aterro Sanitário Delta IA - Campinas/SP) em reator anaeróbio compartimentado com tempo de detenção hidráulico (θ_h) de 80, 45, 15 e 5 dias e temperatura constante de $30 \pm 2^{\circ}$ C.

O reator, em escala de laboratório (10 l), constituiu de 4 câmaras em série, providas de chicanas e de sedimentadores em forma de tronco-piramidal invertido no fundo dessas. A primeira câmara possuía um volume maior para suportar as variações da carga afluyente e a última simulava um "filtro anaeróbio" com recheio de esferas de vidro. Apresentava também, tomadas para coleta de efluentes e tampa removível.

Resultados do tratamento foram analisados e constatou-se eficiência na remoção da DQO de 97% a 80%, para θ_h de 80 e 5 dias, respectivamente. A Taxa de Carregamento Orgânico (TCO) variou muito durante o experimento (0,3 a 11 kg DQO/m³ dia). A primeira câmara foi considerada o indicador do tratamento, suportando TCO de até 5 kg DQO/m³ dia, porém, para cargas acima de 12 kg DQO/m³ dia, notou-se fermentação com aumento da quantidade de ácidos voláteis e queda na eficiência de remoção da DQO para 5% (para TCO de 34 kg DQO/m³ dia), além de arraste do lodo. Concluiu-se que tal água residuária é passível de tratamento biológico anaeróbio porém, devido a alta concentração de matéria orgânica presente no efluente final, recomenda-se sistema aeróbio como pós-tratamento.

Palavras-chave: líquidos percolados, tratamento anaeróbio, reator compartimentado.

SUMMARY

CLARETO, C.R. *Treatment of landfill leachate using anaerobic baffled reactor.*
São Carlos, 1997. 118p. Master Dissertstion - Scholl of Engineering, University
of São Paulo, Brazil

This work presents a study of treatment process of landfill leachates produces by a new sanitary landfill (Aterro Sanitário Delta IA - Campinas/SP) with COD of approximately 60.000 mg/ℓ in an anaerobic reactor baffled at hydraulic detention times of 80; 45; 15 and 5 days and temperature of $30 \pm 2^{\circ}$ C. The laboratory scale reactor (10 ℓ) has 4 chambers in series equipped with baffles and settlers in the form of truncated inverted pyramid in the bottom. The first chamber is larger to contain variations of influent load and the last simulates an “anaerobic filter” with glass sphere filling. The reactor has sampling ports for effluent and has removable cover. Treatment results were analyzed and it was observed that the removal efficiency for COD varied from 97 to 80% for detention times from 80 to 5 days. The Organic Loading Rate (OLR) varied quite a bit during the experiment (0,3 - 11 kg COD/m³ day). The first chamber was considered an indicator of treatment process tolerating OLR of up to 5 kg COD/m³ day. However, for OLR of 12 kg COD/m³ day, fermentation was observed increasing the quantity of volatile acids and reducing the removal efficiency to 5% at OLR of 34 kg COD/m³ day, besides carrying sludge. It is concluded that the landfill leachates admits anaerobic biological treatment. However, it is recommended that it should be followed by an anaerobic treatment system when high concentration of organic matter is present.

Keywords: leachates, anaerobic treatment, baffled reactor

1. INTRODUÇÃO

Um dos sérios problemas ambientais que o Homem vem enfrentando é a grande produção de resíduos sólidos gerados em decorrência do aumento populacional, da industrialização e da concentração em centros urbanos. Grandes áreas são utilizadas para disposição de lixo e, quase sempre, em locais e de forma inadequados. Esta situação estimulou a realização de estudos de métodos mais adequados para o tratamento e disposição do lixo, a fim de diminuir os impactos ambientais provocados por este.

Uma das alternativas mais utilizadas é o aterro sanitário, onde o lixo é disposto em camadas compactadas e sobrepostas, recebendo cobertura diária de terra. Porém, tal sistema gera, como subprodutos, além dos resíduos digeridos, gases e chorume.

O chorume é formado em decorrência da digestão anaeróbia de matéria orgânica sólida por ação de exoenzimas produzidas pelas bactérias. No caso, a

função dessas enzimas é a de solubilizar matéria orgânica para que esta possa ser assimilada pelas células bacterianas. A água de chuva precipitada sobre aterros sanitários, bem como águas de nascentes, percolam através do lixo, diluem e carregam o chorume e a matéria orgânica dando origem aos líquidos percolados, que podem causar sérios problemas ambientais. A alta carga orgânica e a complexa composição desses líquidos podem comprometer a qualidade de águas na região de interferência dos aterros sanitários, seja através do deflúvio para corpos de água superficiais ou através da infiltração até lençóis subterrâneos.

A Resolução CONAMA nº 001/86 prevê a confecção de Estudo de Impacto Ambiental e de Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) para Aterros Sanitários. A CETESB, em seu Manual de Orientação sobre critérios de exigência de EIA/RIMA, prevê elaboração deste para quantidades acima de 100 t/dia e, para quantidades operadas entre 25 a 100 t/dia, a deliberação sobre a necessidade ou não de apresentação de EIA/RIMA fica a critério da Coordenadoria de Planejamento Ambiental/Secretaria do Meio Ambiente (CPLA/SMA). Porém, em todos os casos, tem-se que prever sistemas de tratamento de líquidos percolados independente da quantidade de resíduos aterrados. Esses sistemas tem importância fundamental na mitigação dos impactos ambientais provocados pela construção de aterros sanitários. Há, contudo, grande dificuldade em se definir parâmetros para projeto e execução de sistemas para tratamento de líquidos percolados, fato que vem sendo amplamente discutido pelos órgãos ambientais e por pesquisadores dessa área.

Esta situação, por si só, já justifica a proposição de uma linha de pesquisa para estudo de tratamento de líquidos percolados. O problema, contudo,

atinge importância tão elevada que até mesmo órgãos de controle ambiental têm procurado contato com Universidades objetivando encontrar soluções apropriadas.

(b) Na busca de informações sobre a situação dos líquidos percolados, observa-se que, no Brasil, poucos sistemas se encontram em atividade, sendo estes basicamente fundamentados em tratamento convencional, principalmente lagoas de estabilização ou aeradas, notando-se grande dificuldade em tratar tais líquidos, já que:

- têm alta concentração de material biodegradável, associada a grandes variações de concentração;

- o volume dos líquidos percolados produzidos em aterros sanitários é difícil de ser estimado, sendo esta função de ampla gama de variáveis, tais como: compactação do material de cobertura, altura da manta basal (destinada à atenuação da infiltração), tipo de cobertura, fatores climáticos, precipitação pluvial, entre outros;

- a composição dos líquidos percolados varia de aterro para aterro (em função, principalmente da própria idade do aterro e da composição do lixo), dificultando a padronização na obtenção de parâmetros;

- não há condições de se prever a composição e o volume dos líquidos percolados antes de um aterro estar em operação, impossibilitando o emprego de parâmetros pré-determinados em projetos semelhantes.

Poucos estudos foram desenvolvidos no Brasil visando o tratamento de líquidos percolados [FILSAN (1989), LIMA (1985)]. Alguns sistemas fundamentados em filtro anaeróbio ou lagoas são utilizados com o propósito de tratar

tais líquidos, assim como precipitação química e recirculação do percolado no aterro também têm sido objeto de estudos (LIMA, 1988, TEIXEIRA, 1992). Porém, ainda existe grande necessidade de se estudar o tratamento dos líquidos percolados, uma vez que se resta muito para se conhecer à respeito dos processos biológicos envolvidos na degradação dos componentes dos líquidos percolados e dos tipos de reatores mais adequados para esse fim.]

Por outro lado, o tratamento de águas residuárias está sendo, cada vez mais, investigado com a finalidade de se tratar efluentes com altas concentrações de matéria orgânica, diminuindo o tempo de detenção e o espaço ocupado pelo sistema de tratamento, uma vez que, para se efetivar o tratamento destes tipos de águas residuárias, são necessários períodos de detenção relativamente grandes para a biodegradação da matéria orgânica, além de ocorrerem sérios problemas em relação à cargas de choque oriundas de variações do afluente.

[Alguns estudos [FORESTI (1982); BOOPATHY e TILCHE, (1991)] destacam os reatores compartimentados como sendo aqueles mais eficientes no tratamento de águas residuárias com alta concentração de carga orgânica do que reatores de fase única. Em reatores compartimentados, há maior resistência a cargas de choque decorrentes das variações do afluente, visto que estes figuram-se como reatores em série, onde somente a primeira câmara é alimentada com o substrato original e as subsequentes são alimentadas com efluente da câmara anterior, separando o processo em etapas seqüenciais que podem facilitar a degradação da matéria orgânica.]

O uso de reatores em série beneficia potencialmente a seleção de grupos de microrganismos melhores adaptados responsáveis pela estabilização da matéria orgânica. Esta seleção diminui a competição entre os microrganismos melhorando o rendimento destes e, conseqüentemente, obtendo maior eficiência do reator. Além disso, a compartimentalização atenua a potencialidade de áreas tóxicas nas câmaras que se seguem.

Ao se estudar o tratamento de líquidos percolados – uma água residuária de alta concentração de material biodegradável – resultados de pesquisas com esse resíduo poderão, também, sob certos limites, serem estendidos à aplicação em águas residuárias com características semelhantes às do líquido percolado, obedecendo-se critérios específicos, caso a caso.

2. OBJETIVOS

Os objetivos principais deste trabalho são:

- Avaliar a aplicabilidade e o desempenho, em escala de bancada, do reator anaeróbio compartimentado no tratamento de líquidos percolados provenientes de um aterro sanitário;
- Estabelecer algumas sugestões sobre projetos envolvendo esse tipo de reator para o tratamento de líquidos percolados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. GENERALIDADES

A presente revisão tem como finalidade a aquisição de fundamentos essenciais para maior compreensão acerca dos líquidos percolados e embasamento da pesquisa proposta. Fez-se necessário citar autores e trabalhos que envolvem aterros sanitários, líquidos percolados, reatores compartimentados, etc., com o objetivo de se ter subsídios para a pesquisa em termo. Não é do escopo desse trabalho o estudo do processo anaeróbio, uma vez que este já foi amplamente discutido por diversos trabalhos realizados em diversos centros de pesquisa e, em particular, no Departamento de Hidráulica e Saneamento (SHS) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) - Universidade de São Paulo (USP), entre os quais DALTRO FILHO

(1988), VILLAS BOAS (1990), FORESTI (1990), DAMIANOVIC (1992), DEL NERY (1992) e POVINELLI (1994).

3.2. ATERROS SANITÁRIOS

O aterro sanitário tem sua aplicação difundida em quase todo o mundo e se apresenta como uma das soluções mais econômicas na disposição de resíduos sólidos. O seu uso constitui alternativa para disposição e tratamento de resíduos no solo, sem provocar grandes prejuízos ou ameaças à saúde e à segurança, utilizando-se princípios básicos de engenharia, de modo a confinar o lixo no menor volume possível, cobrindo-o com uma camada fina de terra ao fim do trabalho de cada dia, ou mais freqüentemente, conforme o necessário. A uma certa quantidade de resíduos dispostos, operados e aterrados em um dia de serviço dá-se o nome de célula.

A técnica do aterro sanitário constitui na acomodação do lixo, de forma ordenada, na superfície do solo. Os resíduos são descarregados junto à base de um desnível ou célula do dia anterior e, em seguida, empurrados por um trator de esteiras, de baixo para cima, de encontro a esse desnível, formando células com 3 a 4 metros de altura, em taludes inclinado com 3:1 e recobertos, no final do dia, com material inerte em camada de 0,2 a 0,3 metros. Essas células são acomodadas de forma disciplinada, uma ao lado da outra, formando uma camada de resíduos compactados sobre o terreno.

Na construção do aterro sanitário, deve-se ter alguns cuidados especiais em relação aos produtos formados na digestão anaeróbia que ocorre dentro do aterro, tais como líquidos percolados e gases. O sistema de coleta, tratamento e disposição de líquidos percolados tem sido amplamente discutido bem como técnicas de engenharia, a fim de mitigar os efeitos dos líquidos percolados no ambiente em que se encontra o aterro. SCHALCH (1992) sugere que o sistema de drenagem dos líquidos percolados seja construído tomando-se as seguintes precauções:

- colocar de duas camadas de areia de 5 cm em terreno de fundo fortemente compactado. Entre as estas camadas deve-se colocar manta plástica;

- construir sobre o colchão de areia fina um sistema de drenagem horizontal na parte central do fundo, constando de canais construídos com "meia calha" de concreto e preenchidos com britas nº 04. Este conjunto de canais conduzem o percolado do interior do aterro para poço de coleta situado na saída de cada unidade;

- relocar camada de 20 cm de argila compactada, com inclinação de 1%, direcionada para as bordas laterais da meia calha;

- depositar sobre as britas uma camada de capim seco a fim de reter as partículas em suspensão que poderiam vir a colmatar os drenos. A Figura 4.1 apresenta um corte transversal do sistema de impermeabilização do fundo de aterros sanitários.

Alguns autores têm destacado o princípio da "atenuação e dispersão" dos líquidos percolados, ou seja, na construção do aterro deve-se salientar técnicas recomendadas de engenharia: escolha do local a ser construído o aterro, tipo de revestimento, solo com baixa permeabilidade, adaptação de manta basal suficiente

para suportar a vazão dos líquidos percolados, sendo este acumulado dentro do aterro (PHILPOTT *et alii*, 1992, PALMER *et alii*, 1991, ROBINSON, 1992). O sistema de drenagem de gases e de águas pluviais, nascentes e líquidos no aterro é outro fator de grande importância, merecendo cuidados especiais na construção desses sistemas (SCHALCH *et alii*, 1990).

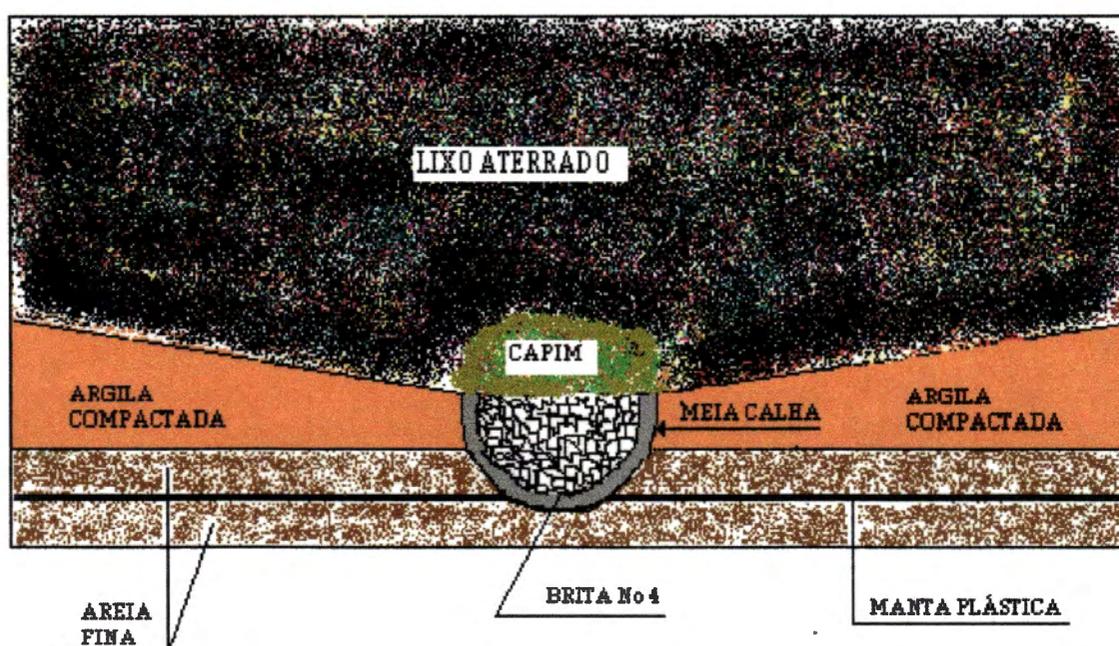


FIGURA 3.1 - Corte transversal do sistema de impermeabilização de fundo dos aterros sanitários.

Fonte: SCHALCH (1992) adaptado de GOMES (1989)

Vários estudos foram realizados enfocando a construção de aterros sanitários: a microbiologia, fatores influentes, entre outros (LIMA, 1988; TEIXEIRA, 1992; GOMES, 1989; MERBACH Jr, 1989; BALDOCHI, 1990; LEITE, 1991)

As interações existentes internamente e as variáveis que interferem externamente no aterro sanitário são extremamente complexas, tornando difícil seu estudo de forma global. Uma influência, que pode ser denominada externa devido à origem dos resíduos, é a própria composição física dos resíduos sólidos urbanos, que diferem de região a região, sendo constituídos de uma mistura altamente heterogênea. Esta composição sofre a influência de parâmetros relacionados com o nível sócio-econômico e cultural da população que habita a região.

A evolução temporal de parâmetros como o potencial hidrogeniônico, demanda química de oxigênio, entre outros, apresentam padrões de comportamento semelhantes para diferentes aterros. Este fato justifica o estudo de aterros na busca das eventuais interações que o governam.

Pesquisas com interações complexas, como ocorrem em aterros sanitários, indicam a necessidade da realização de trabalhos experimentais que levem em consideração as circunstâncias da região atendida, as características do lixo produzido e, também, as principais variáveis que interferem na degradação da matéria orgânica, entre as quais podem ser citadas: gradiente de temperatura, migrações gasosas e dos líquidos percolados, potencial de oxi-redução, potencial hidrogeniônico, atividade enzimática, além dos processos nas interfaces sólido-líquido, líquido-gás, líquido-líquido e sólido-gás. SCHALCH (1992) mostra uma representação esquemática de interações dentro de um aterro sanitário (Figura 3.2).

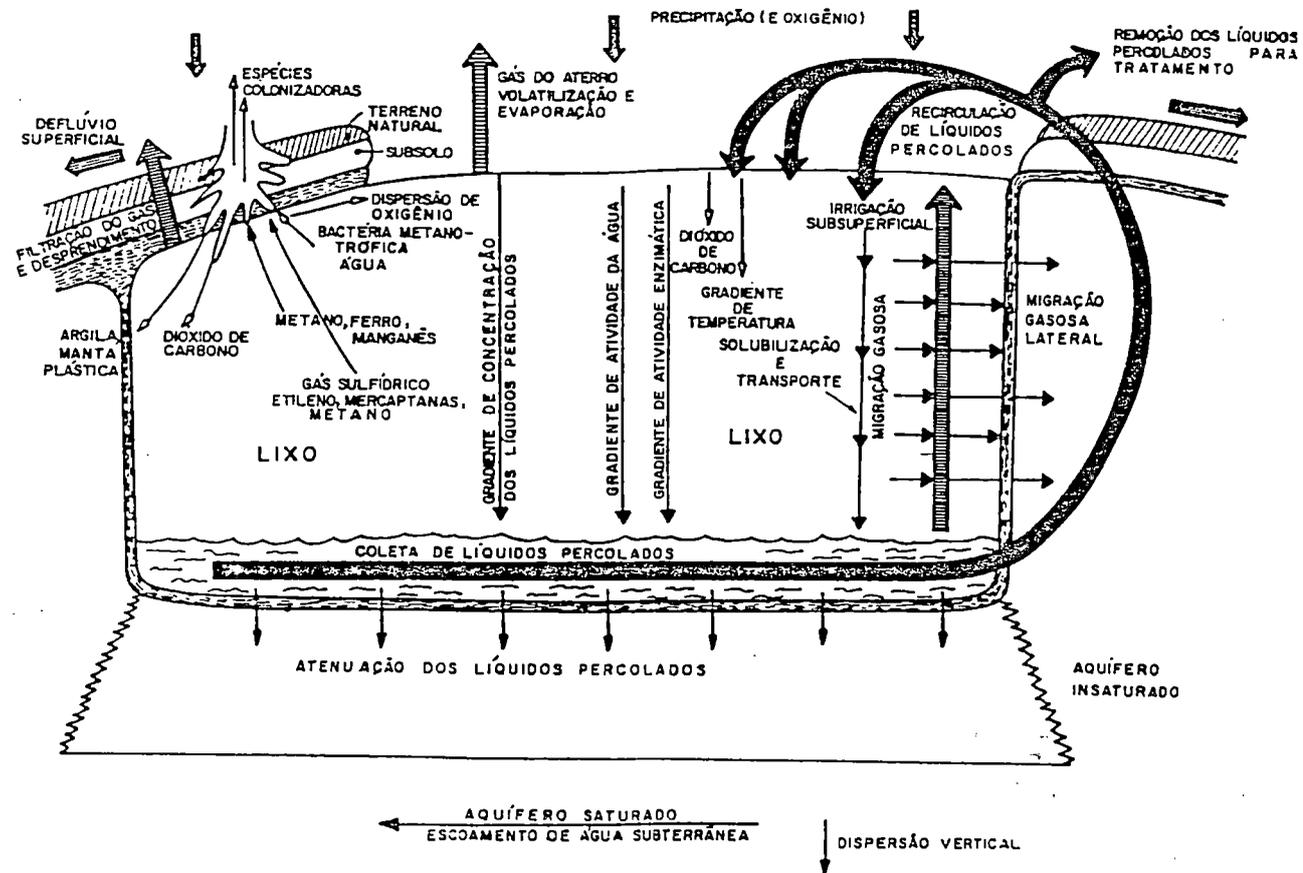


FIGURA 3.2 - Representação esquemática de interações do aterro sanitário.

Fonte: SCHALCH (1992) adaptado de WISE (1987)

3.3. LÍQUIDOS PERCOLADOS

Chorume é um líquido oriundo da decomposição do lixo e se constitui em um dos problemas mais sérios, quando da operação de aterros. Ele pode ser carregado para fora do aterro em decorrência da infiltração de água através do corpo do aterro (SCHALCH, 1982). Neste caso, ao líquido resultante desta combinação, dá-se o nome de líquido percolado.

A produção de líquidos percolados depende das condições peculiares de cada caso, notadamente da topografia, geologia, regime e intensidade de chuvas (SCHALCH, 1982). O volume e a intensidade com que os líquidos percolados são produzidos dependem de atividades físicas, químicas e biológicas do aterro que o gera. A produção é freqüentemente observada dentro de poucos meses após o início de operação do aterro, quando a capacidade absorviva do aterro é excedida e o resíduo começa a ser saturado com água. A taxa de saturação dependerá da presença ou ausência de cobertura, material de cobertura, composição do lixo, grau de compactação, condições climáticas e conteúdo inicial de água presente no resíduo (MARIS *et alii*, 1987, SENIOR *et alii*, 1987).

STEGMANN e EHRIG (1980) consideram que a taxa de produção de líquidos percolados é função de condições climáticas e do grau de densidade da compactação do resíduo. Como ocorrem muitas flutuações, tanto das condições climáticas como do grau de compactação, recomendaram o uso de faixa média na taxa de produção de percolado entre 5 m³/ha dia para aterros altamente compactados e entre 7,5 m³/ha dia para aterros com baixa compactação como base de cálculo para

vazão e tempo de detenção. Esses valores foram calculados para uma taxa de precipitação anual média de 750 mm.

É difícil estimar o volume de líquido percolado que está sendo produzido em um aterro sanitário. EHRIG (1983), com dados coletados em 15 locais, mostrou que uma média de 4 a 7 m³/ha dia (intervalo de 0,4 a 10,6 m³/ha dia) foi gerada em aterros com menos de 12 anos (considerados aterros "jovens"). Segundo MARIS *et alii* (1987), o uso de modelos não tem tido muito sucesso, como consequência de muitas variáveis.

BALESTEROS e CASTRO (1993) propuseram um modelo computacional para descrever a geração de percolados devida a extensos eventos pluviométricos. O aterro é descrito como um sistema de multi-camadas, cada camada tendo suas próprias características hidráulicas. Durante chuva de grande intensidade, a água infiltrada move-se no aterro sob condições saturadas. Após cessar a chuva, a água infiltrada move-se, sob a influência da gravidade, como meio insaturado, até atingir o sistema de coleta, formando a "hidrografia do percolado" (características do sistema de drenagem natural somada às características do sistema especificamente construído para este fim).

Durante a década de 50, um dos grandes e importantes problemas de saúde pública foi relacionado aos aterros: a percolação de um líquido negro que escorria dos aterros (líquido percolado). Esse líquido, além de provocar mau cheiro, contaminava corpos d'água próximos aos aterros, matando peixes e outros animais que se serviam das águas poluídas (LIMA, 1988).

Os líquidos percolados são gerados como consequência de complexa gama de interações entre fatores locais como geologia, hidrogeologia, hidrometeorologia, composição do rejeito (incluindo o conteúdo de umidade e inoculação microbiana), compactação, permeabilidade, topografia, cobertura vegetal e o tempo que, por sua vez, direciona para um segundo setor de interação entre variáveis como potencial redox, pH e temperatura, que serve de intermediária para seleção microbiana e reações físico-químicas como acidificação, volatilização, precipitação e troca iônica (SENIOR *et alii*, 1987).

Segundo SENIOR *et alii* (1987), o líquido percolado tem composição química muito variada, incluindo elementos diversos, radicais inorgânicos, compostos alifáticos, acíclicos, aromáticos, etc. O pH tem efeito marcante na solubilização, migração e precipitação de muitos componentes do líquido percolado, particularmente os metais pesados.

RAVEH e AVNIMELECH (1979, *in*: SENIOR *et alii*, 1987), em estudos de laboratório, constataram, para uma dada densidade ou tipo de resíduo, que a concentração de componentes do líquido percolado é a mesma, em função do tempo e independente de sua infiltração e volume. Verificaram, ainda, que o líquido percolado de locais mais fundos do aterro são mais concentrados.

O fator determinante da qualidade do líquido percolado é o estágio de fermentação do resíduo. O líquido percolado coletado durante o estágio de acidificação do aterro tem valores muito altos de DBO (38.000 mg/ℓ), de DQO (66.000 mg/ℓ) e de carbono orgânico total (21.000 mg/ℓ) (SENIOR *et alii*, 1987). Esses autores concluíram que a concentração dos componentes do líquido percolado

varia consideravelmente com a idade do aterro sanitário, porque o líquido percolado gerado em aterros sanitários jovens tem alta concentração de compostos orgânicos, principalmente na forma de ácidos voláteis.

A Tabela 3.1 compara a composição dos líquidos percolados gerados em aterros sanitários de diferente idades no Canadá, porém em locais próximos e submetidos a mesmo índice pluviométrico (820 mm/ano), obtidos por HENRY *et alii* (1987).

TABELA 3.1 - Comparação na composição de líquidos percolados de acordo com a idade de aterros sanitários, situados no Canadá.

Parâmetros	Aterro Sanitário		
	Keele Valley	Brock North	Beare Road
Idade (ano)	1,5	8	18
pH	5,80	6,35	6,58
Alcalinidade(mg CaCO ₃ /ℓ)	1.800	880	1.070
DQO	13.780	3.750	1.870
DBO ₅	9.660	1.100	1.870
Sólidos Totais	12.730	5.280	3.070
Sólidos Voláteis	6.300	1.350	1.300
Ácidos Voláteis	4.600	1.170	1.480
N-Orgânico	170	6	65
Fósforo Total	0,77	0,11	0,15
Ferro	1.070	500	36
Zinco	5,04	0,22	0,19
Cádmio	0,10	0,02	0,008
Cobre	0,19	0,11	0,05
Níquel	1,08	0,01	-

* Todos valores expressos em mg/ℓ, exceto pH e quando indicado.

Fonte: Henry *et alii* (1987)

A composição dos líquidos percolados é muito variável, dependendo fortemente do tipo de resíduo aterrado (relacionado intimamente a condição social, hábitos regionais, etc). LIN (1991) cita resíduo com alto teor de óleo (gordura) relacionado diretamente com os hábitos alimentares orientais. A Tabela 3.2 apresenta um levantamento da variação na composição dos líquidos percolados gerados em diferentes aterros sanitários, elaborada, pela autora desse trabalho, com dados de MARIS *et alii* (1984), ROBINSON (1985), ROBINSON e MARIS (1985), ROSS (1990), ROBINSON *et alii* (1991), ROBINSON *et alii* (1992), ROBINSON (1992), MARIS *et alii* (1993).

Os dados apresentados na Tabela 3.2 foram obtidos de trabalhos realizados em aterros sanitários de diferentes locais e idades, por isso a ampla variação na composição destes líquidos. Tais dados mostram a natureza típica do percolado gerado em aterros sanitários tanto na fase acidogênica (aterros sanitários “jovens”) quanto na fase metanogênica (aterros sanitários “maduros”).

Em aterros sanitários que se encontram na fase predominantemente acidogênica, o valor da DQO é muito alta, devido à grande quantidade de ácidos voláteis que é formada pela fermentação da matéria orgânica. A Tabela 3.3 apresenta valores máximos da concentração de ácidos voláteis encontrados em líquidos percolados produzidos durante a fase acidogênica de um aterro sanitário.

A distribuição dos ácidos voláteis no percolado varia com a natureza química do resíduo operado e da idade do aterro. De acordo com a Tabela 3.3 observa-se que os ácidos acético e valérico foram encontrados em maiores quantidades. Segundo LIN (1991), os ácidos voláteis tem taxa de degradação

TABELA 3.2 - Variação na composição de líquidos percolados gerados em aterros sanitários de diferentes locais e idades.

PARÂMETROS	FONTE								
	a	b	c	d	e	f	g	h	i
pH	5,3	5,5	5,8	6,0	6,2	6,3	6,8	7,0	8,0
Condut. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	43.450	50.000	-	14.200	-	2.620	-	13.700	19.200
DQO	61.750	73.000	60.400	33.800	24.000	56.373	10.000	10.600	33.700
DBO	-	-	35.800	21.800	13.600	-	4.650	4.100	>4.800
COT	-	24.000	17.600	8.280	8.000	-	-	3.070	5.690
Ác. Voláteis	33.550	13.619	13.578	6.454	5.690	22.500	3.600	1.702	3.025
Alcalinidade	14.610	15.000	-	7.070	-	7.500	2.600	5.150	8.840
NTK	3.110	-	-	-	-	-	-	-	1.820
N-Amoniacal	2.090	1.900	900	603	590	1.483	-	412	1.700
Nitrato	-	<10	-	0,2	-	6	-	<0,2	32,8
Nitrito	-	<10	-	<0,1	-	6	-	0,3	1,4
Fósforo	120	-	-	3,0	0,70	2,0	-	1,80	15,80
Sulfato	-	1.500	-	135	-	886	-	321	739
Cloro	-	3.100	2.160	1.380	1.315	3.600	-	4.670	3.410
Cálcio	-	3.500	3.750	2.900	-	-	520	1.040	1.440
Magnésio	-	570	370	820	-	-	-	420	470
Sódio	-	2.600	1.900	1.150	-	1.941	-	1.360	3.000
Potássio	-	2.700	-	900	-	2.077	-	900	1.480
Ferro	992	1.100	-	560	540	-	550	340	664
Zinco	30,1	29	145,0	0,32	-	4.616	0,80	0,09	6,70
Cobre	0,15	-	0,05	0,05	-	103,0	0,30	0,04	0,16
Cádmio	-	-	0,004	<0,01	-	61	0,35	0,02	0,03
Níquel	1,19	-	1,3	0,13	-	824	1,20	0,10	0,33
Manganês	38,1	44	1.300	25,6	-	-	65	2,7	23,2
Chumbo	-	-	0,5	0,45	-	393	0,80	0,20	0,28
Cromo	4,28	<1	0,65	0,17	-	364	0,10	0,05	0,56

* Todos valores expressos em mg/l, exceto valores de pH ou quando indicado

OBS:

a - SCHALCH (1992) - Dados de valores máximos

b - Aterro Sanitário Stangate East in ROBINSON (1992)

c - ROBINSON (1985)

d - Aterro Sanitário Harewood Whin in ROBINSON *et alii* (1991)

e - MARIS *et alii* (1984)

f - Aterro Sanitário Coastal Park (Cape Town) in ROSS (1990)

g - Aterro Sanitário Chicopee in MARIS *et alii* (1993) - Dados de valores médios

h - Aterro Sanitário Chapel Farm in ROBINSON *et alii* (1992)

i - ROBINSON (1992) - Dados de valores máximos

diferente, sendo a mais lenta a do ácido propiônico. Sua degradação é sensível à concentração de acetato, pressão de hidrogênio e fatores ambientais.

TABELA 3.3 - Valores máximos de concentração de ácidos voláteis encontrados em líquidos percolados gerados em aterros sanitários jovens (fase acidogênica)

Discriminação*	Concentração
Ác. Voláteis Totais	26.490 ^(a)
Acético	9.006 ^(a)
Propiônico	1.800 ^(b)
Butírico	5.299 ^(a)
<i>Iso</i> -butírico	270 ^(c)
<i>n</i> -butírico	5.426 ^(b)
Valérico	10.596 ^(a)
<i>Iso</i> -valérico	390 ^(c)
<i>n</i> -valérico	1.530 ^(b)

* Todos valores expressos em mg DQO/l

Fonte:

^(a) LIN (1991)

^(b) ROBINSON (1992)

^(c) ROBINSON *et alii* (1992)

3.4. REATORES COMPARTIMENTADOS PARA TRATAMENTO BIOLÓGICO

3.4.1. Generalidades

O tratamento biológico de esgotos é um fenômeno que pode ocorrer naturalmente no solo ou na água. Uma estação de tratamento é uma simulação do processo de auto-depuração natural, explorando-se os mesmos organismos que auxiliam em tal processo, otimizando-o e reduzindo custos, desde que se consiga maior eficiência possível. Trata-se da redução da carga orgânica em tempo e espaço muito inferiores em relação ao que se espera em um ambiente natural (CAMPOS, 1990).

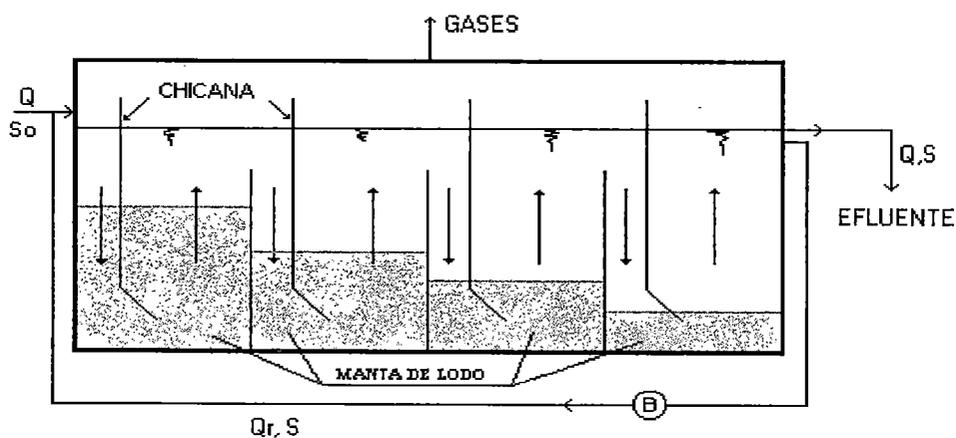
Ao se optar por reatores compartimentados tenta-se promover um melhor aproveitamento do potencial dos microrganismos que estão envolvidos no processo e, com isso, fazer com que suportem altas taxas de carga orgânica, uma vez que bactérias formadoras de ácido (acidogênicas) utilizam o material prontamente biodegradável e, após esta etapa, as bactérias metanogênicas utilizam estes ácidos transformando-os em metano, gás carbônico e água.

Pretende-se, neste item, fornecer uma visão global do tratamento biológico anaeróbio, de reatores compartimentados, bem como seu funcionamento.

3.4.2. Processo Anaeróbio

O emprego de novos reatores, conhecidos como não convencionais, normalmente é bastante direcionado ao tratamento de efluentes líquidos industriais e, mais recentemente, também para esgotos sanitários.

O reator anaeróbio compartimentado é uma modificação do reator anaeróbio de manta de lodo. Este reator possui diversos compartimentos que fazem com que o líquido se movimente de forma ascendente e descendente, passando por regiões de elevada concentração de microrganismos situados no fundo de cada câmara do reator. A Figura 3.3 mostra, de forma esquemática, um reator anaeróbio com chicanas.



LEGENDA:

Q: Vazão
 S_0 : Concentração Inicial
 B: Bomba

Q_r : Vazão de Recirculação
 S : Concentração Final

FIGURA 3.3 - Desenho esquemático do reator anaeróbio com chicanas

Fonte: BACHMANN *et alii* (1985) modificado por POVINELLI (1994).

Segundo BOOPATHY e TILCHE (1991), o reator anaeróbio compartimentado híbrido (com camada de material granular destinado a reter sólidos) é eficiente no tratamento de águas residuárias com alta concentração de carga biodegradável e quando comparado com outros reatores, tem muitas vantagens, entre elas: projeto simples; não requer sistema especial de separação de gás ou lodo; a vazão do líquido ascendente e descendente reduz o arraste de bactérias e dispensa propriedades não usuais de sedimentação para cultura bacteriana; pode ser operado por longos períodos de tempo sem remoção do lodo e tem habilidade de reter sólidos biológicos ativos a altas taxas de carregamento.

BACHMANN *et alii* (1985) desenvolveram estudo sobre o reator anaeróbio compartimentado, apresentando-o como promissor para o tratamento de água residuária industrial, com elevada estabilidade e boa capacidade de reabilitação. Citaram, ainda, que o reator suporta altas taxas de carregamento orgânico tendo boa remoção de DQO e produção de gás. Verificaram que o reator é de fácil operação e não exige dispositivos complicados para coleta de gases.

GROBICKI e STUCKEY (1991) estudaram o desempenho de 4 reatores anaeróbios compartimentado quando submetidos à carga de choque. O experimento foi dividido em duas etapas, sendo que na primeira, foram utilizados 2 reatores, com 4 e 6 compartimentos e sem espaço destinado ao armazenamento de gás. Na segunda etapa os reatores, com 8 compartimentos cada, tinham espaço destinado ao armazenamento de gás. O projeto básico dos reatores era uma caixa retangular com chicanas internas, móveis e estacionárias, dispostas alternadamente, que dividiam os reatores em um número de compartimentos com aproximadamente

10 l cada. A alimentação usada foi uma mistura sintética solúvel de complexos orgânicos (peptona, uréia e açúcares) e sais, com relação DQO:COT de aproximadamente 2,15:1 e DQO de 4.000 mg/l nas duas etapas.

Na primeira fase os reatores 1 e 2 foram operados continuamente, com θ_h de 80 horas, até o estado de equilíbrio dinâmico aparente (aquele alcançado quando os parâmetros de operação e eficiência de remoção mantiveram-se aproximadamente estáveis sobre 3 vezes o tempo de detenção hidráulico). O lodo teve adaptação muito lenta. Na segunda fase, os reatores 3 e 4 foram operados continuamente, com tempo de detenção hidráulico (θ_h) entre 20 a 10 horas, testando-se o efluente para DQO com amostras adicionais colhidas de cada compartimento até atingir estado de equilíbrio dinâmico.

Finalmente, os reatores foram colocados sob "estado de choque" através da redução do tempo de detenção hidráulico (θ_h) para 1 hora (taxa de carregamento orgânico em torno de 96 kg DQO/m³dia) e deixados nesta condição por 3 horas. Amostras do efluente foram tomadas a cada 30 minutos e analisadas para obter dados de arraste de bactérias pelo efluente, remoção de DQO e produção de ácidos voláteis. Dentro de 24 horas, os reatores já haviam se recuperados, indicando remoção de 96% de DQO.

Foram coletados dados sobre a produção de ácidos voláteis a cada meia hora durante o "estado de choque", sendo detectadas altas concentrações de formiato, com pico na 4^a hora e desaparecendo após 11 horas. Esse fato ocorreu, segundo os autores, porque as bactérias produtoras de formiato (bactérias fermentativas) têm metabolismo mais rápido e então respondem aos choques mais rapidamente do que as

utilizadoras de formiato (bactérias metanogênicas). A concentração de acetato aumentou rapidamente, permanecendo alta até 7 horas, decaindo após este período. Entretanto, a concentração de propionato cresceu muito vagarosamente, permanecendo até 11 horas e decrescendo rapidamente.

O reator anaeróbio compartimentado apresentou altas taxas de remoção de DQO com substrato de concentração média (4 g DQO/ℓ), com concentração de biomassa de 7 g/ℓ, quando utilizada taxa de carregamento orgânico de 20 kg DQO/m³.dia. A recuperação do reator sob carga de choque foi muito rápida (24 horas), com menos que 15% de biomassa arrastada (medida em SST no efluente). Formiato mostrou ter um papel importante como intermediário na digestão anaeróbia e o aumento de sua produção, sob carga de choque, está ligado à boa estabilidade do processo.

Em 1992, GROBICKI e STUCKEY continuaram estudando os reatores anaeróbios compartimentados, porém investigando suas características hidrodinâmicas.

Foram utilizados quatro reatores com diâmetros e número de compartimentos diferentes e, aproximadamente 10 ℓ cada. A cada teste (dezessete) eram variados tempos de detenção hidráulica (de 1 a 80 horas), cargas e reatores.

Nos testes 1 a 5, utilizaram tempo de detenção de 1 a 12 horas e os reatores 2 e 3 (com 6 e 8 compartimentos, respectivamente) foram preenchidos somente com água bruta e aplicação de traçador fluorescente. Nos testes 6 a 11 foram utilizados os reatores 1 e 2 (com 4 e 6 compartimentos) contendo biomassa, com DQO em torno de 6g/ℓ, e tempos de detenção de 20 a 80 horas, sendo aplicado

cloreto de lítio como traçador. Nos testes 12 a 17, os reatores 3 e 4 (com 8 compartimentos) foram submetidos a variação na biomassa (de 5,5 a 8,5 g DQO/ℓ) e no tempo de detenção (5 a 20 h), aplicando-se o mesmo traçador dos testes 6 a 11.

Os autores empregaram modelo de Levenspiel (1974) para analisar as curvas de resultados de testes hidrodinâmicos sendo obtidos espaços mortos entre 1 e 8% para os testes 1 a 5 e para os testes seguintes, entre 7 e 20%.

Os autores concluíram que os reatores funcionam como uma série de reatores de mistura completa com espaço morto pequeno, quando comparados a outros tipos de sistemas. O maior número de compartimentos aproxima o reator do escoamento pistonado, sendo este mais fácil de se obter com tempos de detenção menores que 20 h; o espaço morto pode ser hidráulico (em função da vazão e do número de compartimentos) e biológico (função da concentração de biomassa, produção de gás e da vazão).

BOOPATHY e TILCHE (1991) observaram o desempenho de reator anaeróbio com chicanas híbrido no tratamento de melaço de açúcar de beterraba. No experimento foi utilizado como substrato o melaço, antes da fermentação alcoólica (melaço cru, DQO: 990.000 mg/ℓ) e depois da fermentação (melaço de álcool destilado, DQO: 115.771 mg/ℓ), ambos deficientes em fósforo e previamente diluídos.

O reator, com 3 câmaras de 50 litros e zona de decantação final de 15 litros, apresentava perto da superfície da água, nas três primeiras câmaras, uma camada de material sintético ("Pall Rings") destinados a reter os sólidos.

Na partida do reator foi utilizado como inóculo, lodo de digestor anaeróbio e lodo de biodigestor rural alimentado com fezes bovinas. A operação foi executada em quatro fases distintas. Na primeira fase (carregamento inicial), foi aplicada taxa de carregamento orgânico relativamente baixa (aumentada gradualmente até 4,33 kg DQO/m³ dia), a fim de se obter biomassa antes de aumentar a taxa de carregamento. Na segunda fase (aumento da carga), a taxa de carregamento foi gradualmente aumentada para faixa operacional de aproximadamente 10 kg DQO/m³ dia. Na terceira fase (operacional), a taxa foi gradualmente aumentada para 12,25 kg DQO/m³ dia, e, na quarta fase (mudança do substrato), o substrato foi trocado de melaço de álcool destilado por melaço cru e a taxa de carregamento foi aumentada para valores superiores a 28 kg DQO/m³ dia. A Tabela 3.4 apresenta algumas características do desempenho do reator anaeróbio compartimentado híbrido no tratamento de melaço de açúcar de beterraba.

TABELA 3.4 - Dados sobre o desempenho de reator compartimentado híbrido para diferentes taxas de carregamento orgânico (TCO).

Discriminação	TCO (kg DQO/m ³ dia)			
	4,33	10,26	20,00	28,00
DQO afluente solúvel (mg/ℓ)	13.533	9.666	8.893	36.500
Remoção DQO solúvel (%)	89	75	77	50
Remoção DQO total (%)	88	76	70	49
pH do efluente	8,3	8,1	7,7	7,4
Ác. Voláteis do Efluente (mg/ℓ)	2.700	5.500	7.000	9.800
Alcalinid. Total (mg CaCO ₃ /ℓ)	12.000	13.500	17.000	17.500
CH ₄ (% no gás)	75	75	75	60
CO ₂ (% no gás)	25	25	25	40

Fonte: BOOPATHY e TILCHE (1991)

Os autores concluíram que o reator anaeróbio compartimentado híbrido foi capaz de tratar, com sucesso, águas residuárias complexas, como melaço de açúcar de beterraba, com taxa de carregamento orgânico de 20 kg DQO/m³ dia. A mudança na alimentação afetou o reator por pequeno período de tempo e a biomassa foi adaptada para o novo substrato após curto período de adaptação. O reator foi capaz de reter alta concentração de biomassa (até 78 g/l de sólidos suspensos voláteis na primeira câmara) sem arraste do lodo à altas taxas de carregamento. Esse reator produziu gás na proporção de até 5 l/l de reator.dia.

POVINELLI (1994) desenvolveu estudos sobre hidrodinâmica e partida de reator anaeróbio com chicana, para tratar esgoto doméstico. O reator, em escala piloto, apresentava três câmaras em série, seguidas de um “filtro” de pedregulho, com volume total de aproximadamente 11 m³.

Os testes hidrodinâmicos foram realizados em duas etapas: na primeira, o reator foi preenchido com água e aplicou-se rodamina como traçador. Na segunda, o reator foi preenchido com esgoto sanitário e foi aplicado, como traçador, cloreto de lítio. A partida foi executada sem inóculo e operado com θ_h de 12 horas, durante 6 meses.

Concluiu, após análises qualitativas da curva de saída do traçador com o tempo, que há boa mistura nas câmaras e que houve tendência a escoamento pistonado no reator, além de presença de regiões com zonas mortas. A partida do reator, com θ_h de 12 horas obteve remoção de 50, 50 e 70% para sólidos, DQO e DBO, respectivamente, mesmo sem formação de mantas de lodo.

Até a presente data não se tem conhecimento do uso de reatores anaeróbios compartimentados, em escala real, para se tratar líquidos percolados. O seu uso, em escala de laboratório, foi descrito pela primeira vez por BEARD e McCARTY (1983), sendo posteriormente utilizado, com sucesso, em experimentos desenvolvidos por LIMA (1989), sobre tratamento do chorume para posterior recirculação em aterros sanitários.

3.5. TRATAMENTOS USUAIS DE LÍQUIDOS PERCOLADOS

O tratamento de líquidos percolados é um dos temas atuais na área da engenharia sanitária, porém vários trabalhos vêm sendo desenvolvidos na expectativa de se ter dados para concepção de sistemas que tenham condições de mitigar os efeitos danosos de tais líquidos no meio ambiente.

O avanço da biotecnologia está propiciando, para o tratamento destes líquidos, o aparecimento de opções mais vantajosas, seja por sistemas aeróbio ou anaeróbio.

Contudo, ainda são poucos os artigos que enfocam pesquisas desenvolvidas com metodologia específica para esse fim, o que restringe muito a possibilidade de se poder ter uma visão exata dos processos envolvidos.

ROBINSON e MARIS (1985) citam o tratamento biológico aeróbio de líquidos percolados e o consideram a alternativa mais promissora. A DBO e DQO

podem ser substancialmente reduzidas, particularmente em aterros sanitários jovens (com menos de 5 anos), onde as substâncias rapidamente degradáveis, como os ácidos voláteis, compreendem larga proporção de matéria orgânica.

O estudo laboratorial foi realizado em unidades de 20 ℓ , continuamente aeradas e misturadas e sem unidade de sedimentação de lodo. Foi necessária a adição de fosfato devido a baixa concentração de fósforo no líquido percolado, que pode causar deficiências no tratamento. A idade do lodo (θ_c) foi estabelecida entre 5 a 20 dias e o tempo de detenção hidráulico (θ_h) foi equivalente a θ_c .

Os autores citados concluíram que, após o tratamento biológico aeróbio do efluente sedimentado, mesmo em baixas temperaturas, houve remoção maior que 98% da DBO e de mais de 92% da DQO. A 10⁰ C, com a adição de fosfato, foram requeridos valores de tempo de detenção de sólidos superiores a 10 dias, pois baixos períodos de detenção produziram efeitos adversos.

CHIAN *et alii* (1976), após estudos desenvolvidos com líquidos percolados de aterros sanitários de diferentes idades, constataram que o tratamento dos líquidos de aterros jovens, devido à alta concentração de matéria orgânica, tem grande eficiência quando se utilizam processos biológicos aeróbio ou anaeróbio, sendo efetivos na remoção de ácidos voláteis presente em grandes quantidades. Segundo esses autores, o processo de tratamento fisico-químico é mais efetivo no tratamento de líquidos percolados de aterros estabilizados.

As lagoas aeradas, bem como o processo de lodos ativados, têm provado, em casos de líquidos percolados de diferentes composições e idade, serem uma alternativa interessante de tratamento [STEGMANN e Ehrig (1980), MARIS *et*

alii (1984)]. Essas alternativas podem ser usadas tanto para tratamento separado no aterro ou para tratamento combinado com águas residuárias, em sistemas já existentes. MARIS *et alii* (1984) citam alguns sistemas de tratamento de líquidos percolados fundamentados em lagoas aeróbias e processo de lodos ativados. STEGMANN e Ehrig (1980) sugerem operação seqüencial (lodos ativados e lagoas aeradas) sendo solução econômica para se tratar percolado: o processo de lodos ativados é melhor para o tratamento de altas concentrações de compostos orgânicos que ocorrem em aterros sanitários jovens; após a DBO ter decaído significativamente com a idade do aterro, a planta pode ser operada como lagoas aeradas.

Trabalho realizado por CHIAN *et alii* (1985, *in*: KELLY, 1987), discute o tratamento combinado de líquidos percolados com águas residuárias, levando em consideração a produção de líquido percolado e seu tratamento. Essas pesquisas, com base em revisão efetuada por POHLAND e HARPER (1985), sugeriram que o processo biológico aeróbio, usando combinação líquido percolado e esgoto sanitário doméstico, foi capaz de remover DBO₅ e DQO com eficiência superior a 90%. O processo aeróbio teve, algumas vezes, a capacidade de remoção de nitrogênio amoniacal excedendo 90% com tempo de retenção celular acima de 10 dias; e, para tempo de retenção celular entre 6 a 10 dias, notou-se 80% de nitrificação. O processo biológico aeróbio foi eficiente na remoção de metais pesados. Zinco, ferro, cádmio e manganês foram mais facilmente removidos, seguidos pela remoção de cromo, chumbo e níquel.

BERD e McCARTY (1983), [apud LIMA (1988)], propuseram tratamento de percolado gerados em aterros sanitários “jovens” (fase acidogênica) em

reatores anaeróbios compartimentados em série com escoamento ascendente e descendente alternadamente.

Os estudos foram realizados em escala de laboratório, onde o reator foi operado durante três meses em temperatura de 35^o C.

Estes autores obtiveram resultados promissores com baixos tempos de detenção (1 dia) e possibilidade de tratamento anaeróbio com alta taxa de carregamento orgânico (15 kg DQO/m³ dia) e elevada produção de gás metano (70%), além de exigir pequeno ou nenhum período de adaptação e não requerer aditivos químicos. Recomendaram estudos em escala piloto com reatores compartimentados a fim de buscar novas alternativas para o tratamento de líquidos percolados em sistemas compactos, em substituição aos sistemas de lagoas de estabilização. A Figura 3.4 apresenta um desenho esquemático do reator anaeróbio compartimentado em série com escoamento ascendente e descendente alternadamente proposto por BEARD e McCARTY (1983) para o tratamento de líquidos percolados.

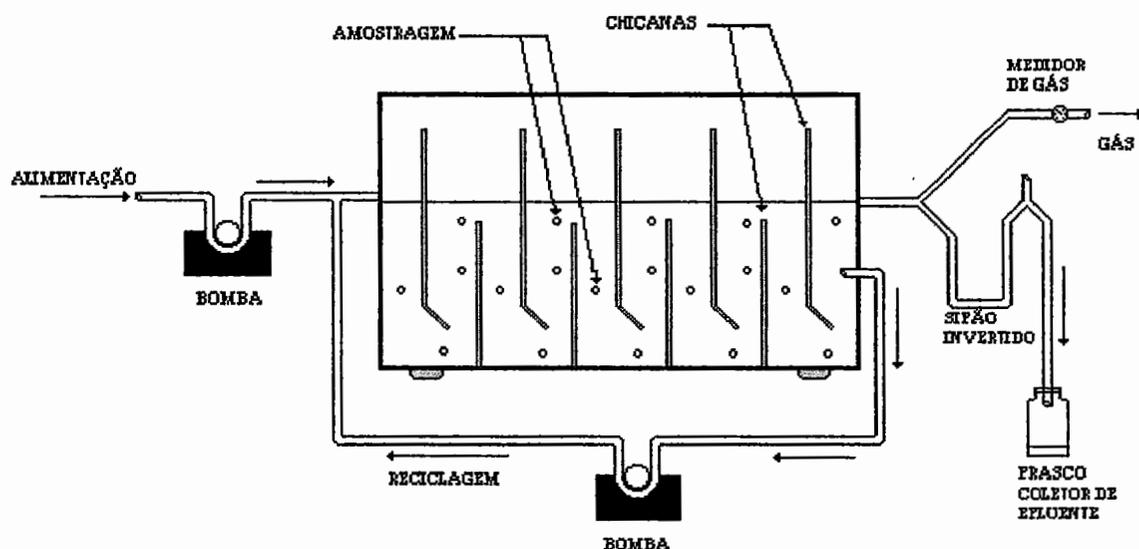


FIGURA 3.4 - Desenho esquemático de reator anaeróbico compartimentado em série com escoamento ascendente e descendente alternadamente

Fonte: BEARD e McCARTY (1983)

LIMA (1988) estudou a recirculação de chorume em aterros sanitários, com finalidade de acelerar a metanogênese. Foram utilizados dez lisímetros, todos preenchidos com lixo triturado e compactado (diferentes graus de compactação), simulando cinco tratamentos diferentes, sendo o primeiro par o grupo controle e os seguintes inoculados com efluentes de reatores anaeróbios (fluxo misto, fluxo ascendente e fluxo ascendente com manta de lodo sintética) e lodo de digestor anaeróbio (Imhoff). Os resultados obtidos no ensaio de laboratório foram comparados a um sistema em escala real.

O autor concluiu que a reciclagem do chorume tratado em reatores anaeróbios acelera a metanogênese em aterros sanitários, sendo o "inóculo" proveniente do reator anaeróbio de fluxo misto o mais eficiente. Recomenda o uso, sem restrições, dos inóculos produzidos pelos reatores e pelo lodo proveniente do tanque Imhoff na aceleração da metanogênese.

KENNEDY e GUIOT (*s.n.t.*) estudaram o comportamento de líquido percolado quando tratado em reator "*Upflow Sludge Bed-Filter*" (UBF). O reator UBF parte do mesmo conceito do reator de manta de lodo (UASB) com uma região, no terço superior, contendo anéis plásticos flotantes. Essa configuração combina vantagens tanto daquelas do reator de manta de lodo (UASB) como as do filtro anaeróbio.

Foram utilizados reatores UBF e de filme fixo e fluxo ascendente com 22,4 l cada, operados a 35⁰C e alimentados com percolado, após pré-tratamento químico com cal para precipitação de metais. O lodo precipitado com cal foi removido e o sobrenadante, com valores de DQO entre 15 a 25 g/l, foi utilizado na alimentação dos reatores. O estudo mostrou maior eficiência do reator UBF na remoção de DQO, com tempo de detenção hidráulico de 2 a 4 dias, do que o reator de filme fixo.

Posteriormente, foi verificada a eficiência na remoção da DQO, apenas no reator UBF, com alimentação de líquido percolado sem o pré-tratamento. Para taxa de carregamento orgânico de 22 kg DQO/m³ dia foi notada remoção de até 96%. Concluíram que o reator UBF apresenta-se como alternativa promissora para o tratamento de águas residuárias no futuro.

HENRY *et alii* (1987) estudaram o tratamento de líquidos percolados em dois filtros anaeróbios, em escala de laboratório, expostos a várias taxas de carregamento orgânico (1,26 a 3,14 kg DQO/m³ dia) e quatro diferentes tempos de detenção hidráulico (de 12 a 96 h).

Cada unidade consistia em uma coluna de vidro com volume de 3 ℓ, preenchida com partículas de granito de 1,5 cm de “diâmetro”.

A partida foi efetuada utilizando-se 60% de percolado e 40% de lodo de digestor, operando-se como unidade em batelada por 10 dias até aplicação da vazão de alimentação. Como substrato foram utilizados dois tipos de percolado de aterro sanitário, um proveniente de aterro em início de operação e outro com oito anos de encerramento das atividades.

Após quatro meses e meio de operação, concluíram que houve remoção substancial da DQO (90%) para cargas orgânicas entre 1 e 2 kg DQO/m³ dia e com tempo de detenção hidráulico de 24 a 96 horas, sem adição de fósforo.

McALLISTER *et alii* (1991) mostraram a viabilidade de tratamento biológico de líquidos percolados gerados em aterros sanitários contendo quantidades significativas de herbicidas fenólicos como ácido 2,4-diclorofenóxiacético (2,4-D), ácido 2-metil-4 cloro-fenoxiacético (MCPA), ácido 2,4,5-triclorofenoxiacético (2,4,5-T) e também baixas concentrações de clorofenóis associadas a herbicidas como 2,4-diclorofenol (2,4-DCP), para-cloro-orto-cresol (PCOC) e quantidades traço de 2,4,5-triclorofenol (2,4,5-TCP).

Esses autores desenvolveram uma cultura tendo como inóculo amostras do solo repetidamente expostas à herbicidas fenólicos, em meio contendo 5% de

solução de percolado com adição de 0,57 g/l de fosfato de amônia e 0,24 g/l de sulfato de amônia. A composição do líquido percolado é apresentada na Tabela 3.5.

TABELA 3.5 - Composição do líquido percolado gerado em aterro sanitário contendo herbicidas fenólicos e clorofenóis.

Componentes	Concentração (g/l)
2,4-D	1,50
MCPA	2,50
2,4,5-T	0,35
PCOC	0,60
Butanol-1	0,50
Butanol-2	0,30
Cinzas (principalmente NaCl)	10,00

Fonte: McALLISTER *et alii* (1991)

Os autores propuseram tratamento com lodos ativados utilizando concentração afluyente com até 10% de líquido percolado, concentração de SSV no reator de 0,3 g/l e concentração de SSV no líquido recirculado de 1,1 g/l. Utilizaram, na operação, tempo de detenção hidráulico de 500 horas, o que se levou à conclusão de que o sistema apresenta boa estabilidade e facilidade para tratar líquidos percolados, obtendo-se 99,5% de remoção de fenólicos, 96,7% de degradação de clorofenóis e 84% de carbono orgânico total (COT) para concentração afluyente de 10% de percolado. Ressaltaram, ainda, que um aumento na concentração afluyente resultou em queda do desempenho do sistema.

BESSADA *et alii* (1993) relatam estudos de tratabilidade do percolado para avaliação do desempenho do tratamento anaeróbico em temperatura ambiente (20

a 23°C) executado pela empresa Gore & Storrie Limited. Foram desenvolvidos os estudos, em escala de bancada e piloto, usando reator anaeróbio híbrido contendo zonas de crescimento suspenso e com recheio com filme fixo.

O processo de tratamento incluiu ajuste de pH para precipitação de metais, precedendo o tratamento anaeróbio (com remoção de metais de 34 a 99%), e polimento aeróbio do efluente anaeróbio para remoção adicional de DBO₅ carbonácea e de NTK. Para TCO acima de 5 kg DQO/m³ dia, o tratamento anaeróbio promoveu remoção da DBO₅ carbonácea de 96%, para o estudo em bancada, e 86%, para escala piloto. A remoção da DQO para estudo em bancada e piloto foi de 89 e 78%, respectivamente.

Testes de estresse mostraram que valores de TCO acima de 20 kg DQO/m³ dia resultaram em baixo desempenho, mas o restabelecimento do reator foi imediato após retornar a TCO baixas. O tratamento aeróbio do efluente anaeróbio apresentou remoção de NTK em 97 a 98%.

BARRUETA e CASTRILLÓN (1992) estudaram o tratamento de percolado em reatores de manta de lodo (UASB), em escala de laboratório. Através de estudos preliminares com digestores em batelada, comprovaram eficiência na remoção da DQO acima de 95%, quando operados com θ_h de 30 a 36 dias.

Foram utilizados três reatores em acrílico, cada um constituído de duas seções cilíndricas separadas por anel defletor para se testar a separação de fase. A seção superior, com maior diâmetro, continha coletor de gás, saída de efluente e para recirculação.

Na partida foi utilizado lodo de digestor anaeróbio de refinaria de açúcar. Foram utilizados ácido hidrocloreídrico para manter o pH neutro e fosfato como nutriente.

Os reatores foram operados com θ_h de 2,6 e 5,1 dias (reator 1) e 3,75; 2,4; 1,8; 1,6 e 1,45 dias (reator 2).

Os autores concluíram que os líquidos percolados são passíveis de tratamento anaeróbio, resultando em alta porcentagem de remoção de DQO (88% para θ_h de 2,4 dias). Entretanto, os níveis de DQO no efluente ainda é muito alto, sendo necessário o uso combinado com outros tratamentos: aeróbio e físico-químico. Devido a baixa quantidade de metais no afluente, não pode estabelecer referências sobre a eficiência desses parâmetros.

O tratamento de líquidos percolados está sendo amplamente investigado, utilizando-se processos físico, químico e biológico. O Quadro 3.1 apresenta levantamento de alguns estudos realizados visando o seu tratamento. Tal quadro foi montado pela autora do presente estudo, a partir de compilação dos dados obtidos em literatura.

O processo mais utilizado, segundo o Quadro 3.1, foi o biológico. Os processos químicos e físicos são utilizados, geralmente, para se tratar percolato gerados em aterros sanitários estabilizados. Observa-se, porém, que há ampla diversidade de alternativas de tratamento para os processos físicos (oxidação UV, destilação solar, microfiltração) e químicos (ozonização, coagulação e precipitação), inclusive a utilização destes processos combinados.

A maioria dos trabalhos apresentados no Quadro 3.1 foi desenvolvida em escala piloto e de laboratório, mostrando-se que poucos sistemas em escala real foram descritos. Na literatura pesquisada há poucos trabalhos que citam sistemas de tratamento de líquidos percolados em funcionamento (STEGMAN e EHRIG, 1980; MARIS *et alii*, 1984; ROBINSON e MARIS, 1985; ROBINSON, 1990; ROBINSON e LIU, 1991).

KATSIFARAKIS (1993) cita a destilação solar como forma de tratamento para líquidos percolados, portanto entendeu-se que este tratamento baseia-se em simples evaporação solar.

QUADRO 3.1 - Alguns estudos realizados para tratamento de líquido percolado.

AUTORES	ANO	PROCESSO	TRATAMENTO	ESCALA	PARÂMETRO	θh/TCO	REMOÇÃO	OBSERVAÇÃO
Thornton, Blanc	1973	químico	C/P	laboratório	DQO, Fe, Ca, Mg	NF	-	Jar test
Boyle, Ham	1974	biológico	UASB híbrido	real	DQO	5 dias	85%	-
Homes, Blanc	1975	biológico	MC anaeróbio	laboratório	DBO/DQO	10 a 12 dias	90%	inibição (taxa)
Stegmann, Ehrig	1980	biológico	LA	piloto	DBO, DQO	10 a 70 dias	99 e 94%	-
Henry <i>et alii</i>	1982	biológico	FA	lab./piloto	DQO	NF	85%	-
Maris <i>et alii</i>	1984	biológico	LA	real	-	10 dias	-	-
Robinson, Maris	1985	biológico	LA	laboratório	DBO/DQO	1-20 dias	98 e 92%	P.T. recirculação
Morgan	1990	biológico	C.A.G./batch	-	-	NF	-	-
Robinson <i>et alii</i>	1991	biológico	Unidade aeróbia	piloto	DBO, N-amon.	15 a 40 dias	99 e 99,5%	-
Hosomi <i>et alii</i>	1991	biológico	BF/RBC anaeróbio	-	-	NF	-	-
Liu <i>et alii</i>	1992	biológico	Batch aeróbio/FA	-	-	NF	-	P.T. aeróbio
Iza <i>et alii</i>	1992	biológico	UASB/FA	piloto	DQO	18 horas	90%	-
Zeff <i>et alii</i>	1992	físico	oxidação UV	-	-	NF	-	-
Robinson <i>et alii</i>	1992	biológico	LA	real	-	NF	-	-
Katsifarakis	1993	físico	DS	-	-	NF	-	-
Bessada	1993	biológico	UASB híbrido	banc/piloto	DBO	NF	96%	P.T. aeróbio
Suidan <i>et alii</i>	1993	biológico	BALEG-CA	U.P.T.	OQS	6 h	-	atividade biológica
Carrieri <i>et alii</i>	1993	biológico	DC anaeróbio	-	-	NF	-	-
Shimoda <i>et alii</i>	1993	quím./físico	H ₂ O ₂ /VIS - UV	-	-	NF	-	-
Imai <i>et alii</i>	1993	biológico	LF	-	-	NF	-	lodo + percolado
Rautenbach, Mellis	1994	fis/quim/biol	lodo ativado	piloto	DQO	NF	-	nanofiltração/OQ
Visvanathan <i>et alii</i>	1994	quím./físico	MF	laboratório	DQO/cor	NF	-	P.T. ozonização
Kennedy, Guiot	s.n.t.	biológico	UASB híbrido	laboratório	DQO	33 kg/m ³ dia	95%	-

LEGENDA:

LA - Lagoa aerada

OQS - Orgânicos químicos sintéticos

UPT - Unidade de pré-tratamento

CAG - Carvão ativado granular

BF/RBC - biofiltro/contato

DS - Destilação solar

LF - Leito fluidizado

P.T. - Pós-tratamento

FA - Filtro anaeróbio

MF - Microfiltração

BALEG-CA - Biorreator de leito expandido granular com carvão ativado

UASB híbrido - Reator Anaeróbio de manta de lodo híbrido

C/P - Coagulação/Precipitação

MC anaeróbio - Mistura contínua anaeróbia

NF - não fornecido

4. METODOLOGIA

4.1. GENERALIDADES

Para alcançar o objetivo de se estudar o tratamento anaeróbio de líquidos percolados em reator compartimentado, utilizou-se, como afluente, o líquido percolado produzido no aterro sanitário Delta IA, em Campinas/SP e o reator anaeróbio compartimentado em escala de bancada.

Este item enfatiza aspectos da construção do reator, apresenta considerações sobre a qualidade do substrato e descreve o aterro em que foram coletadas as amostras. São descritas, também, a montagem de laboratório, a partida do reator e sua operação e as análises utilizadas para estudo dos parâmetros envolvidos.

O líquido percolado foi coletado no aterro sanitário Delta IA (Campinas/SP), transportado para São Carlos em galões plásticos e preservado em

geladeira a 4⁰C. Parcelas eram retiradas e colocadas em recipientes plásticos de cinco litros, de onde o percolado era recalado, através de bomba dosadora peristáltica, para o reator anaeróbio compartimentado.

O reator, em escala de laboratório (10 ℓ), apresenta 4 câmaras providas de chicanas e de área destinada a sedimentação da manta de lodo, situada no fundo do reator. A primeira câmara é maior com vistas a suportar as variações da carga afluyente e a última simula um “filtro anaeróbio” com recheio de esferas de vidro.

O inóculo utilizado na partida do reator foi lodo de reator de manta de lodo da Fábrica de Papel de São Carlos. Este lodo foi adaptado durante 6 meses até a partida do reator.

Foram testados θ h de 80; 45; 15 e 5 dias em temperatura constante na faixa de 30 ± 2^0 C.

4.2. ATERRO SANITÁRIO

Para desenvolvimento do experimento foi utilizado, como alimentação dos reatores, líquido percolado coletado no Aterro Sanitário Delta IA, em Campinas/SP (Figura 4.1).

O Aterro Sanitário Delta IA está localizado na região centro-oeste do Município de Campinas/SP, em uma pequena faixa do território considerada como “Área Intensamente Degradada”, na qual ainda são permitidos empreendimentos de

tais características, em zona rural. Como limite deste aterro encontra-se uma ferrovia e nas proximidades (aproximadamente 600 m), o bairro Jardim São Caetano.

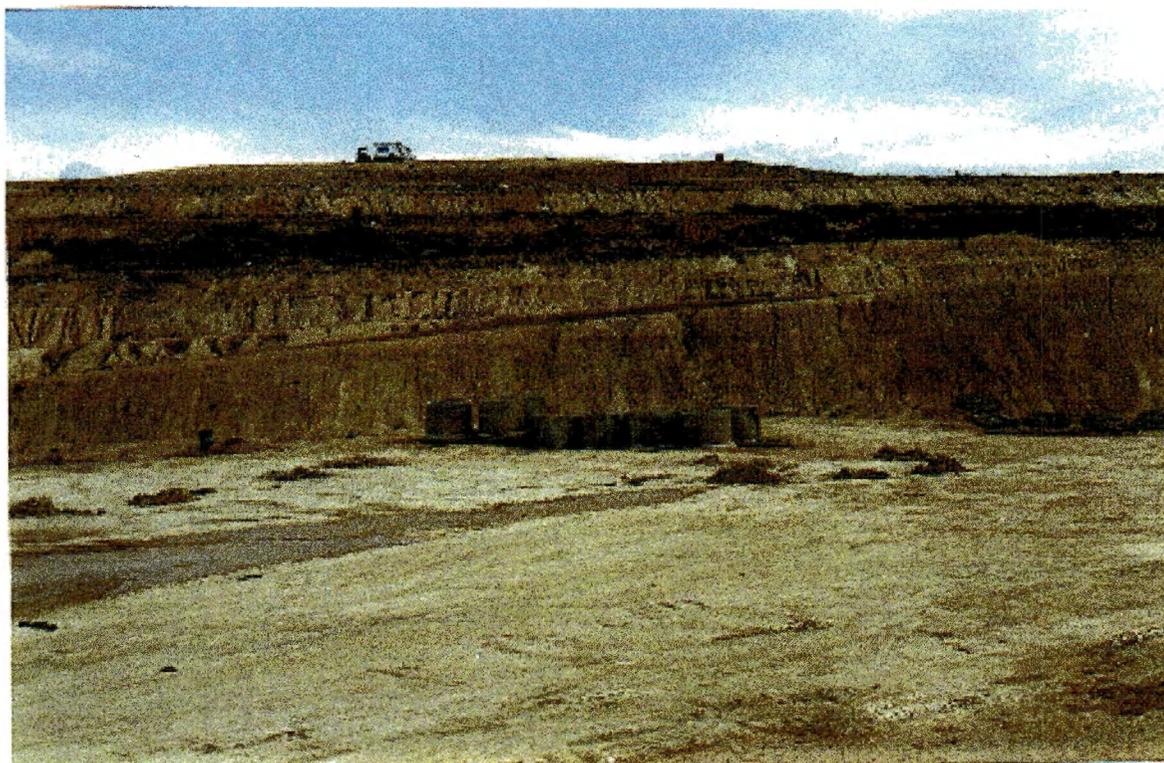


FIGURA 4.1 - Vista parcial do Aterro Sanitário Delta IA, mostrando os reservatórios onde os líquidos percolados foram coletados.

Suas atividades foram iniciadas em setembro de 1992, recebendo, desde então, média de, aproximadamente, 700 t/dia. Este aterro tem volume total estimado de 653.000 m³. A vida útil prevista é de 7 anos.

Em sua operação de disposição de resíduos é utilizado sistema de rampa, com camadas sobrepostas (células) de tamanhos decrescentes à medida em que tendem para cima (Figura 4.2). Na operação do sistema, é usada a compactação do resíduo e recobrimento diário de massa (Figura 4.3).



FIGURA 4.2 - Foto mostrando etapa de formação de uma célula no Aterro Sanitário Delta IA: Compactação do resíduo com trator de esteira

Na base de cada célula foram executados drenos horizontais para coleta de líquidos percolados que por sua vez, são interligados a drenos verticais de gases. O líquido percolado conduzido pelos drenos e pela própria manta impermeabilizante, colocada antes da disposição (Figura 4.4), é transportado por gravidade a caixas de passagem construídas em tubos de concreto de 1,20 m de diâmetro (Figura 4.5). Estes reservatórios são utilizados para armazenar os líquidos percolados produzidos no aterro, uma vez que ainda não foi construído sistema para tratamento de tais líquidos (em projeto).

O aterro foi projetado para o recebimento de resíduos com características essencialmente domiciliares.



FIGURA 4.3 - Após a compactação do resíduo, este é recoberto por fina camada de terra. (fotografia de operação no Aterro Delta IA).



FIGURA 4.4 - Construção de drenos horizontais de líquidos percolados: colocação da manta impermeabilizante antes da disposição do resíduo.



FIGURA 4.5 - Foto de um dos reservatório onde os líquidos percolados foram coletados. Tais reservatórios possuem diâmetro de 1,20 m.

4.3. LÍQUIDOS PERCOLADOS

Os líquidos percolados do Aterro Sanitário Delta IA têm elevados teores de carga biodegradável, formada principalmente por ácidos voláteis, sendo estes líquidos típicos de aterros sanitários jovens (no caso, 3 anos).

Para realização do presente experimento foram feitas apenas quatro coletas, devido ao pequeno volume do reator (10 ℓ) e altos θ_h empregados. A primeira coleta foi efetuada em outubro de 1993, a segunda em abril de 1994, a terceira em outubro de 1994 e a quarta em setembro de 1995. O percolado foi

coletado nos reservatórios de armazenamento (Figura 4.6) com recipientes de 1 ℓ e transferidos para recipientes plásticos de 20 ℓ que foram transportados para cidade de São Carlos/SP (150 km de Campinas). Após a chegada no Laboratório de Processos Anaeróbios, os recipientes contendo líquidos percolados foram mantidos sob refrigeração a aproximadamente 4^o C para atenuar as variações das propriedades do efluente em estudo. O armazenamento sob refrigeração não alterou significativamente as características dos líquidos percolados. A Tabela 4.1 apresenta a caracterização do percolado gerado no Aterro Sanitário Delta IA, objeto do presente estudo, decorrente de amostras coletadas durante o seu desenvolvimento.

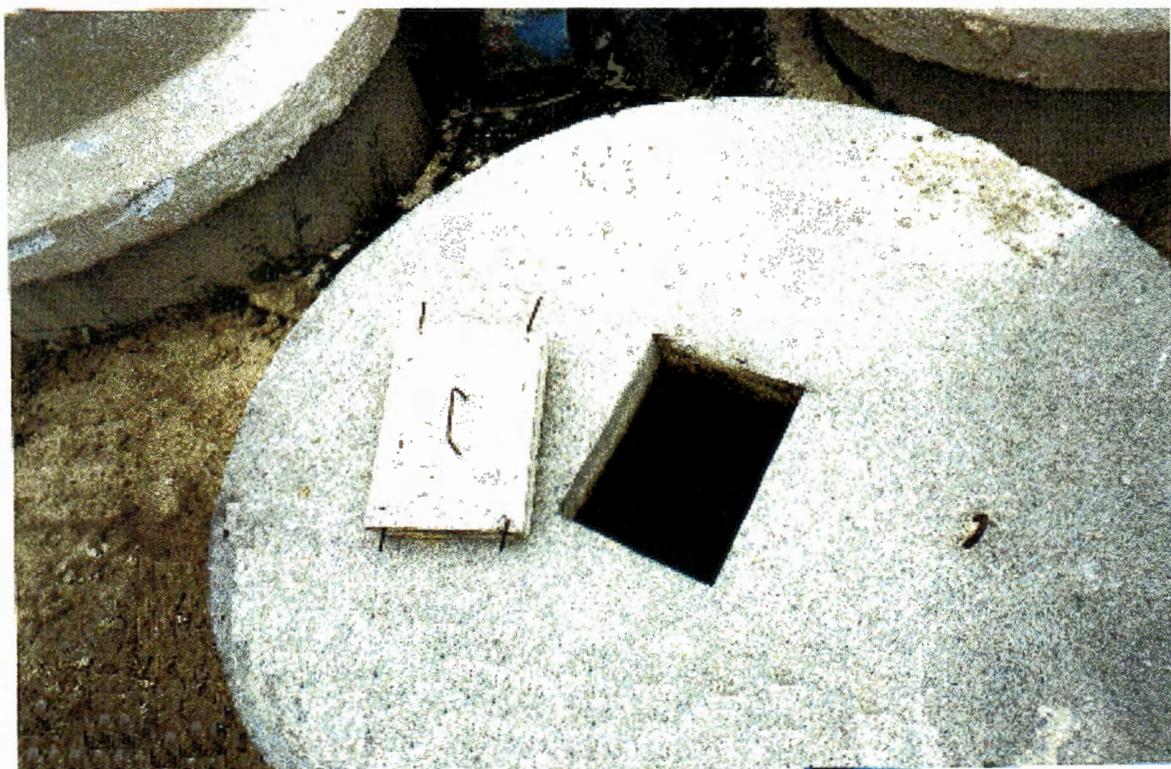


FIGURA 4.6 - Local de coleta dos líquidos percolados no Aterro Sanitário Delta IA.

TABELA 4.1 - Características dos líquidos percolados gerados no Aterro Sanitário
Delta IA - Campinas/SP.

Parâmetros*	Valores (mg/l)		
pH	5,0	a	6,0
DBO	15.000	a	55.000
DQO	21.000	a	78.000
Ácidos Voláteis)	9.000	a	18.000
Alcalinidade (mg CaCO ₃ /l)	8.500	a	17.500
Sólidos Totais)	28.800	a	45.000
Sólidos suspensos	660	a	5.000
Fósforo	0	a	12,00
N-amoniaco	740	a	1.300
Metais:			
Cromo		ND**	
Cobre	ND	a	0,07
Manganês	ND	a	35,00
Ferro	ND	a	1.375
Níquel	ND	a	1,06
Cádmio		ND	
Chumbo	ND	a	0,20
Zinco	ND	a	4,00

* Todos valores expressos em mg/l, exceto pH ou quando indicado

** ND : não detectável

À medida que os líquidos percolados foram utilizados, parcelas foram retiradas e colocadas em recipiente de 5 l, sendo recalçadas ao reator anaeróbio empregando-se bomba dosadora peristáltica.

4.4. DESCRIÇÃO DA MONTAGEM DE LABORATÓRIO

4.4.1. Descrição do Sistema

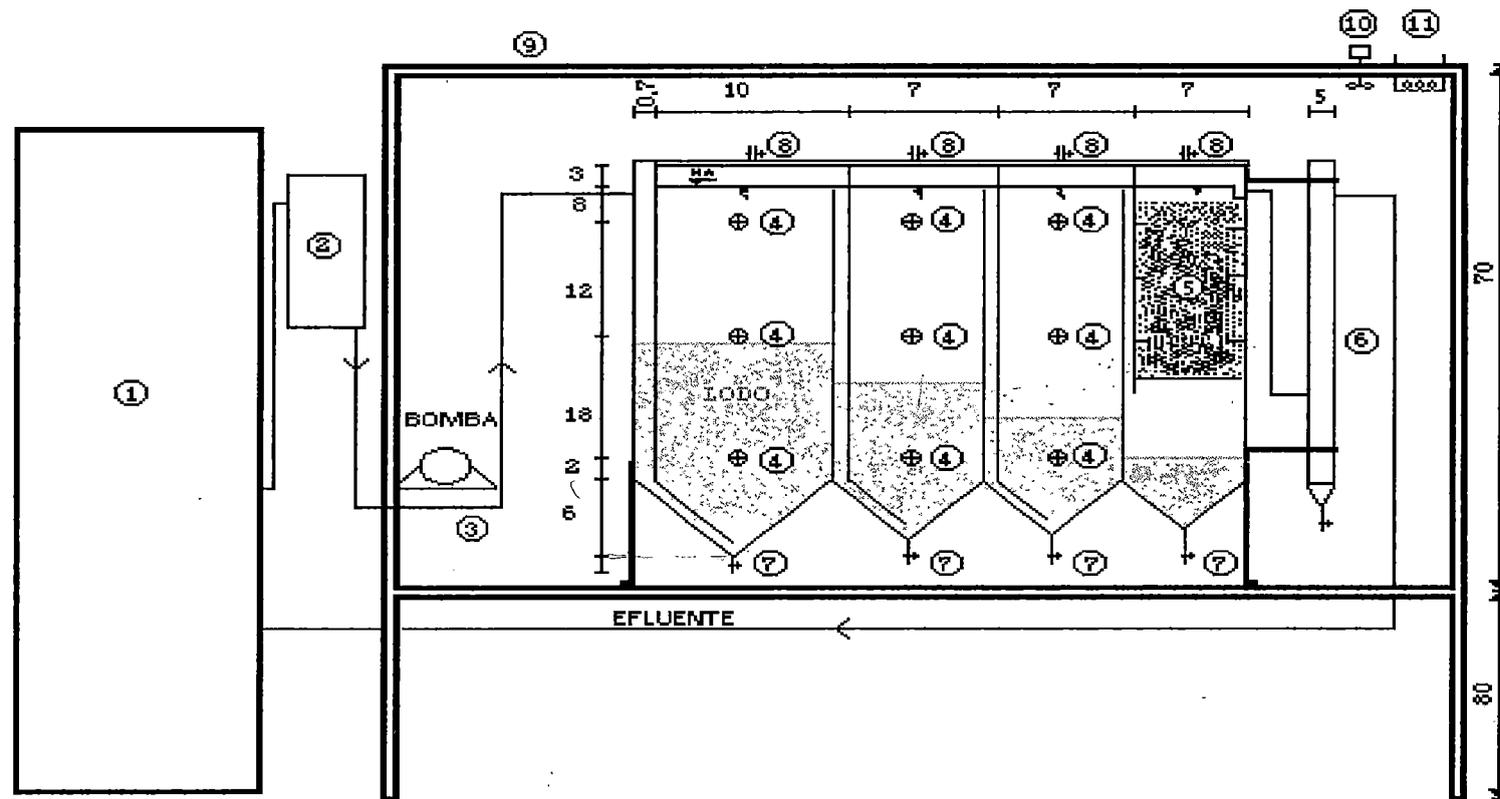
A instalação experimental, representada nas Figuras 4.7 e 4.8, é constituída dos seguintes componentes principais:

- Refrigerador Consul, modelo RC-28, com 275 litros;
- Reator anaeróbio compartimentado, com quatro câmaras, sendo a última constituída de “filtro”, para reter os sólidos, e com tampa hermética removível com saída de gás.
- Bomba dosadora peristáltica, com quatro cabeçotes, Coller-Parmer.
- Câmara de isolamento térmico, confeccionada em acrílico (3,25 mm) e com esquadrias em madeira.
- Sistema de controle de temperatura (termostato).

O reator tem volume total de 10 litros, seguido de decantador e consta de 4 câmaras, sendo a primeira com sessão de planta quadrada (10 cm x 10 cm) e volume aproximado de 3,3 ℓ; as três seguintes, retangulares (10 cm x 7 cm), têm volume aproximado de 2,2 ℓ. As chicanas estão dispostas à 0,7 cm da parede.

O fundo de cada compartimento é provido de região destinada à acumulação do lodo, com forma de tronco piramidal invertido, observando ainda uma válvula para descarte do lodo.

As três primeiras câmaras apresentam, cada qual, 3 válvulas para coleta de efluentes, dispostas à 8; 20 e 38 cm da superfície do líquido (Figura 4.9).



LEGENDA:

- 1- GELADEIRA
- 2- RECIPIENTE DE ARMAZENAMENTO DO AFLUENTE
- 3- BOMBA DOSADORA PERISTÁLTICA
- 4- TOMADAS DE COLETAS
- 5- RECHEIO DE ESFERAS DE VIDRO
- 6- SEDIMENTADOR ($\phi = 5 \text{ cm}$)

- 7- DESCARGA DO LODO
- 8- SAÍDA DE GÁS
- 9- CÂMARA DE ISOLAMENTO TÉRMICO
- 10- VENTONHA
- 11- TERMOSTATO

FIGURA 4.7 - Vista frontal esquemática da instalação de laboratório (Sem escala) - Medidas em cm

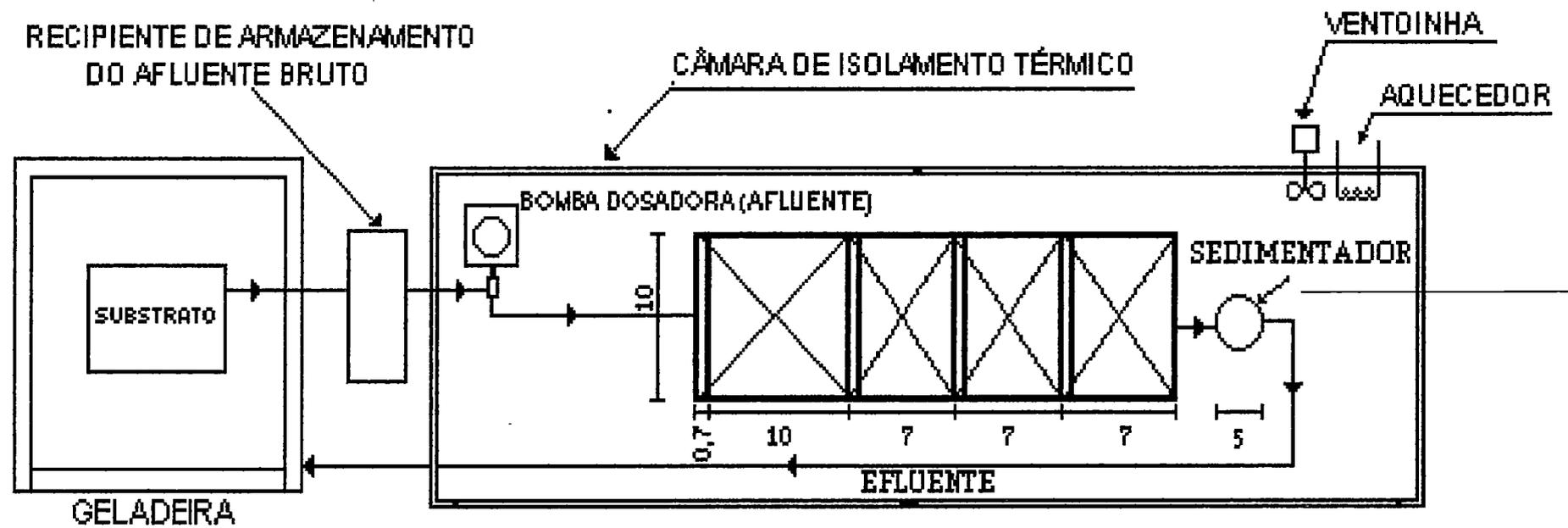


FIGURA 4.8 - Planta esquemática da instalação de laboratório (medidas em cm).

Na última câmara foi destinada uma região para retenção de sólidos sobre a qual foram dispostas esferas de vidro com 1,5 cm de diâmetro, simulando um "filtro anaeróbio", com a finalidade de reter os sólidos arrastados pelo efluente (Figura 4.10). Nesta câmara do reator foi acrescentada, no fundo, uma pequena placa com furos para distribuição do efluente no filtro anaeróbio, sendo este dividido em três regiões por aletas de 1 cm em volta das paredes, para evitar linhas preferenciais do líquido. O reator contém, ainda, tampa removível com saída de gases, conectada a mangueira e ligada a borbulhador de gases que serve como selo hídrico.

O sedimentador consiste em um tubo de acrílico com 5 cm de diâmetro e 40 cm de altura e se encontra ligado ao reator por meio de mangueira de silicone. Este tem finalidade de sedimentar os sólidos que eventualmente se encontram no efluente.

As características do reator em escala de laboratório estão apresentadas na Tabela 4.2.

TABELA 4.2 - Características do reator anaeróbio compartimentado

Dimensões Internas (cm):	
Comprimento	33,0
Altura	46,0
Largura	9,5
Volume Útil (ℓ)	10,0
Nº compartimentos	4
Volume 1º compartimento (ℓ)	3,3
Volume demais compartimentos (ℓ)	2,2
Espaço entre parede e chicana (cm)	0,7

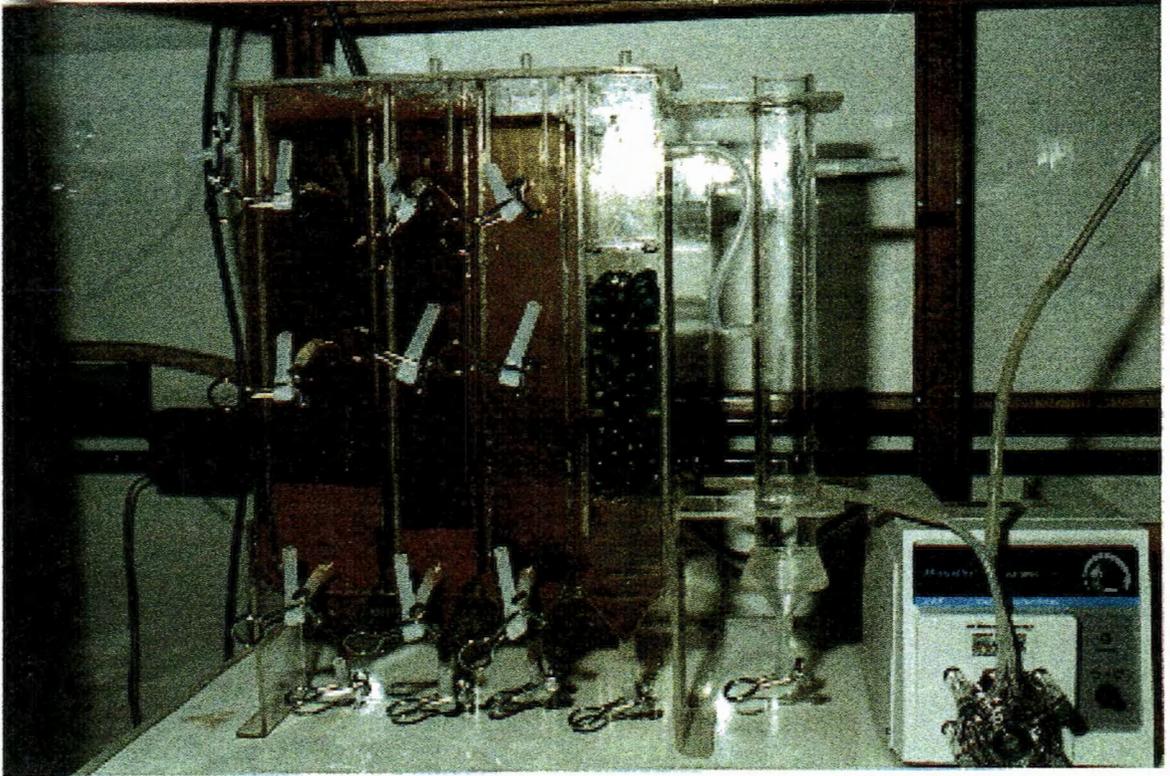


FIGURA 4.9 - Vista do Reator Anaeróbio Compartimentado.

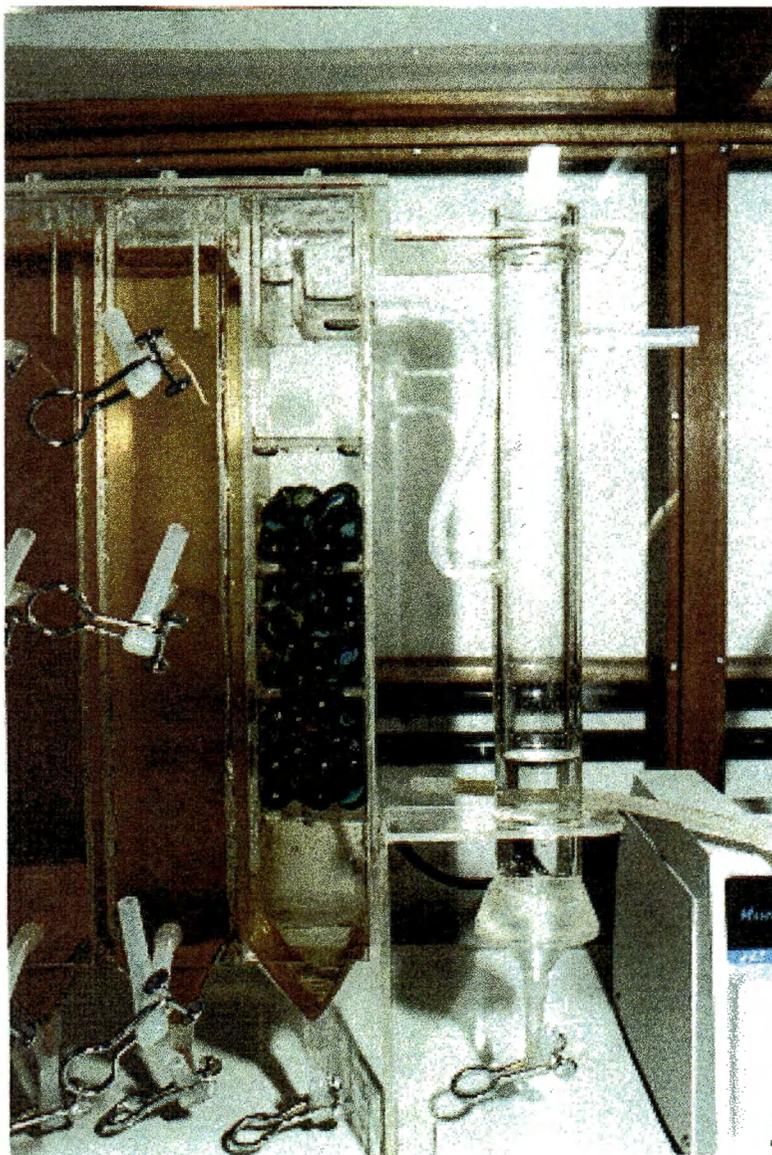


FIGURA 4.10 - “Filtro” do reator anaeróbio compartimentado.

4.4.2. Construção do Reator

O reator foi construído com chapas de acrílico cristal com 4,75 mm de espessura, utilizando-se a técnica de Termoformação.

Esta técnica consiste no seguinte princípio: Aquece-se a chapa acrílica à 170°C em estufa por aproximadamente 5 minutos (ou até quando a chapa estiver

elástica), levando-a em seguida para o gabarito fêmea e sobre este, o gabarito macho. O conjunto de gabaritos (fêmea e macho) com a chapa acrílica, são levados a uma prensa e após o resfriamento do acrílico, o molde está pronto.

A moldagem das peças diminui consideravelmente o número de faces coladas, evitando-se vazamentos. Porém, esta técnica só havia sido testada utilizando gabaritos em aço, que suporta bem o calor do acrílico sem marcá-lo. Como a utilização de gabaritos em aço ficaria muito onerosa, inviabilizando o projeto, decidiu-se submeter ao teste com gabaritos feitos em madeira.

Depois de serem moldadas e coladas todas as peças, formando o reator, foi confeccionado o tubo de acrílico do decantador, seguindo, também, a técnica de Termoformação. O funil do decantador foi torneado à partir de um cilindro de acrílico maciço.

As paredes da tampa foram feitas em chapa acrílica com 3,0 mm de espessura. As tomadas de gás e de efluente foram torneadas em tarugo de acrílico e coladas ao reator e sua respectiva tampa.

4.5. OPERAÇÃO

Sendo o líquido percolado uma água residuária de composição específica, foi necessária uma prévia adaptação do lodo utilizado como inóculo do reator anaeróbio, quando da partida deste.

4.5.1. Adaptação do Lodo

Para a adaptação do lodo, foram montados dois reatores em batelada, um com 2,5 litros e outro com 5 litros, com tampa hermética contendo duas saídas, uma para coleta de efluentes e aplicação do substrato e outra para saída de gases, ligada a gasômetro (Figura 4.11).



FIGURA 4.11 - Montagem para adaptação do lodo anaeróbio.

Iniciou-se o processo aplicando 50% de água bruta, 20% de líquido percolado e 30% de lodo proveniente de reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) em operação, da Fábrica de Papel, em São Carlos. O inóculo foi decantado e aproveitou-se somente a parte sedimentada, desprezando o sobrenadante. O pH foi corrigido para valor próximo a 7 usando solução de bicarbonato a 5%.

Após a inoculação, os reatores foram fechados com a tampa hermética e vedados com fita de teflon, observando-se produção de gás a partir dos primeiros 10 minutos.

Durante 10 dias a mistura foi deixada em agitação intermitente e, após este prazo, iniciou-se operação dos reatores em batelada mantendo 0h em 50 dias, ou seja, retirava-se uma parcela de efluente e aplicava-se a mesma parcela de substrato. Para o reator de 2,5 ℓ, a parcela foi de 50 ml/dia e para o reator de 5 ℓ, de 100 ml/dia. Assim, simulou-se TCO de 1,08 kg DQO/m³ dia, para concentração de DQO afluente de 53.000mg/ℓ.

Após 7 dias do início da operação, os reatores em batelada apresentaram eficiência na remoção da DQO e também de ácidos voláteis em torno de 60%, estando o pH na faixa de 7, confirmando o bom tamponamento do sistema.

A produção de gás foi estimada, em função de medidas realizadas, em aproximadamente 2.500 ml/dia para o reator de 5 ℓ e em 1.000 ml/dia, para o reator de 2,5 ℓ.

Os reatores em batelada foram mantidos em operação durante aproximadamente 6 meses até notar-se a formação de certa quantidade de lodo de boa qualidade para inocular o reator compartimentado. No final da adaptação, o pH do reator permaneceu alcalino (em torno de 8) e a eficiência de remoção estava em torno de 90%, tanto para DQO como para ácidos voláteis.

4.5.2. Partida do Reator

Para dar partida no reator anaeróbio, 2.200 ml de lodo previamente adaptado foram inoculados nas câmaras, assim distribuídos: 1.200 ml na primeira câmara, 600 ml na segunda e 400 ml na terceira. A quarta câmara não foi inoculada. O volume restante foi, então, preenchido com água e o pH foi novamente corrigido para valor próximo a 7, usando solução de bicarbonato a 5%. Aguardou-se período de 7 dias para sedimentação do lodo e, conseqüentemente, evitar seu arraste. Após este prazo, o reator foi imediatamente colocado em operação com θ_h de aproximadamente 80 dias.

4.5.3. Operação:

A operação do reator foi iniciada com θ_h de aproximadamente 80 dias. Foram ainda testados θ_h de 45; 15 e 5 dias.

Parcelas de líquidos percolados foram retiradas da geladeira, passada por peneira fina (a fim de diminuir a quantidade de sólidos presentes e evitar entupimentos) e colocadas em recipientes de 5 l, de onde eram recalçadas, por bomba peristáltica dosadora, para o reator.

Sabe-se que o reator anaeróbio compartimentado funciona como vários reatores de manta de lodo em série. Partindo-se deste princípio, monitorou-se, inicialmente, a 1ª câmara como se esta fosse um reator de manta de lodo isolado utilizando-se seu desempenho como critério para se definir o θ_h a ser empregado,

isto é, se na 1ª câmara obtinha-se desempenho razoável, inferia-se que o reator, como um todo, obteria bom desempenho com o θ_h empregado nesta câmara.

As primeiras coletas foram efetuadas após terem decorridos 3 vezes, ou mais, o θ_h empregado (teoricamente, quando o reator tenha atingido equilíbrio dinâmico aparente). Após as coletas, novos θ_h eram testados, segundo critério estabelecido.

Foram feitas 4 coletas para cada θ_h de operação (80; 45 e 15 dias), com frequência de 10 dias. Para operação com θ_h de 5 dias, foram feitas 3 coletas com frequência de 7 dias.

Os pontos escolhidos para verificação da eficiência do reator compartimentado anaeróbio foram os seguintes:

- Ponto 1 (Afluente Bruto): Entrada do reator
- Ponto 2 (Câmara 1 - C_1): Saída da 1ª câmara
- Ponto 3 (Câmara 2 - C_2): Saída da 2ª câmara
- Ponto 4 (Câmara 3 - C_3): Saída da 3ª câmara
- Ponto 5 (Câmara 4 - C_4): Saída do filtro.

Nos pontos 2, 3 e 4, o efluente foi coletado na válvula de descarte que se situa na parte mais alta de cada câmara do reator (38 cm). No ponto 5, o efluente foi coletado através de seringa de 20 ml acima do "filtro", uma vez que a câmara 4 não possui válvulas de descarte.

Durante toda a operação a temperatura foi mantida, pelo sistema de controle de temperatura composto de ventoinha e termostato, em $30 \pm 2^\circ\text{C}$.

Os parâmetros levantados e seus respectivos métodos encontram-se no Quadro 4.1. Para a determinação destes parâmetros, utilizou-se metodologias contidas no STANDARD METHODS FOR EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER (1985).

QUADRO 4.1. - Parâmetros analisados e seus respectivos métodos, para afluente e efluentes:

PARÂMETROS	MÉTODO
pH	potenciométrico
DBO	titulométrico
DQO	colorimétrico
Alcalinidade	titulométrico
Ácidos Voláteis	titulométrico
Sólidos Totais (fixos e voláteis)	gravimétrico
Sólidos Suspensos (fixos e voláteis)	gravimétrico

Não foram efetuadas análises de gases (composição e produção) devido a contaminações que ocorreram pela penetração de ar pela tampa, e também de metais e fósforo, devido a grande quantidade de matéria orgânica existente, o que necessitaria, segundo STANDARD METHODS FOR EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER (1985), de digestão com ácido perclórico, técnica que não se encontra disponível nos laboratórios do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC - USP.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. INTRODUÇÃO

Devido a complexidade dos dados encontrados durante o desenvolvimento do experimento, optou-se pela apresentação dos resultados obtidos juntamente com a discussão dos mesmos, a fim de facilitar a compreensão do leitor.

Este item apresenta observações sobre os líquidos percolados empregados, discutindo-se suas características em relação àquelas encontradas na literatura.

Em um segundo momento, apresenta o estudo do desempenho geral do reator anaeróbio compartimentado, confrontando o seu desempenho com o de cada

câmara que o constitui, para cada parâmetro pré-determinado citado no item Metodologia e nos quatro θ h pesquisados (80; 45; 15 e 5 dias).

Por fim, investiga-se o desempenho do reator e de cada câmara na eficiência de remoção da DQO em relação às diversas TCO. Cada câmara foi tomada como um reator isolado, sendo o desempenho de cada uma confrontado com o de outra.

Foram feitos alguns comentários sobre projetos desse tipo de reator para se tratar líquidos percolados, a fim de se sugerir alguns critérios para o seu uso.

5.2. LÍQUIDOS PERCOLADOS EMPREGADOS

De acordo com a Tabela 4.1 (item Metodologia) pode-se verificar que os líquidos percolados utilizados são provenientes de aterro sanitário jovem, devido a elevada concentração de compostos orgânicos e valores de pH baixos (ácidos). Os valores encontrados para os parâmetros utilizados na caracterização dos líquidos percolados são similares àqueles encontrados na literatura, para líquidos percolados gerados em aterros sanitários jovens (HENRY *et alii*, 1987; LIN, 1991; BARRUETA e CASTRILLÓN, 1991; ROBINSON, 1992; IZA *et alii*, 1993).

A composição dos líquidos percolados variou muito durante a operação do reator. Esta variação deve-se ao fato de que as coletas efetuadas no aterro sanitário Delta IA (Campinas/SP) foram feitas em épocas distintas, ocorrendo variação em sua composição, principalmente na DQO e ácidos voláteis. Apesar da

ampla variação entre os valores máximos e mínimos (70% na DQO, 50% em ácidos voláteis e 51% na alcalinidade), os valores mínimos encontrados para esses três parâmetros ainda foram altos, ou seja, 21.493 mg/ℓ; 9.264 mg/ℓ e 9.183 mg/ℓ para DQO, ácidos voláteis e alcalinidade, respectivamente.

Valores de sólidos totais (ST) encontrados (45.000 a 28.820 mg/ℓ) foram muito maiores do que aqueles descritos na literatura (HENRY *et alii*, 1987), porém, para sólidos suspensos voláteis (SSV), os valores estão predominantemente na faixa apresentada na literatura (LIN, 1991; HENRY *et alii*, 1987; HOLMES e BLANC, 1975). A relação sólidos suspensos voláteis/sólidos suspensos (SSV/SS) não ultrapassou 50%, indicando quantidade relativamente alta de material inorgânico nos líquidos percolados.

A alcalinidade apresentou valores muito elevados, provavelmente devido a grande quantidade de ácidos voláteis nos líquidos percolados. Valores de pH se mantiveram sempre na faixa de 5,0 a 6,0, indicando aterro novo, sob condições acidogênicas. Isso pode ser notado, também, ao observar elevados valores de DQO (na faixa de 21.493 a 72.300 mg/ℓ), próprio desta fase. Segundo HENRY *et alii* (1987), líquidos percolados produzidos em aterros “jovens”(novos) são geralmente caracterizados pela presença de quantidades substanciais de ácidos voláteis, produtos naturais da fermentação anaeróbia. Estes ácidos contribuem nos altos valores de DQO nos líquidos percolados “jovens”.

A relação DBO/DQO dos líquidos percolados utilizado esteve em torno de 0,7, apresentando grande quantidade de material biodegradável, susceptível ao processo biológico.

5.3. DESEMPENHO DO REATOR

Como já descrito na Metodologia, as amostras foram coletadas em cinco pontos distintos. O primeiro ponto, chamado de Afluente Bruto, é a entrada da primeira câmara (entre a parede e a chicana da primeira câmara). O segundo (Câmara 1), terceiro (Câmara 2), quarto (Câmara 3) e quinto (Câmara 4) figuram-se na tomada superior das câmaras. Com isso, o efluente de cada câmara é também o afluente da seguinte. Desta forma, tentou-se compreender o desempenho de cada câmara nos parâmetros pré-determinados, bem como o desempenho total do reator.

O estudo foi didaticamente dividido em etapas, em função do θ_h empregado, sendo analisados e discutidos os dados sobre os parâmetros observados durante a operação do reator.

As concentração e as remoções investigadas foram calculadas para cada câmara como se esta fosse um reator isolado. Portanto, quando se cita certa porcentagem de remoção, está-se dirigindo à concentração de saída em relação a de entrada daquela câmara e não à concentração de entrada do reator propriamente dito.

Os gráficos foram construídos com os dados dos 7 parâmetros investigados, coletados durante a operação do reator com θ_h de 80; 45; 15 e 5 dias, em um total de 15 coletas (quatro coletas para os três primeiros θ_h e três coletas para o θ_h de 5 dias).

Os gráficos aqui apresentados correspondem aos dados dos parâmetros observados nas quatro coletas realizadas durante a operação do reator com os diferentes θ_h empregados e correspondem aos dados expostos nas Tabelas A.1 a

A.28 (anexas). Vale observar que os valores de ácidos voláteis são expressos em mg CaCO_3/ℓ .

5.3.1 - 1ª ETAPA ($\theta_h = 80$ dias):

Nesta etapa, o reator foi operado durante 270 dias, sendo a primeira coleta realizada após terem-se transcorridos 240 dias (três vezes o θ_h empregado). A TCO variou, no reator, entre 0,3 a 0,9 kg DQO/ m^3 dia, devido às oscilações da carga nos líquidos percolados empregados.

As Figuras a seguir apresentam os resultados das análises realizadas nas amostras coletadas no reator quando operado com θ_h de 80 dias.

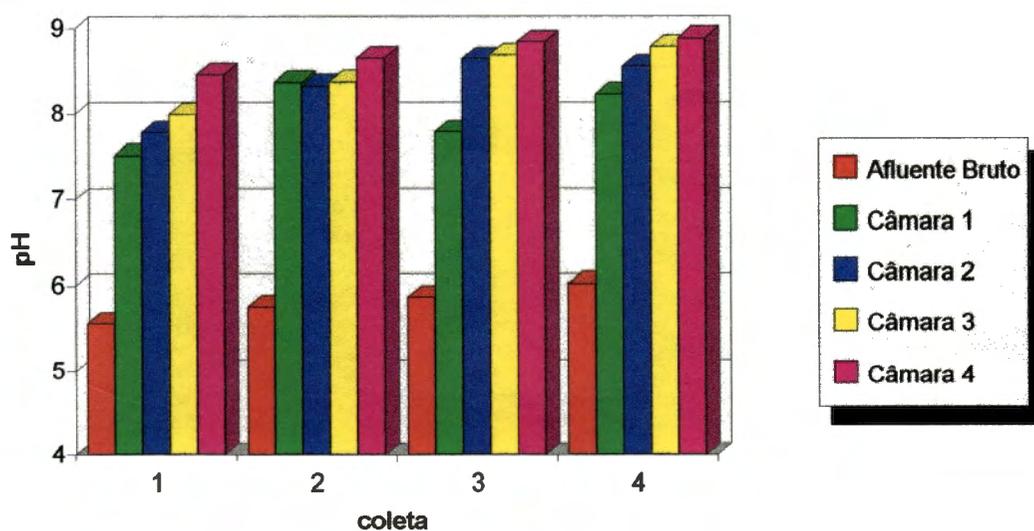


FIGURA 5.1: Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de pH no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta

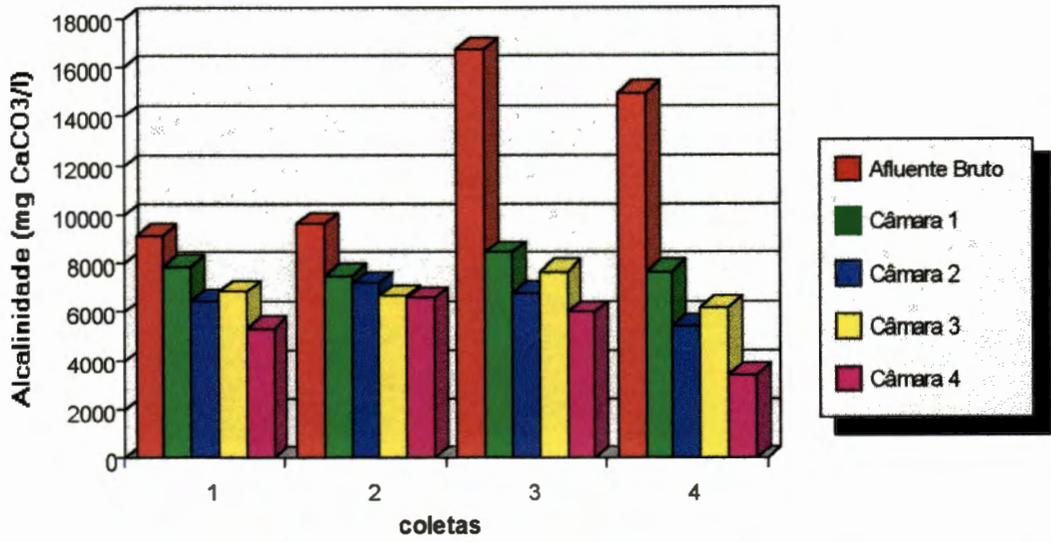


FIGURA 5.2: Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Alcalinidade no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta

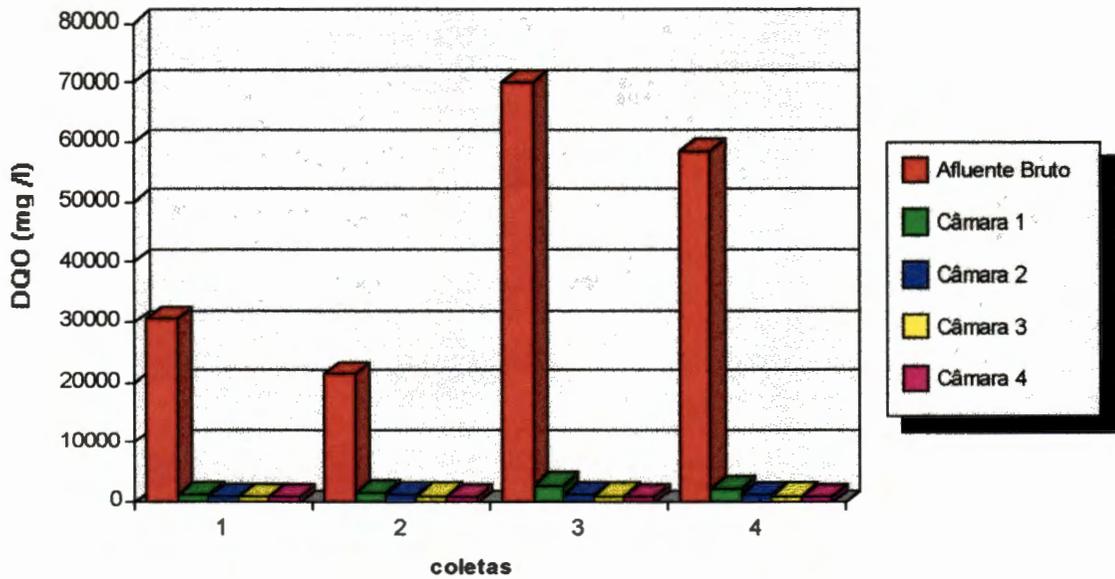


FIGURA 5.3: Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de DQO no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta

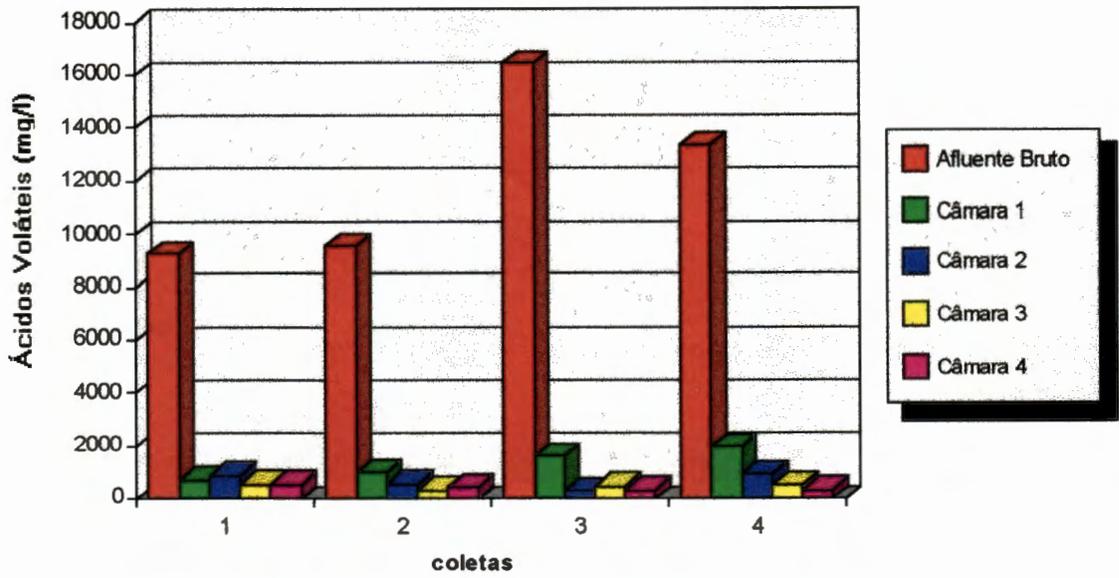


FIGURA 5.4: Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Ácidos Voláteis no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta

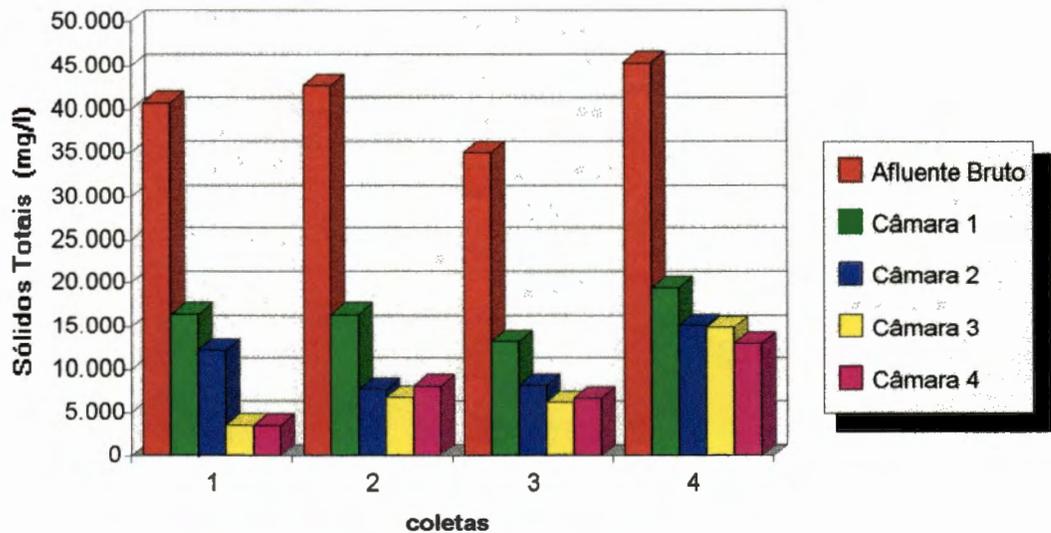


FIGURA 5.5: Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Sólidos Totais no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta

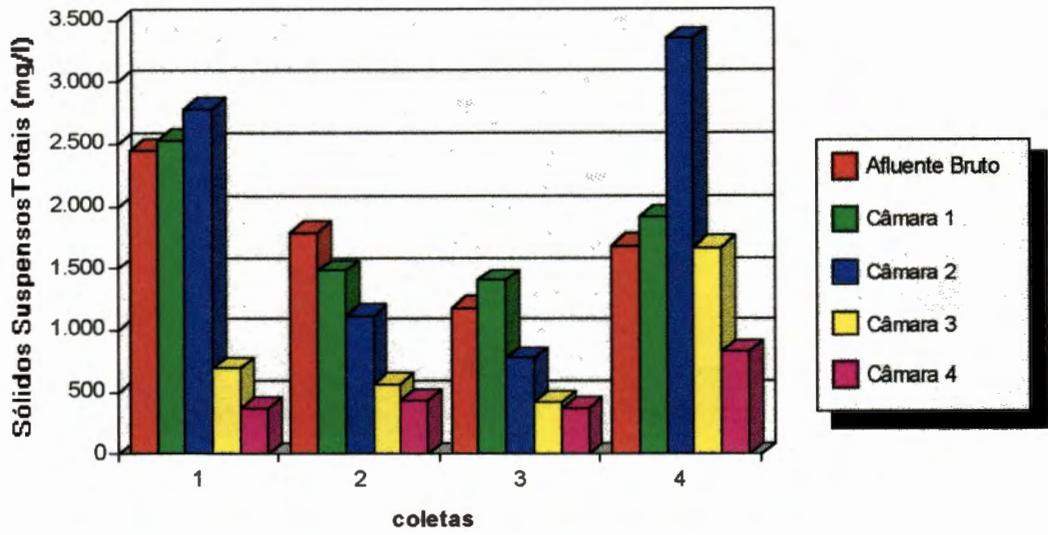


FIGURA 5.6: Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Sólidos Suspensos Totais no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta

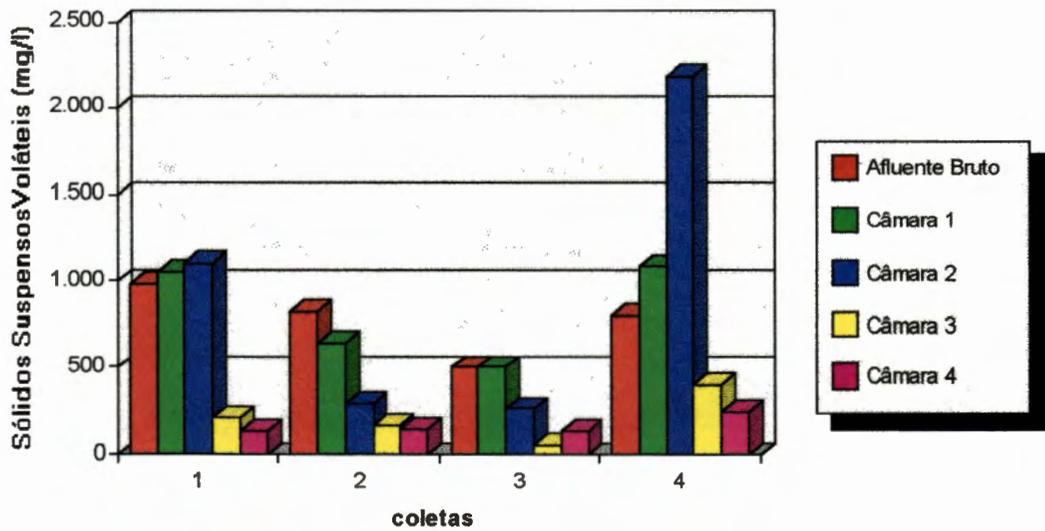


FIGURA 5.7: Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Sólidos Suspensos Voláteis no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta

Durante esta etapa, o principal evento ocorrido foi o melhor desempenho da câmara 1 em relação às demais. A TCO média no reator foi baixa, entre 0,3 a 0,9 kg DQO/m³ dia.

Com base nas Figuras 5.3.1 a 5.3.7 pode-se notar que a câmara 1 foi a mais eficiente no consumo do material biodegradável e também na remoção de sólidos totais.

O pH se manteve sempre alcalino, sendo os menores valores detectados na câmara 1, que esteve em torno de 8,0, com o menor valor em 7,5. Segundo McCARTY (1974) apud POVINELLI (1994), valores ideais de pH para o desenvolvimento de bactérias metanogênicas, encontram-se entre 7,0 e 8,0. O pH apresentou incrementos em cada câmara, atingindo média de 8,7 na câmara 4.

Apesar do pH se manter alto, houve certo consumo de alcalinidade na câmara 1, entretanto, notou-se também “geração” de alcalinidade na câmara 3. Valores de alcalinidade no efluente do reator estiveram na média de 5.300 mg/l e se mantiveram constantes em cada câmara.

A DQO e os ácidos voláteis tiveram comportamentos semelhantes dentro do reator, ou seja, foram em grande parte consumidos na câmara 1 (média de 95 e 90% de remoção de DQO e ácidos voláteis, respectivamente). As demais câmaras tiveram pouca participação no desempenho final do reator. Valores de DQO e ácidos voláteis no afluente oscilaram muito (21.000 a 70.000 mg/l para DQO e 9.000 a 16.000 mg/l para ácidos voláteis), porém os valores destes parâmetros no efluente se mantiveram constantes, em torno de 1.000 mg/l de DQO e 400 mg/l de ácidos voláteis. Apesar da ampla oscilação dos valores de DQO e ácidos voláteis no

afluente, provavelmente devido a coletas efetuadas em pontos distintos no aterro sanitário, na câmara 1 obteve-se basicamente a mesma eficiência, independente da TCO aplicada (de 0,81 a 2,66 kg DQO/m³ dia). Analisando-se a câmara 1 como um reator isolado, esta apresentou θ_h de 26 dias e para tal desempenho obtido, pode-se prever que um reator de manta de lodo, com estes parâmetros apresentados na câmara 1, seria eficiente no tratamento dos líquidos percolados. As demais câmaras apresentaram θ_h de 17,6 dias.

A câmara 1 se mostrou também mais eficiente na remoção de ST, obtendo-se, em média, 60% de eficiência. Porém, ao se tratar de SST e SSV, nota-se, nas Figuras 5.3.6 e 5.3.7, que a câmara 3 foi mais eficiente, apresentando 55 e 72% de remoção de SST e SSV, respectivamente. Nos dados de coletas 1 e 4, houve arraste de lodo nas câmaras 1 e 2, provavelmente devido a velocidade superficial do líquido. Apesar disso, observou-se remoção, no reator, em torno de 81; 70 e 78% de ST; SST e SSV, respectivamente.

5.3.2 - 2ª ETAPA ($\theta_h = 45$ dias)

Nesta etapa, o reator foi operado durante 120 dias, sendo a primeira coleta realizada após terem-se transcorridos 90 dias (duas vezes o θ_h empregado). A TCO variou, no sistema, entre 1,18 a 1,53 kg DQO/m³ dia.

Durante esta etapa, ocorreu entupimento na entrada da primeira câmara (entre parede e a chicana), sendo necessário descarte do lodo (200 ml). Após ter sido feito isso, o reator foi operado normalmente, sem ocorrer oscilações na eficiência e nos parâmetros monitorados.

As Figuras a seguir apresentam os resultados das análises realizadas nas amostras coletadas no reator quando operado com θ_h de 45 dias. Vale observar que os valores de ácidos voláteis são expressos em mg CaCO₃/l.

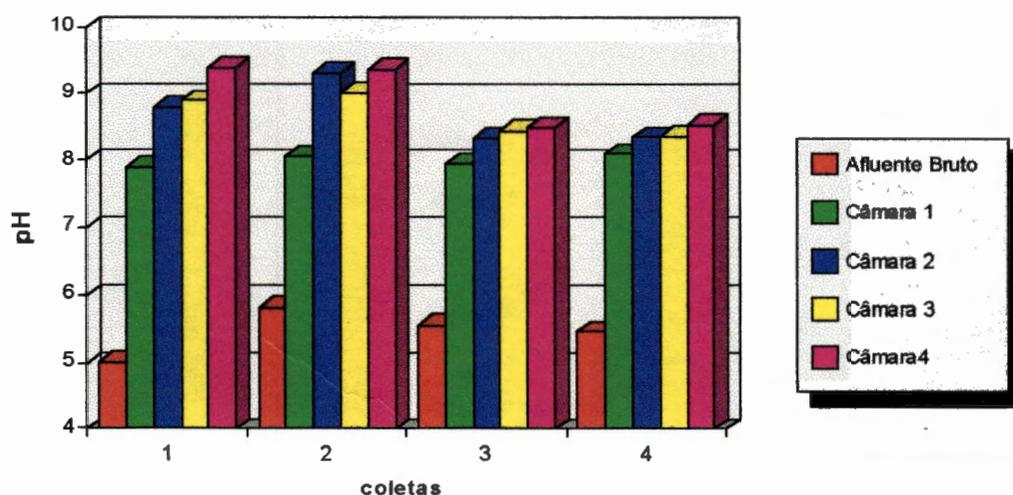


FIGURA 5.8: Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de pH no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta

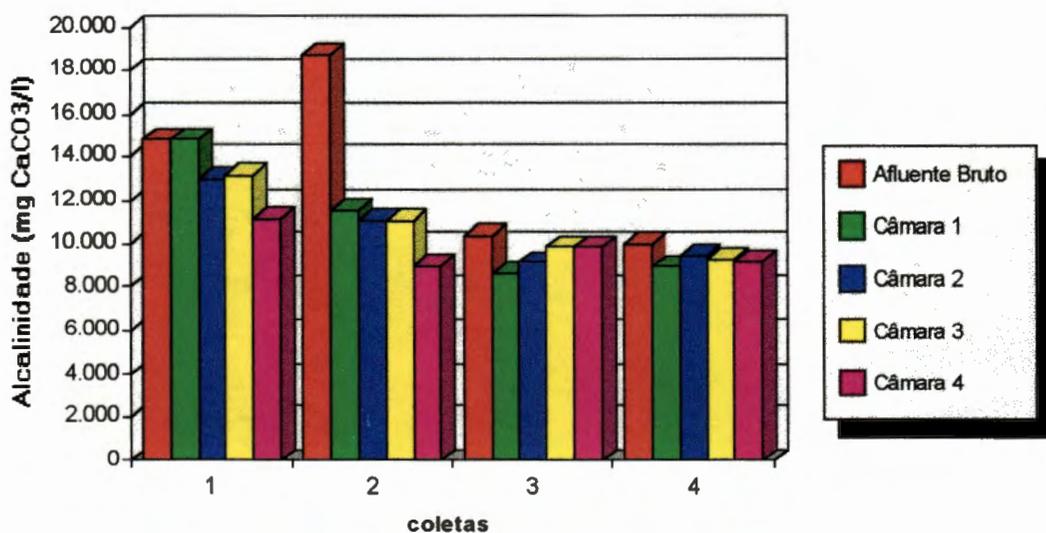


FIGURA 5.9: Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Alcalinidade no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta

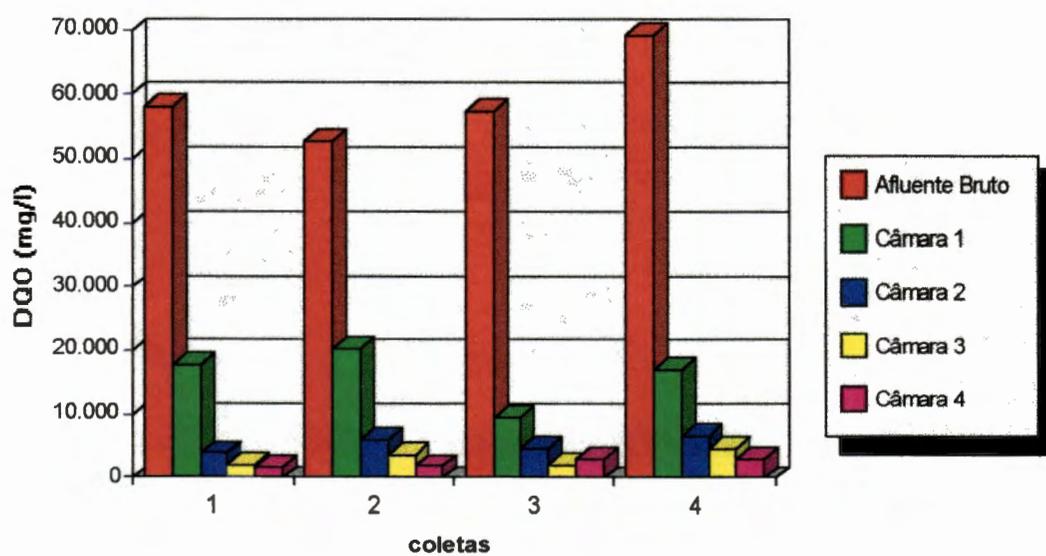


FIGURA 5.10: Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de DQO no afluente bruto e nos diversos pontos de coleta

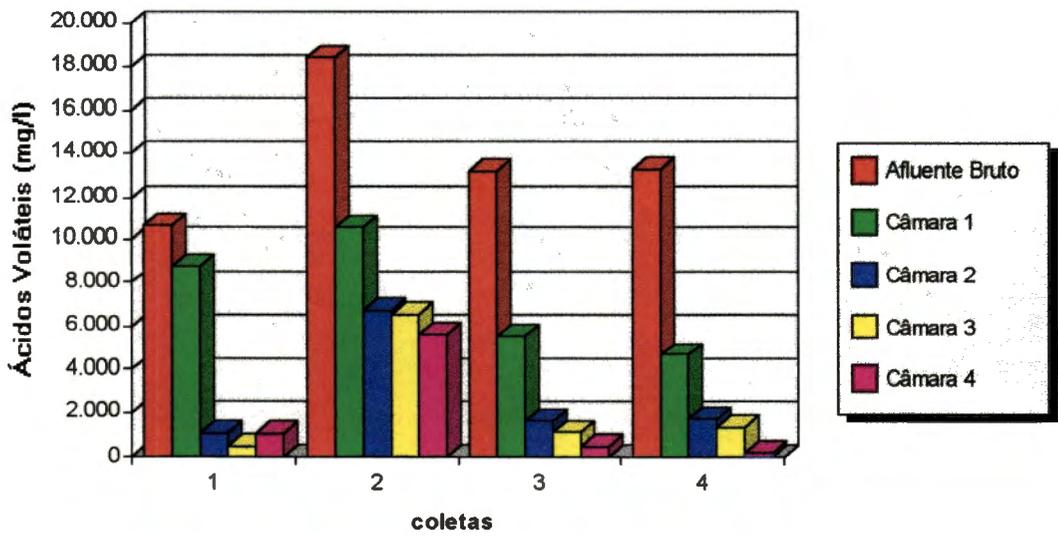


FIGURA 5.11: Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Ácidos Voláteis no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta

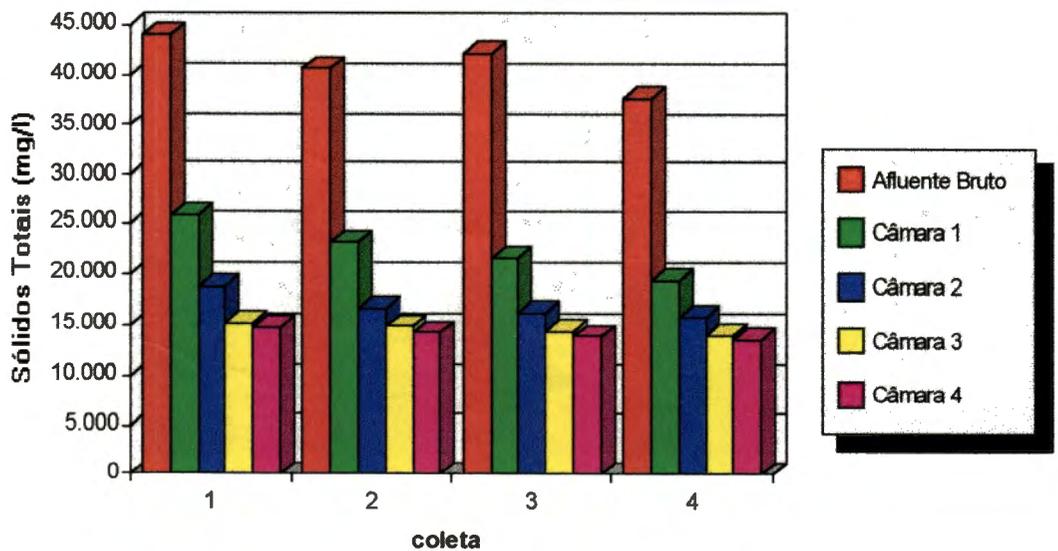


FIGURA 5.12: Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Sólidos Totais no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta

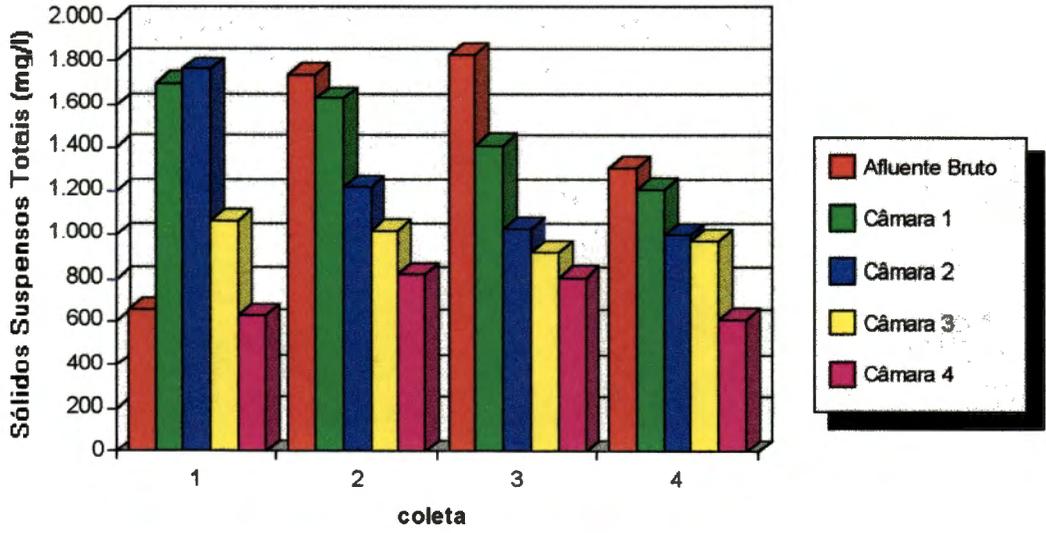


FIGURA 5.13: Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Sólidos Suspensos Totais no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta

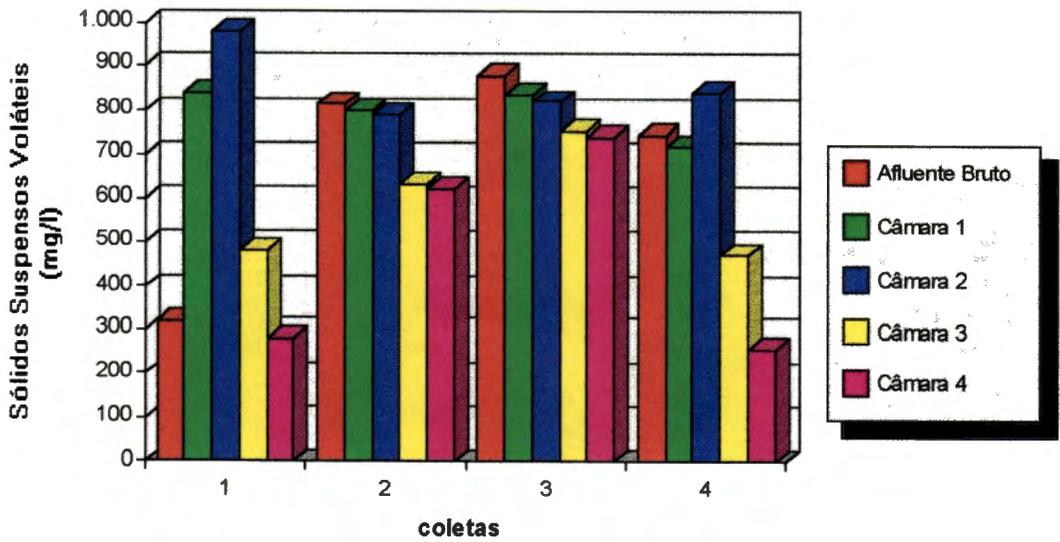


FIGURA 5.14: Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Sólidos Suspensos Voláteis no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta

Nesta etapa houve uma queda na eficiência da câmara 1 (em relação aos dados da 1ª etapa), com aumento na eficiência das demais câmaras. O desempenho geral do reator, em relação ao desempenho apresentado na etapa anterior, ainda foi bom, notando-se queda na remoção de sólidos. A TCO do reator foi semelhante àquela encontrada na câmara 1 da etapa anterior, sendo os maiores valores de TCO observados na câmara 1 (até 4,65 kg DQO/m³ dia).

Valores de pH tiveram ligeiro acréscimo em relação àqueles encontrados na etapa anterior. A câmara 1 apresentou menores valores, em torno de 8,00. O mesmo pode ser observado com a alcalinidade, apresentando discreta “geração” na câmara 3, acompanhada pelo aumento do pH. Em todas as câmaras, valores de alcalinidade permaneceram estáveis e sempre acima de 9.000 mg/l. Porém, tais valores foram maiores do que aqueles encontrados na etapa anterior.

Nas Figuras 5.3.8 a 5.3.14, pode-se observar que houve otimização do desempenho de cada câmara, em relação aos parâmetros DQO e ácidos voláteis. O reator apresentou eficiência de 96 e 88% na remoção de DQO e ácidos voláteis, respectivamente, sendo a câmara 1 a mais eficiente na remoção da DQO (em torno de 72%) e a câmara 2 a mais eficiente para ácidos voláteis (em torno de 65%). A TCO na câmara 1 foi maior do que valores encontrados nas câmaras subsequentes e variou de 3,57 a 4,65 kg DQO/m³ dia para θ_h , nesta câmara (tomando-a como um reator isolado), de 15 dias. Nas demais câmaras, o θ_h foi de 10 dias.

O reator obteve menor eficiência na remoção de sólidos em relação àquela encontrada na etapa anterior, ficando em torno de 66; 42 e 29% para ST SST e SSV, respectivamente. Houve arraste de lodo na primeira coleta, nas câmaras 1 e

2, provavelmente devido à mudança do θh , com conseqüente aumento da vazão.. A câmara 1 foi a mais eficiente na remoção de ST, entretanto apresentou baixíssima eficiência na remoção de SST e SSV (em torno de 12 e 3% para SST e SSV, respectivamente).

5.3.3 - 3ª ETAPA ($\theta h = 15$ dias)

Nesta etapa, o reator foi operado durante 52 dias, sendo a primeira coleta realizada após terem-se transcorridos 30 dias (duas vezes o θh empregado). A TCO variou, no sistema, entre 3,37 a 4,84 kg DQO/m³ dia, chegando a alcançar 14,88 kg DQO/m³ dia na câmara 2.

As Figuras a seguir apresentam os resultados das análises realizadas nas amostras coletadas no reator quando operado com θh de 15 dias. Vale observar que os valores de ácidos voláteis são expressos em mg CaCO₃/l.

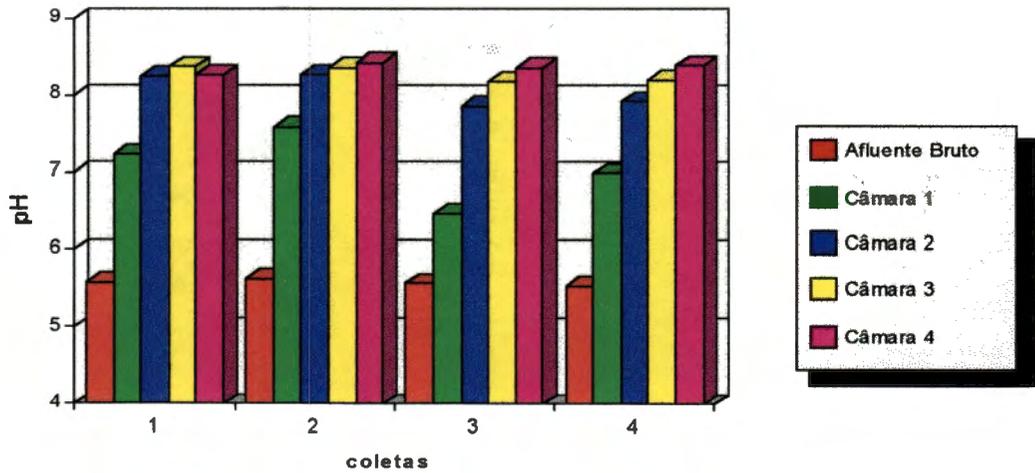


FIGURA 5.15: Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de pH no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta

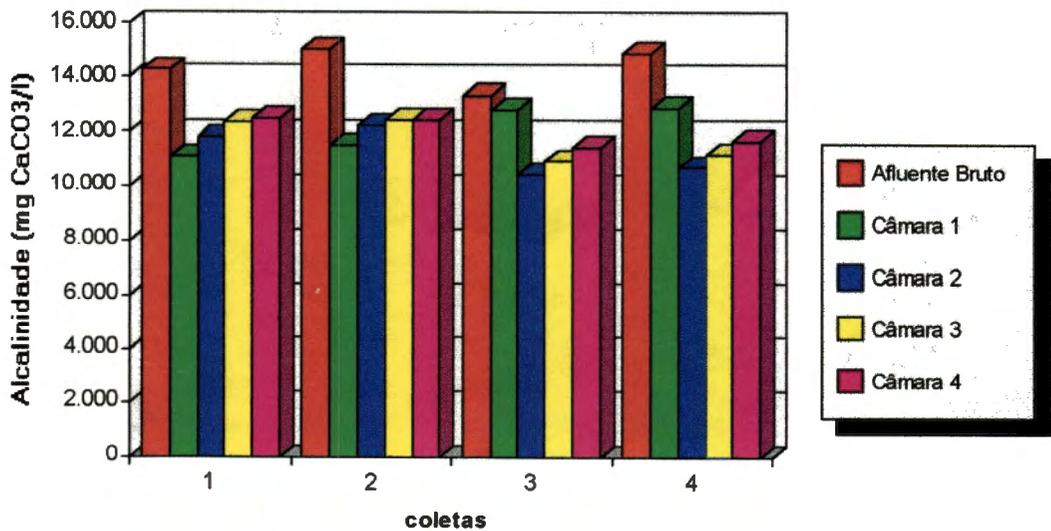


FIGURA 5.16: Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Alcalinidade no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta

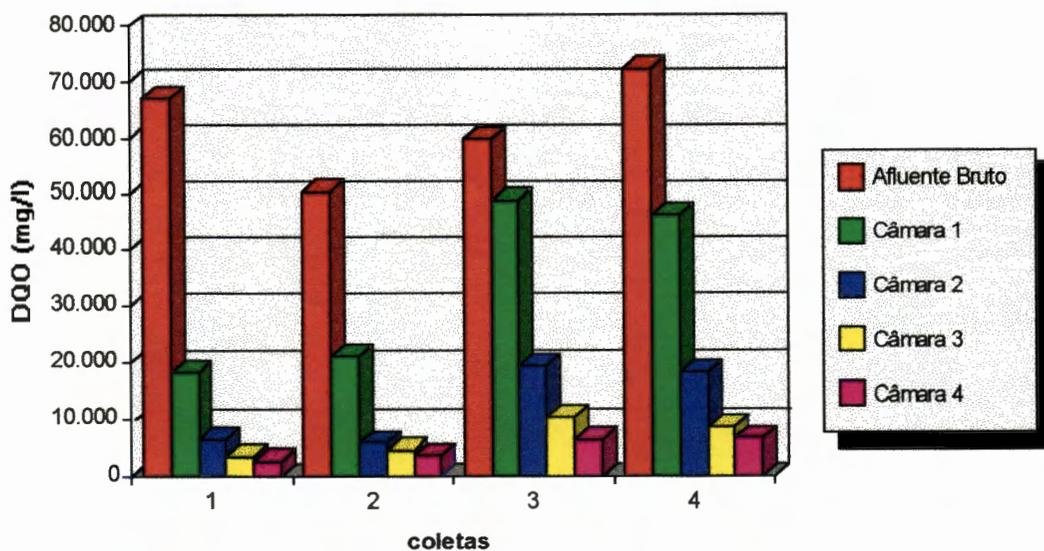


FIGURA 5.17: Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de DQO no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta

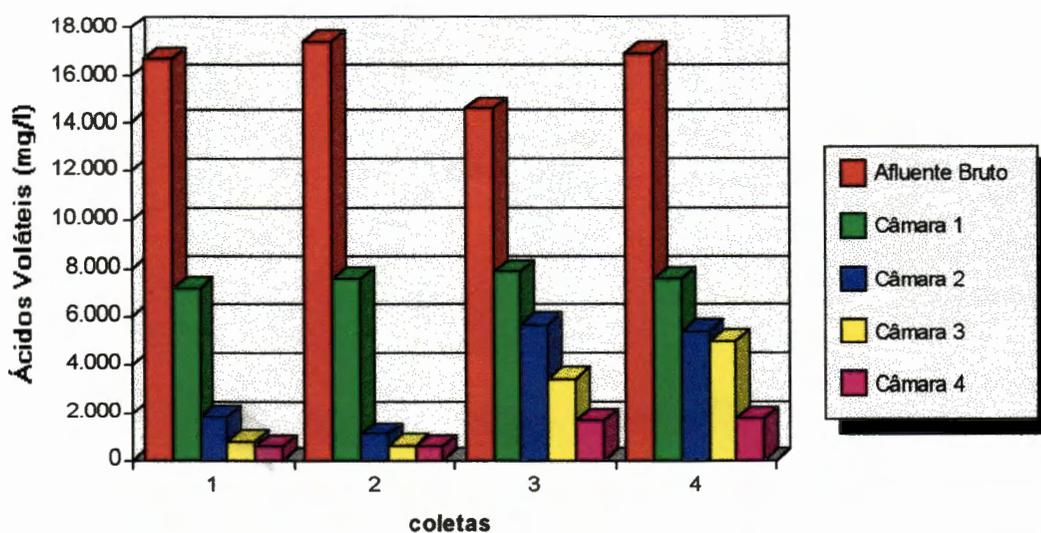


FIGURA 5.18: Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Ácidos Voláteis no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta

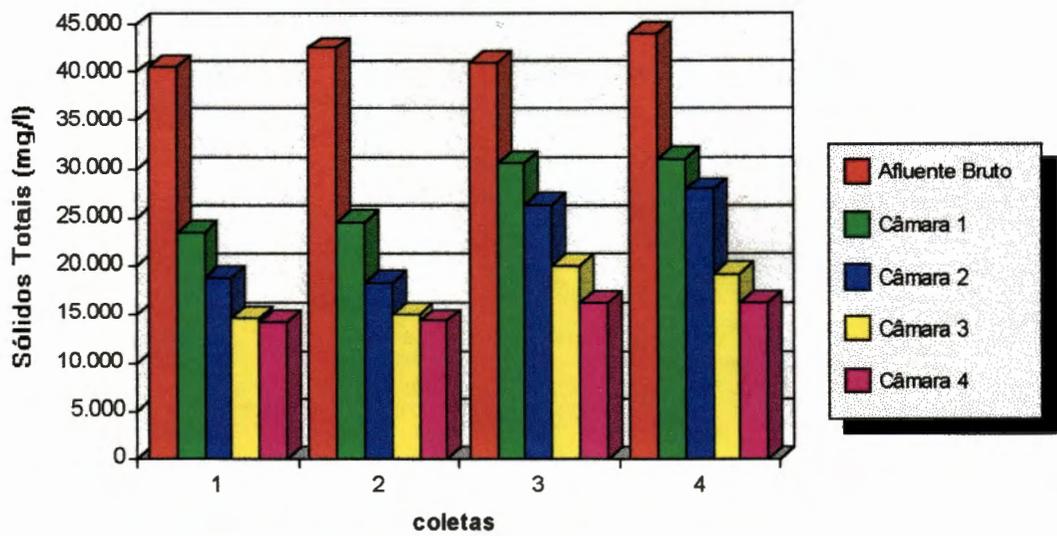


FIGURA 5.19: Reator Anaeróbico Compartimentado: Valores de Sólidos Totais no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta

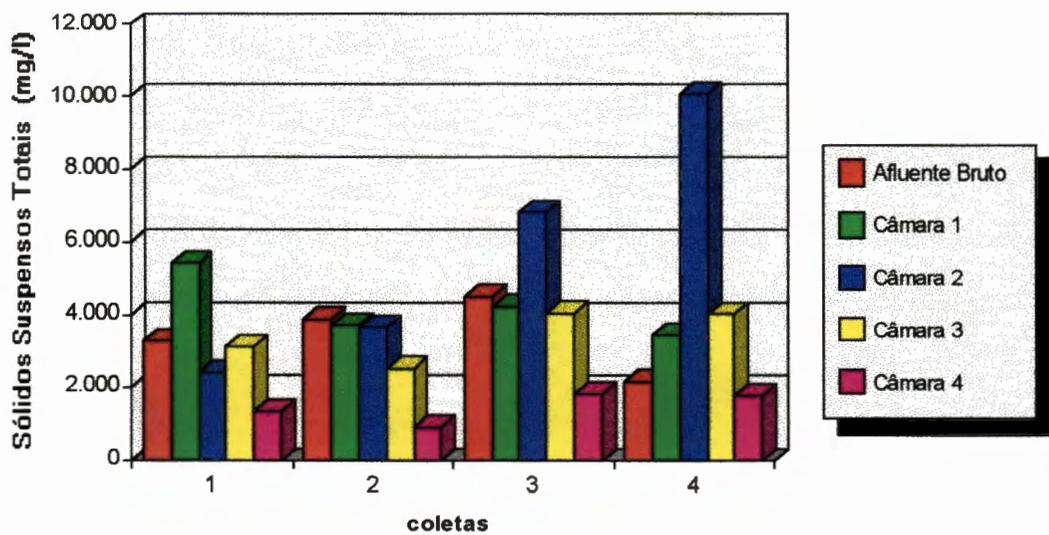


FIGURA 5.20: Reator Anaeróbico Compartimentado: Valores de Sólidos Suspensos Totais no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta

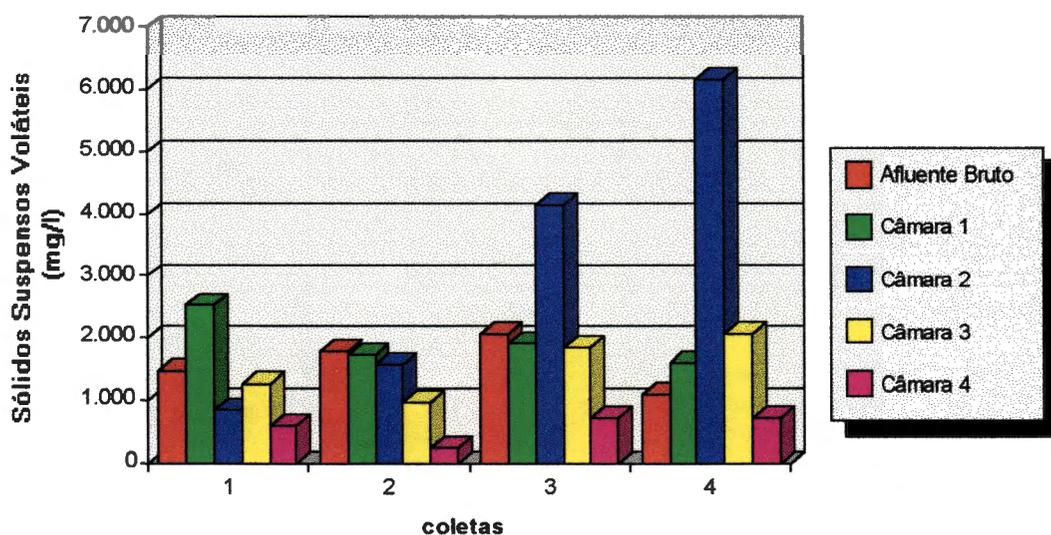


FIGURA 5.21: Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Sólidos Suspensos Voláteis no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta

Nesta etapa, em relação a anterior, houve queda brusca da eficiência da câmara 1, seguida de acidificação. A câmara 2 foi a maior responsável pelo bom desempenho do reator.

Valores de pH se mantiveram entre 8,28 a 8,44 no efluente, porém nas duas últimas coletas, houve queda de pH atingindo valores de até 6,4 na câmara 1, dando início a acidificação neste compartimento. As demais câmaras permaneceram com valores em torno de 8,00.

A alcalinidade se manteve estável em todas as câmaras, com valores acima de 11.000 mg/l. Houve “geração” de alcalinidade nas câmaras 3 e 4. A câmara 2 somente consumiu alcalinidade nas duas últimas coletas, quando ocorreu queda do pH.

Nas duas primeiras coletas, a câmara 1 ainda obteve bom desempenho, removendo até 73% de DQO e 57% de ácidos voláteis. Entretanto, nas duas últimas, a eficiência na remoção de DQO e ácidos voláteis caiu a 18 e 46%, respectivamente. A câmara 2, na remoção da DQO, alcançou desempenho semelhante durante as quatro coletas (aproximadamente 65%). Porém, na remoção de ácidos voláteis, a câmara 2 se comportou de forma semelhante à câmara 1, ou seja, alta eficiência nas duas primeiras coletas (até 87%) e baixa nas duas últimas (29%). Vale-se observar que θ_h na câmara 1, durante esta etapa, foi de 5 dias e a TCO variou entre 10,21 a 14,68 kg DQO/m³ dia. O θ_h das demais câmaras foi de 3,3 dias.

Na última coleta, observa-se, pela Figura 5.3.18, que a câmara 3 teve baixíssima eficiência na remoção de ácidos voláteis (8%), entretanto a câmara 4 removeu 66%.

O reator, nesta etapa, apresentou maior remoção de SSV (62%) do que na etapa anterior (29%), sendo as câmaras 3 e 4 as mais eficientes, tanto na remoção de SSV quanto de SST. Houve arraste de lodo nas câmaras 1; 2 e 3.

Nas duas últimas coletas, pode-se observar, pelas Figuras 5.3.20 e 5.3.21 que houve melhora do desempenho da câmara 3 na remoção de SST e SSV. O mesmo pode ser observado na câmara 4, porém quando da remoção de ST (Figura 5.3.19).

A câmara 1 foi a mais eficiente na remoção de ST (34%), porém com menor eficiência do que aquela encontrada na etapa anterior.

4ª ETAPA ($\theta_h = 5$ dias)

Nesta etapa, o reator foi operado durante 28 dias, sendo a primeira coleta realizada após terem-se transcorridos 18 dias (três vezes o θ_h empregado). A TCO variou, na entrada do reator, entre 7,80 a 11,24 kg DQO/m³ dia.

Durante esta etapa, ocorreram vários entupimentos nas entradas das câmaras 1 e 2.

As Figuras a seguir apresentam os resultados das análises realizadas nas amostras coletadas no reator quando operado com θ_h de 5 dias. Vale observar que os valores de ácidos voláteis são expressos em mg CaCO₃/ℓ.

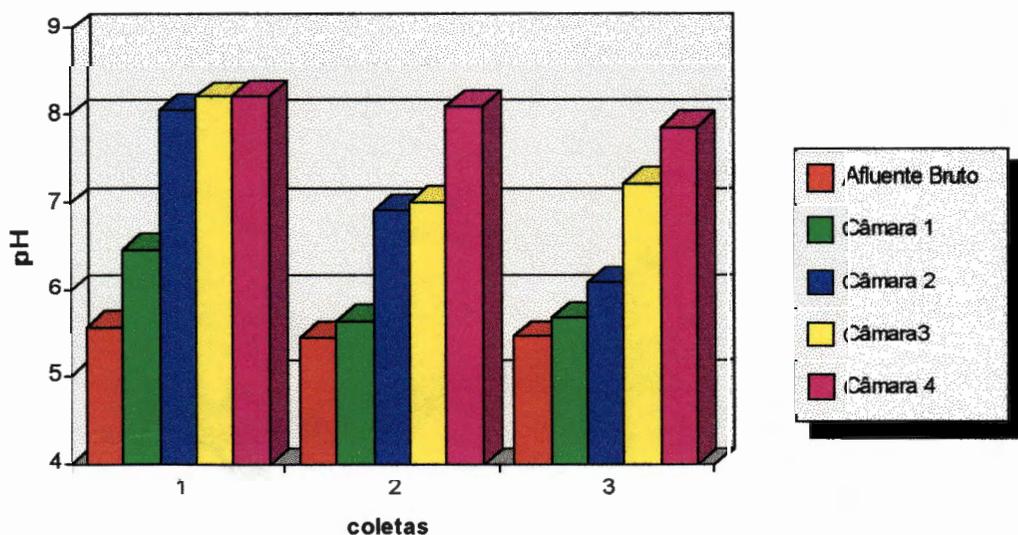


FIGURA 5.22: Reator Anaeróbio Compartmentado: Valores de pH no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta

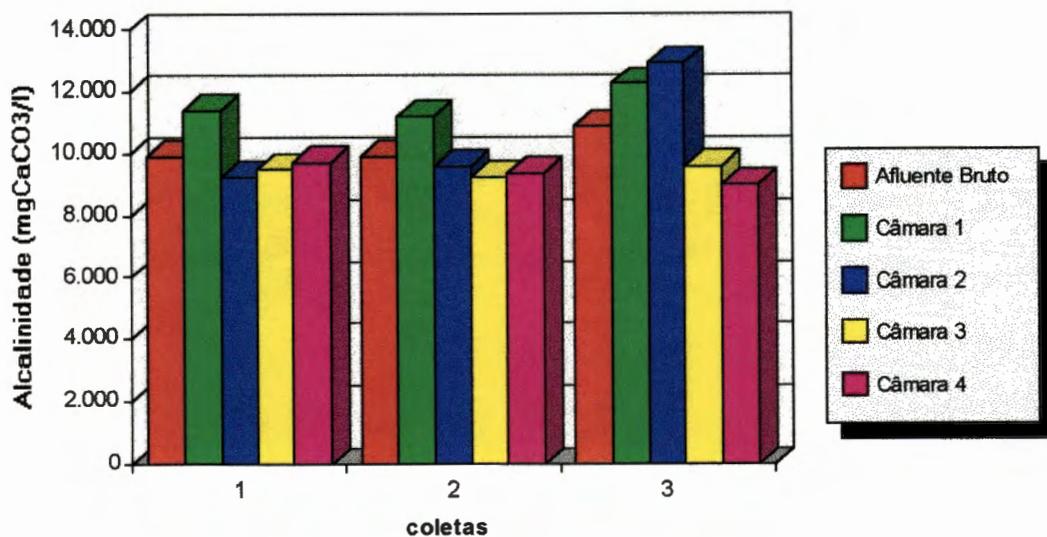


FIGURA 5.23: Reator Anaeróbico Compartimentado: Valores de Alcalinidade no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta

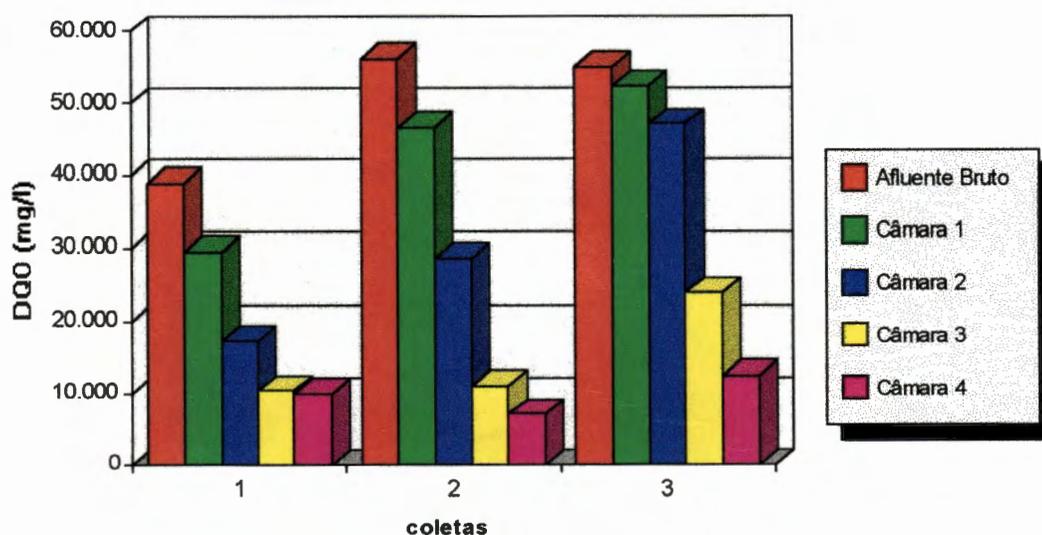


FIGURA 5.24: Reator Anaeróbico Compartimentado: Valores de DQO no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta

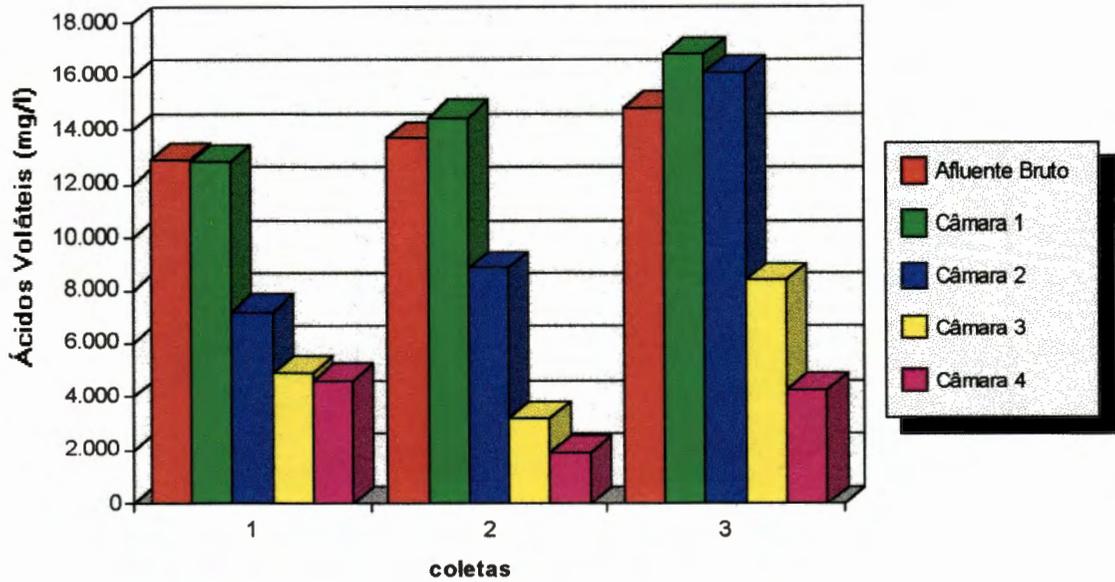


FIGURA 5.25: Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Ácidos Voláteis no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta

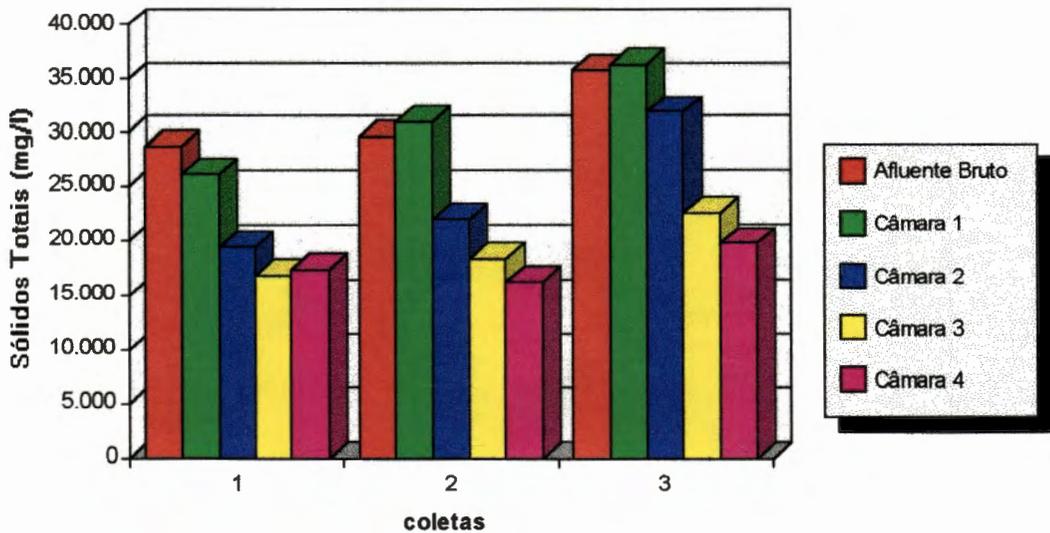


FIGURA 5.26: Reator Anaeróbio Compartimentado: Valores de Sólidos Totais no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta

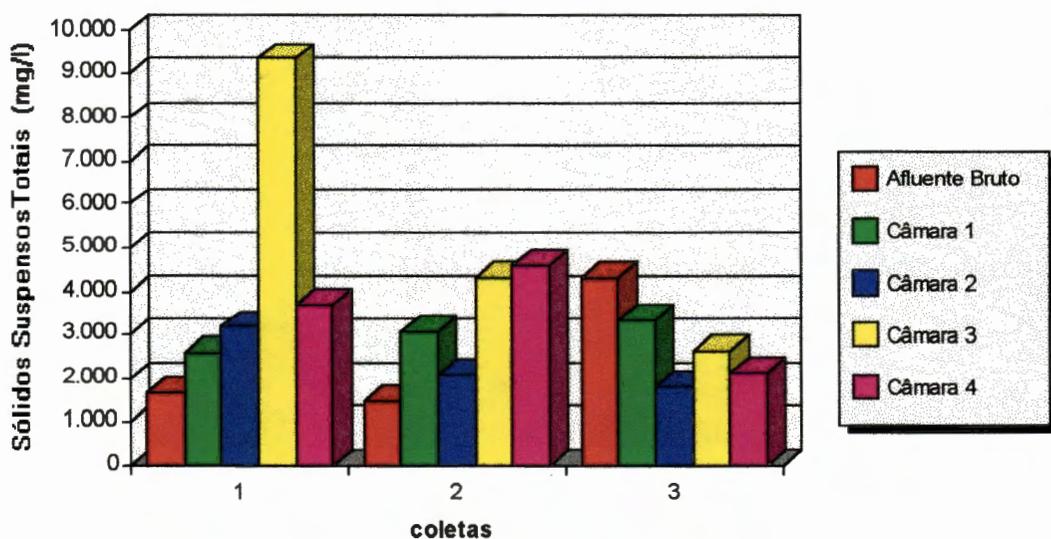


FIGURA 5.27: Reactor Anaeróbico Compartimentado: Valores de Sólidos Suspensos Totais no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta

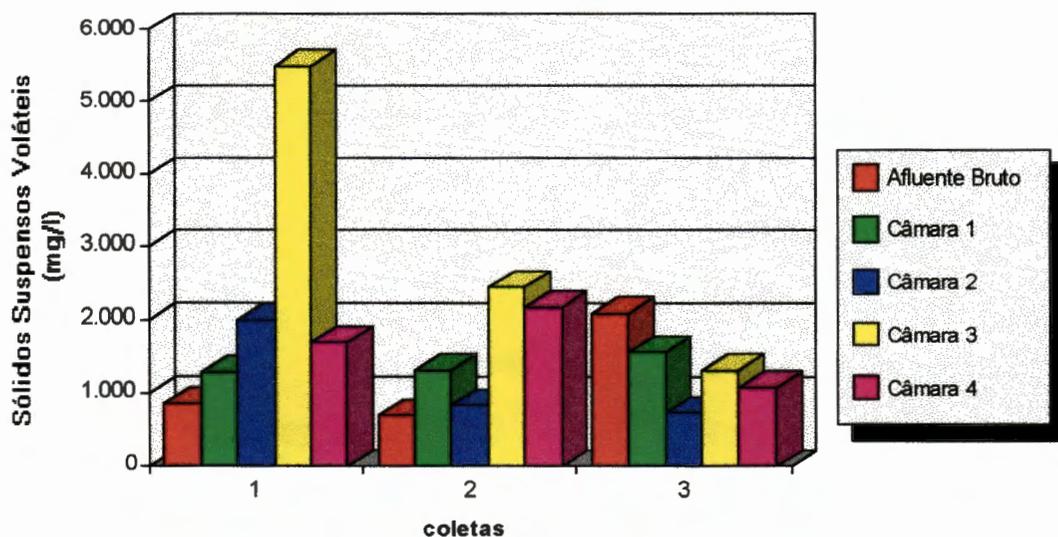


FIGURA 5.28: Reactor Anaeróbico Compartimentado: Valores de Sólidos Suspensos Voláteis no afluyente bruto e nos diferentes pontos de coleta

Esta etapa foi marcada pela acidificação da câmara 1 e o melhor desempenho da câmara 3. Isto ocorreu, provavelmente, devido ao fato de que se uma câmara não for suficientemente eficiente para decompor um certo resíduo – devido a uma carga de choque ou alta TCO – a câmara seguinte terá que desempenhar papel mais atuante para degradar o resíduo. A alta TCO aplicada na câmara 1 (entre 23,64 e 34,07 kg DQO/m³ dia) deve ter sido a responsável por sua acidificação, pois o resíduo foi aplicado com baixo θ_h , levando as bactérias acidogênicas transformar a matéria orgânica em ácidos, porém as bactérias metanogênicas não tiveram tempo hábil para estabilizar esses ácidos. Vale observar que o θ_h empregado na câmara 1 (considerando-a como um reator isolado) foi de 1,7 dias e nas demais câmaras, de 1,3 dias.

O pH caiu em todas as câmaras, em relação aos valores obtidos na etapa anterior, permanecendo em torno de 5,9 na câmara 1 e 8,00 na câmara 4. Apesar dos baixos valores de pH encontrados, na câmara 1 houve “geração” de alcalinidade, acompanhada pelo aumento da concentração de ácidos voláteis. A alcalinidade permaneceu estável em todas as câmaras, com valores sempre acima de 9.000 mg/l. Em relação à etapa anterior, os valores de alcalinidade foram pouco menores.

As câmaras 1 e 2 foram pouco eficientes na remoção de DQO (cerca de 16% e 30%, respectivamente), no entanto, a câmara 3 alcançou até 61% de eficiência. Valores de DQO no efluente foram bastante altos (até 12.448 mg/l), o mesmo ocorrendo para valores de ácidos voláteis (até 4.640 mg/l). Notou-se

aumento da concentração de ácidos voláteis na câmara 1, sendo estes removidos, principalmente na câmara 3.

A remoção de sólidos nesta etapa foi muito prejudicada, provavelmente devido à alta vazão empregada e pela maior produção de gás, ficando a remoção de ST, SST e SSV no reator, em torno de 43; 51 e 48%, respectivamente. Maiores porcentagens de remoção foram obtidas na câmara 2. Notou-se arraste do lodo na câmara 3 e, em algumas coletas, foi observado arraste do lodo em todas as câmaras.

Apesar de o reator ter apresentado durante todas as etapas de operação, desempenho satisfatório na remoção de DQO e ácidos voláteis (eficiência nunca menor que 75% para DQO e 64% para ácidos voláteis), o seu efluente ainda contém níveis elevados de matéria orgânica. Alguns autores (MORGAN, 1990; BOOPATHY e TILCHE, 1991) sugerem tratamento combinado de águas residuárias com alta concentração de matéria orgânica para otimizar os resultados finais. Tais tratamento biológico anaeróbio com pré-tratamento físico-químico e/ou pós-tratamento biológico aeróbio.

5.4. INFLUÊNCIA DA TAXA DE CARREGAMENTO ORGÂNICO NA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DA DQO

Neste tópico, as câmaras que constituem o reator foram tomadas como reatores isolados. No cálculo da eficiência de cada câmara, foram tomados dados de concentração de DQO do afluente de cada câmara, o mesmo foi feito para o cálculo da TCO. Foram, ainda, utilizados os θ_h globais do reator e não de cada câmara isoladamente, o que será citado posteriormente no texto.

Para o cálculo da eficiência e TCO do reator, utilizou-se a concentração de DQO do afluente bruto e do efluente final do reator (câmara 4).

Para a construção dos gráficos foram utilizados, além do θ_h empregado, os dias de operação correspondentes às coletas efetuadas durante a operação do sistema.

O estudo foi didaticamente dividido em duas partes: influência da TCO na remoção da DQO no reator e nas câmaras que o constituem.

5.4.1. REATOR

A Figura 5.29 mostra o desempenho do Reator Compartmentado Anaeróbio na remoção da DQO, aplicando-se diversas TCO médias no reator como um todo.

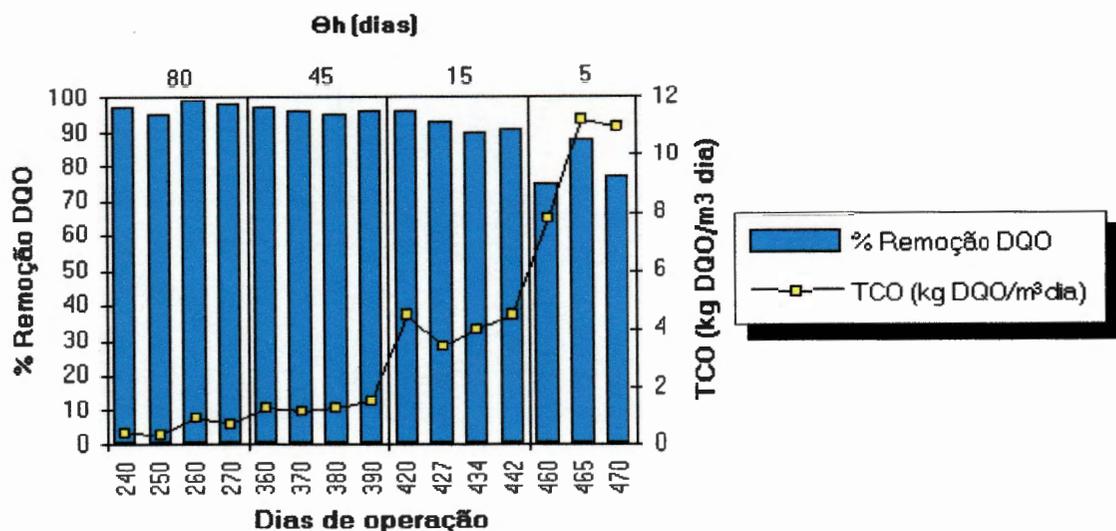


FIGURA 5.29: Reator Anaeróbico Compartimentado: Eficiência na Remoção da DQO em relação à TCO aplicada nos diversos θ_h testados durante o experimento.

Durante a operação do reator com θ_h de 80 dias, a TCO média variou de 0,3 a 0,9 kg DQO/m³ dia e a média de remoção da DQO foi de 97%. Observa-se que para pequenos valores de TCO empregados, a eficiência não foi alterada, o mesmo acontecendo para operação com θ_h de 45 dias, quando a TCO variou de 1,2 a 1,5 kg DQO/m³ dia e a eficiência global ficou em torno de 96%.

Quando o reator foi operado com θ_h de 15 dias, a TCO média variou entre 3,4 e 4,8 kg DQO/m³ dia e a média de remoção foi de 92%. Porém, ao se diminuir o θ_h para 5 dias, a TCO se tornou elevada e a eficiência de remoção de DQO caiu para aproximadamente 80%.

A Tabela 5.1 apresenta uma comparação do desempenho do Reator Anaeróbio Compartimentado com outros reatores anaeróbios no tratamento de águas residuárias com alta concentração de matéria orgânica. Observa-se que na construção da tabela utilizou-se as várias etapas de operação do reator, de acordo com o θ h empregado (80; 45; 15 e 5 dias para as 1^a; 2^a; 3^a e 4^a etapas, respectivamente).

TABELA 5.1: Comparação do desempenho do Reator Anaeróbio Compartimentado (RAC) com o de outros reatores

Tipo Reator	Efluente empregado	Volume Reator (l)	TCO (kg DQO/m ³ dia)	% Remoção DQO
UASB ^(a)	Líquidos Percolados	-	0,3	52,5
UASB ^(a)	Líquidos Percolados	-	6,8	88,2
Filtro Anaeróbio ^(b)	Líquidos Percolados	3,0	1,45	95
UASB-Híbrido ^(c)	Vinhaça	165	20	77
UASB-Híbrido ^(d)	Líquidos Percolados	30	6,0	90
UASB-Híbrido ^(e)	Líquidos Percolados	2,4	22	96
UASB-Híbrido ^(f)	Líquidos Percolados	30	10	85
RAC ^(g) - 1 ^a etapa	Líquidos Percolados	10	0,9	99
RAC ^(g) - 2 ^a etapa	Líquidos Percolados	10	1,3	97
RAC ^(g) - 3 ^a etapa	Líquidos Percolados	10	4,5	96
RAC ^(g) - 4 ^a etapa	Líquidos percolados	10	11	88

LEGENDA:

^(a) BARRUETA e CASTRILÓN (1992)

^(b) HENRY *et alii* (1987)

^(c) BOOPATHY e TILCHE (1991)

^(d) IZA (1991)

^(e) KENNEDY e GUIOT (s.n.t.)

^(f) KEENAN *et alii* (1993)

^(g) Presente trabalho

Observando os dados apresentados na Tabela 5.1, nota-se que o Reator Anaeróbio Compartimentado teve bom desempenho em vários θ_h empregados, quando comparado com outros tipos de reatores. O reator foi eficiente no tratamento de líquidos percolados quando operado tanto com altas como com baixas TCO. Ressalta-se que todos os trabalhos apresentados na Tabela 5.1 são em escala de laboratório ou piloto, não apresentando dados de sistemas em escala real.

5.4.2. CÂMARAS

As figuras a seguir apresentam a eficiência na remoção da DQO em relação às diversas TCO aplicadas nas quatro câmaras que constituem o reator.

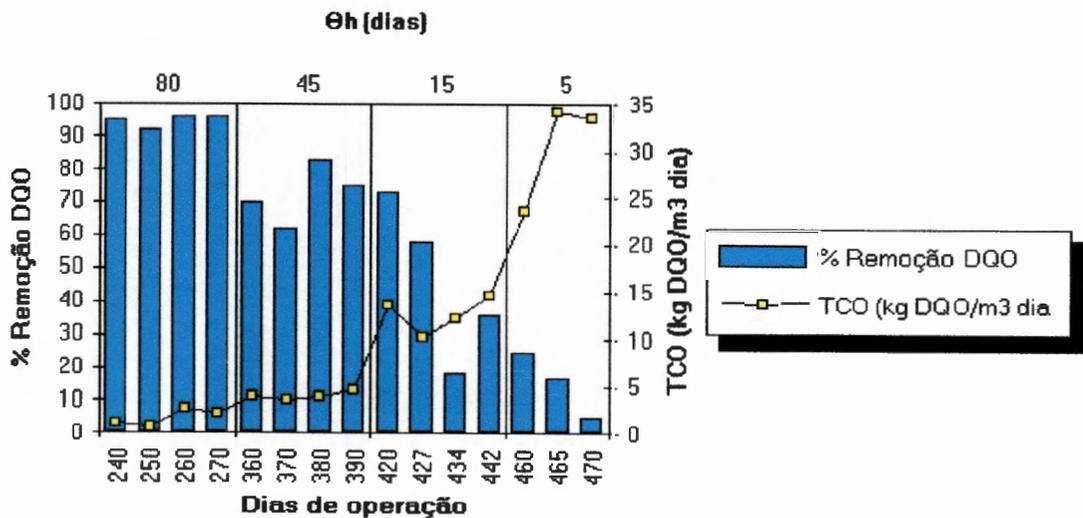


FIGURA 5.30: Eficiência na remoção da DQO em relação à TCO empregada, nos diversos θ_h testados durante o experimento. Valores encontrados para Câmara 1

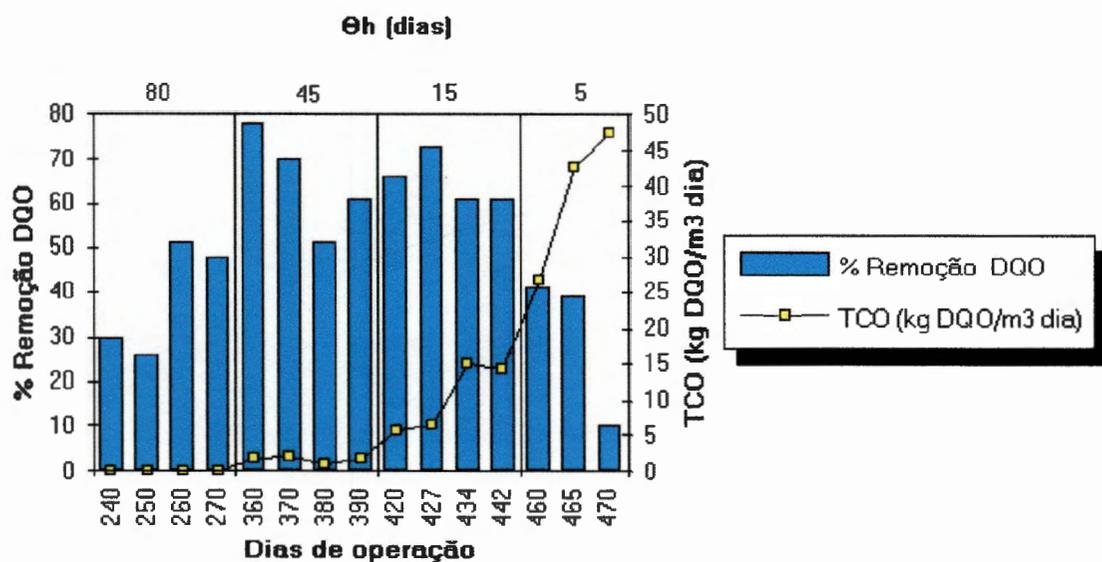


FIGURA 5.31: Eficiência na remoção da DQO em relação à TCO empregada, nos diversos θ_h testados durante o experimento. Valores encontrados para Câmara 2

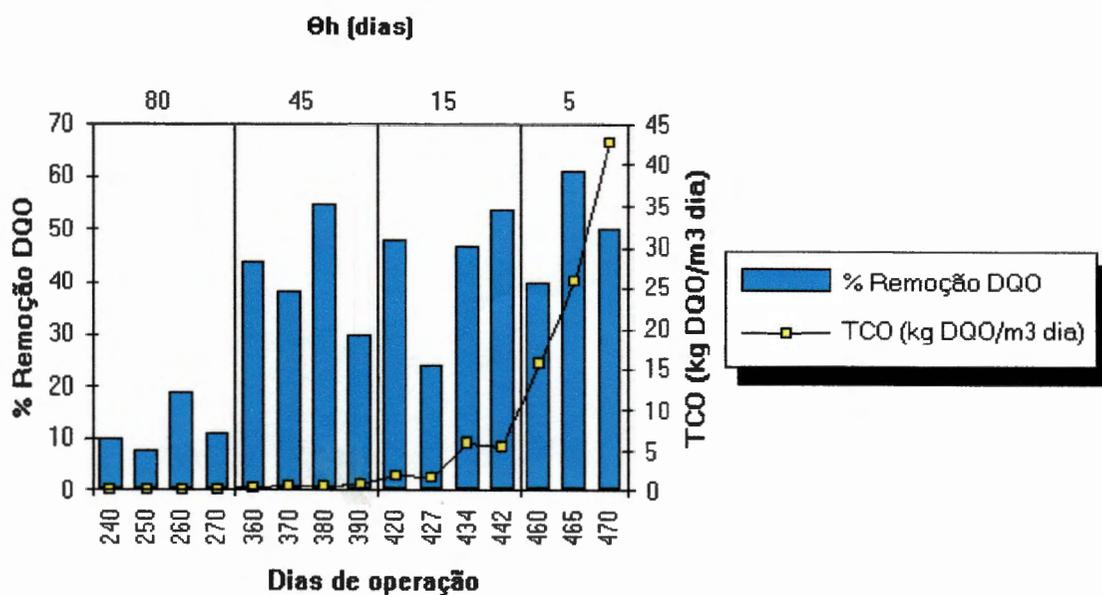


FIGURA 5.32: Eficiência na remoção da DQO em relação à TCO empregada, nos diversos θ_h testados durante o experimento. Valores encontrados para Câmara 3

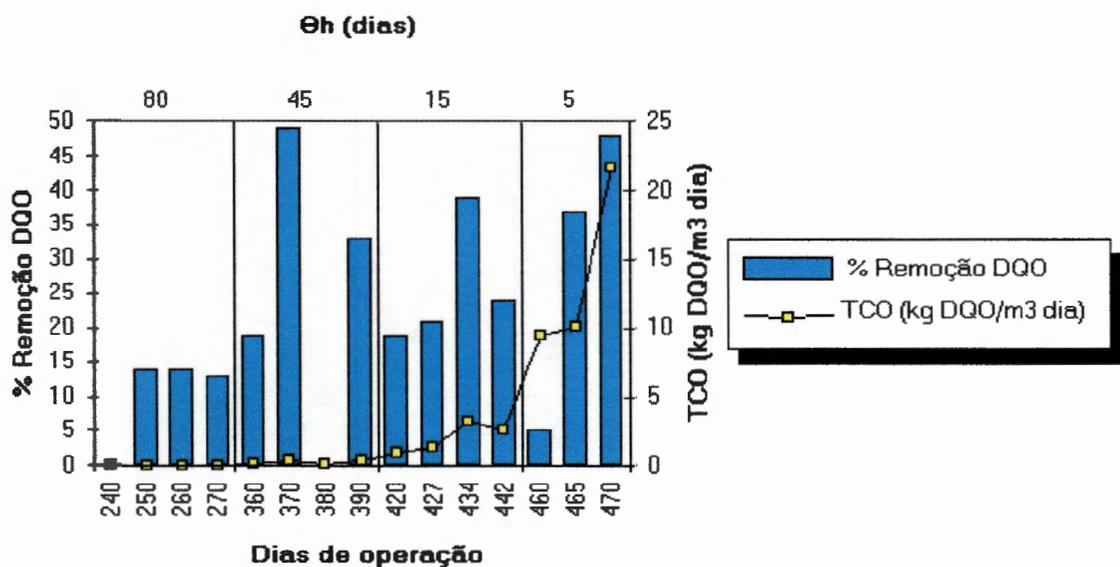


FIGURA 5.33: Eficiência na remoção da DQO em relação à TCO empregada, nos diversos θ_h testados durante o experimento. Valores encontrados para Câmara 4

A TCO variou muito durante o experimento, desde 0,05 a 47,58 kg DQO/m³ dia (para as câmaras 4 e 2, respectivamente).

Os θ_h empregados nas Figuras 5.30 a 5.33 foram aqueles encontrados para o reator como um todo. Entretanto, as câmaras por terem tamanhos distintos, apresentaram, também, θ_h distintos em cada uma. O Quadro 5.1 apresenta os θ_h encontrados em cada câmara que constitui o reator, se forem tratadas como reatores isolados.

QUADRO 5.1 - Valores de θ_h para cada câmara do reator, em relação ao θ_h global aplicado durante o experimento

Pontos	θ_h (dias)			
Reator	80	45	15	5
Câmara 1	26	15	5	1,7
Câmara 2	17,6	10	3,3	1,3
Câmara 3	17,6	10	3,3	1,3
Câmara 4	17,6	10	3,3	1,3

O Quadro 5.1 mostra as diferentes contribuições de cada câmara no θ_h global (θ_h do reator). Como a câmara 1 era maior, observou-se maior contribuição e, também, foi a mais atuante no desempenho geral do reator, suportando as variações da carga afluente

Observando-se os gráficos das Figuras 5.30 a 5.33, pode-se notar que para TCO muito baixas ou muito altas, a eficiência foi bastante prejudicada, sendo a faixa ideal entre 0,5 a 12 kg DQO/m³ dia, os mesmos valores apresentados para o desempenho do reator como um todo.

Ressalta-se que a câmara 1 obteve melhor eficiência quando operada com θ_h de até 45 dias (θ_h da câmara 1, como um reator isolado, de 15 dias). Neste período, a eficiência na remoção da DQO foi sempre maior que 60% (para TCO de aproximadamente 5 kg DQO/m³ dia). Porém, TCO muito altas (de 14 a 35 kg DQO/m³ dia) prejudicaram muito a eficiência, decaindo em até 15%. No caso, quando uma alta taxa foi aplicada, comprometendo o desempenho da câmara, a

seguinte parece ter sido rapidamente “acionada” para desempenhar melhor o seu papel. Isso ocorreu principalmente para menores valores de θ_h .

5.5 - ALGUNS COMENTÁRIOS SOBRE O DESEMPENHO DO REATOR ANAERÓBIO COMPARTIMENTADO

Observa-se que a medida que se diminuiu o θ_h e se aumentou a TCO, as câmaras subsequentes começaram a desempenhar papel mais atuante, pois para altos valores de θ_h e baixos de TCO só era necessária a atuação da câmara 1, pois esta já removia todo material orgânico biodegradável. Isso explica que deve-se tentar otimizar o volume de cada câmara, o θ_h e a TCO global de forma que todas as câmaras passem a receber valores de TCO aproximadamente iguais, reduzindo-se o θ_h adequadamente das câmaras sequenciais.

Todo trabalho visando projeto de reatores compartimentados exige aprovação de piloto ou pelo menos trabalhos de bancada para alcançar esses objetivos. No caso, recomenda-se operar o reator com θ_h acima de 15 dias e com TCO entre 0,5 a 10 kg DQO/m³ dia, aplicadas na primeira câmara.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1. CONCLUSÕES:

De acordo com o exposto no item Resultados e Discussões, pode-se concluir:

- a) o líquido percolado empregado, proveniente do aterro sanitário jovem, objeto desta pesquisa, tem grande quantidade de material biodegradável, (relação DBO/DQO em torno de 0,7), é susceptível de tratamento biológico;

- b) o Reator Anaeróbio Compartimentado foi hábil no tratamento de líquidos percolados gerados no aterro estudado, quando empregada Taxa de Carregamento Orgânica entre 0,3 a 11 kg DQO/m³ dia, porém para alcançar eficiência maior do que 90%, a TCO aplicada resultou, no máximo, 5 kg DQO/m³ dia;
- c) o Reator Anaeróbio Compartimentado, quando operado com tempo de detenção (θ_h) de até 5 dias alcançou até 88% de eficiência na remoção da DQO e até 86% na redução da concentração de ácidos voláteis. Porém, as concentrações destes componentes, no efluente final do reator, foram ainda muito altas. Para se obter maior eficiência, deve-se prever o uso combinado do processo biológico anaeróbio com outros processos: físico-químico e/ou biológico aeróbio;
- d) o lodo a ser utilizado como inóculo do Reator Anaeróbio Compartimentado deve passar por um processo de adaptação de, no mínimo, seis meses;
- e) ao se estudar cada câmara do reator isoladamente, como se esta fosse um reator, conclui-se que reator de manta de lodo (em analogia com a primeira câmara) é eficiente no tratamento dos líquidos percolados, quando operado com θ_h maior que 30 dias, com vistas a obtenção de eficiência maior que 90%, e TCO de até 2,5 kg DQO/m³ dia;

- f) os altos valores de TCO aplicados (acima de 12 kg DQO/m³ dia) ou muito baixos (menores que 0,3 kg DQO/m³ dia) afetaram diretamente o desempenho do reator;
- g) conclui-se, ainda, que todo projeto visando este tipo de reator deve ser precedido pela operação de piloto, que deve ser operado com θ_h maior que 15 dias, para se tentar obter eficiência superior a 90% e TCO de, na primeira câmara, não superior a 10 kg DQO/m³ dia;
- h) conclui-se, finalmente, que para se obter eficiência global superior a 90%, o Reator Anaeróbio Compartimentado foi operado com θ_h inferiores a 15 dias, enquanto o reator de manta de lodo (primeira câmara), para atingir a mesma eficiência, necessitou de θ_h de até 30 dias.

6.2. RECOMENDAÇÕES:

- a) estudar a hidrodinâmica do reator;
- b) analisar a cinética de reações que ocorrem dentro do reator , de forma global e em cada câmara que o constitui;
- c) avaliar a possibilidade de se prever sistema aeróbio como pós-tratamento e/ou sistema físico-químico como pré-tratamento, uma vez que os níveis de componentes orgânicos no efluente do reator ainda são muito altos;
- d) realizar análises de metais pesados, fósforo e fenóis nos líquidos percolados, no efluente de cada câmara e no lodo do reator, bem como sua influência no desempenho final do reator anaeróbio compartimentado;
- e) avaliar o comportamento dos sólidos no reator anaeróbio compartimentado, bem como a estrutura dos grânulos presentes no lodo, por meio de microscopia eletrônica;
- f) deve-se tentar otimizar o volume de cada câmara para que todas elas recebam valores de TCO aproximadamente iguais, com a finalidade de se obter melhor desempenho global do reator;

- g) realizar controle quali-quantitativo dos gases gerados no reator anaeróbio compartimentado quando se tratar líquidos percolados;
- h) tratar gases, se possível, biologicamente;
- i) estudar a ampliação de escala (escala real);

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BACHMANN, A., BEARD, V., McCARTY, P.L. Performance characteristics of the anaerobic baffled reactor. **Water Research**, v.19, n.4, p.99-106, 1985.
- BALLESTERO, T.P., de CASTRO, M.A.H. Real time forecast of landfill leachate. **Proceedings - National Conference on Hydraulic Engineering pt.1 1993**. Publ. by ASCE, New York, NY, USA, p. 186 - 191. 1993 (Abstract do Autor)
- BARRUETA, J. & CASTRILLÓN, L. Anaerobic treatment of leachates in UASB reactors. **J. Chem. Tech. Biotechnol.**, v.54, p.33-37, 1992.
- BESSADA, S.E., STEPHENSON, J.A., ELLIOTT, M.D. Sanitary landfill leachate treatment methods. **Process Safety and Environmental Protection: Translation of the Institution of Chemical Engineers, Part B**, v.71, n.3, p.215-217, Aug. 1993 (Abstract do Autor).



- BOOPATHY, R. & TILCHE, A. Anaerobic digestion of high strength molasses wastewater using hybrid anaerobic baffled reactor. **Water Research**, v.25, n.7, p.785-790, 1991.

- ① - CAMPOS, J.R. **Alternativas para tratamento dos esgotos sanitários.** Americana, Consórcio Intermunicipal das Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari, 1990. (Relatório SE/3/90).

- CARRIERI, C., DI PINTO, A.C., ROZZI, A. Anaerobic co-digestion of sewage sludge and concentrate soluble wastewater. **Water Science and Technology**, v.28, n.2, p.187-197, 1993. (Abstract do autor).

- CHIAN, E.S.K., DE WALLE, F.B. Sanitary landfill leachates and their treatment. **Journal of the Environmental Engineering Division**, v.102, n.EE2, p.411-431, apr., 1976.

- DALTRO FILHO, J. **Desempenho de filtros anaeróbios no tratamento de esgotos sanitários: efeito da altura do filtro e de toxicidade por cobre.** São Carlos: USP/EESC, 1988. 2v. Tese (Doutor. Hidráulica e Saneamento), Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1988.

- DAMIANOVIC, M.H.R.Z. **Estudo do efeito de nutrição no desempenho de reatores de manta de lodo em escala de bancada alimentados com efluente do processamento de milho.** São Carlos: USP/EESC, 1992. 127p. + apêndices. Dissertação (mestrado), EESC - USP.

- DEL NERY, V. **Digestão anaeróbia em duas fases com culturas mistas acidogênicas e metanogênicas imobilizadas separadamente em gel agar.** São Carlos: USP/EESC, 1993. 320P. Tese (Doutor. Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1993

- FILSAN ENGENHARIA E SERVIÇOS S/A **Aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos - Fazenda Guaporé.** Projeto Executivo: Prefeitura Municipal de São Carlos/SP. Vol.I. Janeiro, 1989.

- FORESTI, E. **O comportamento singular do sistema de lodos ativados quando utilizado no tratamento de águas residuárias de uma indústria de fermento biológico.** São Carlos: USP/EESC, 1982. 121p. Tese (Doutor. Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1982.

- FORESTI, E. Sistema anaeróbio em duas fases: conceito e potencial de uso, apresentado no Seminário Internacional: Development of Anaerobic Reactor, São Carlos, EESC-USP, 9 a 11 de julho, 1990.

- GROBICKI, A. & STUCKEY, D. Performance of the anaerobic baffled reactor under steady-state and shock loading conditions **Biotechnology and Bioengineering**, v.37, p.344-355, 1991.

- GROBICK, A. & STUCKEY, D. Hydrodynamic characteristics of the anaerobic baffled reactor. **Water Research**, v.26, n.3, p.371-378, 1992.

- HENRY, J.G., PRASAD, D., YOUNG, H. Removal of organics from leachates by anaerobic filter. **Water Research**, v.21, n.11, p.1395-1399, 1987.

- HOLMES, P.W. & BLANC, F.C. Anaerobic treatment of leachate with high sodium concentration. **Journal of the Boston Society of Civil Engineers**, v.62, n.3, p.97-114. Oct., 1975.

- IZA, J., KEENAN, P.J., SWITZENBAUM, M.S. Anaerobic treatment of municipal solid waste landfill leachate: Operation of a pilot scale hybrid UASB/AF reactor. **Water Science and Technology**, v.25, n.7, p.255-264. 1992.

- KATSIFARAKIS, K.L. Solar distillation treatment of landfill leachate. A case study in Greece. **Desalination**, v.94, n.2, p.213-221. 1993 (Abstract do Autor).

- KELLY, H.G. Pilot testing for combined treatment of leachate from a domestic waste landfill site. **Journal WPCF**, v.59, n.5, p. 254 - 261, 1987.

- KENNEDY, K.J. & GUIOT, S.R. **Anaerobic upflow bed-filter - Development and Application.** s.n.t.

- LEVENSPIEL, O. **Engenharia das reações químicas.** São Paulo, editora Edgard Blucher, 1994. V.2, cap.9, p.207-259: Escoamento não ideal.

- LIMA, L.M.Q. **Estudo da influência da reciclagem de chorume na aceleração da metanogênese em aterro sanitário.** São Carlos: USP/EESC, 1988. 242p. Tese (Doutor. Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1988.

- LIN, C-Y. Anaerobic digestion of landfill leachate. **Water SA**, v.17, n.4, p.301-306, 1991.

- LIU, B.Y., LI, A.Y., UREK, J.F. Treatability study on biological treatment of landfill leachate and gas condensate. **Saving a Threatened Resource-In Search of Solutions National Conference on Environmental Engineering.** Publ. by ASCE, New York, NY, USA, p.405-410. 1992

- MARIS, P.J., HARRINGTON, D.W., CHISMON, G.L. Leachate treatment with particular reference to aerated lagoons. **Wat. Pollut. Controll.**, 1984, p.521-535.

- MORGAN, W.E. Anaerobic/aerobic treatment of hazardous waste leachate. **Journal of Hazardous Materials**, v.24, p.279. 1990

- PARIS, J.M., LOPES-SANTIN, J., SOLA, C. Biochemical reactor design and development for waste and wastewater treatment. In: WISE, D.L. (ed.) **Bioenvironment systems**. Flórida: CRC Press, 1987, v.3, p.1-20.

- POVINELLI, S.C.S. **Estudo da hidrodinâmica e partida de reator anaeróbio com chicanas tratando esgoto sanitário**. São Carlos: USP/EESC, 1994. 129p. Dissertação (Mestr. Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1994.

- RAUTENBSCK, R., MELLIS, R. Waste water treatment by a combination of biorreactor and nanofiltration. **Desalination**, v.95, n.2, p.171-188. 1994 (Abstract do Autor).

- ROBINSON, H. & MARIS, P.J. The treatment of leachate from domestic waste in landfill sites. **Journal Water Pollution Control Federation**, v.57,n.1, p.30-38, jan., 1985.

- ROBINSON, H. On site treatment of leachate from landfill wastes. **The Institution of Water and Environmental Management**, v.4, n.1, feb., 1990.

- ROBINSON, H. & LUO, M.M.H. Characterization and treatment of leachate from Hong Kong landfill sites. **The Institution of Water and Environmental Management**, v.5, n.3, june, 1991.

- ROBINSON, H. **Composition and attenuation of landfill leachates. "Groundwater Pollution" Conference.** Cafe Royal, 25/26 feb, 1992.
- ROBINSON, H., BARR, M.J., LAST, S.D. **Leachate collection, treatment and disposal. The Institution of Water and Environmental Management, v.6, june, 1992.**
- SCHALCH, V. **Produção e características do chorume em processo de decomposição de lixo urbano.** São Carlos: USP/EESC, 1984. 103p. Dissertação (Mestr. Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1984.
- SCHALCH, V., LEITE, W.C.A., GOMES, L.P. **Curso sobre gerenciamento de resíduos sólidos.** - Goiânia: ABES, 1990. 227p.
- SCHALCH, V. **Análise comparativa do comportamento dos aterros sanitários e correlações dos parâmetros do processo de digestão anaeróbia.** São Carlos: USP/EESC, 1992. 219p. Tese (Doutor. Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1992.
- SENIOR, E. & BALBA, M.T.M. **Landfill biotechnology.** In: WISE, D.L. (ed.) **Bioenvironmental systems.** Flórida: CRC Press, 1987. v.2, p.17-65.
- SHIMODA, S., PRENGLE, H.W.Jr, SYMONS, J.M. **H₂O₂/VIS-UV process for treatment of leachate and contaminated groundwater.** **Waste Management, v.13, n.5-7, 535p. 1993 (Abstract do Autor).**
- SPEECE, R.E. **Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment. Environmental Science and Technology, v.17, n.9, p.416A-427A. 1983.**

- SPENGLER, D.B. & DZOMBAK, D.A. Treatment of landfill leachate with rotating biological contactors: bench-scale experiments. **Research Journal WPCF**, v.63, n.7, p.971-981, 1991.

- SUIDAN, M.T., SCHROEDER, A.T., NATH, R., KRISHNAN, E.R., BRENNER, R.C. Treatment of CERCLA (Comprehensive Environmental Response Compensation and Liability Act) leachate by carbon-assisted anaerobic fluidized beds. **Water Science and Technology**, v.27, n.2, p.273-282. 1993 (Abstract do Autor).

- TEIXEIRA, E.N. **Efeito inibidor da recirculação direta de chorume na decomposição anaeróbia dos resíduos sólidos.** São Carlos: EESC-USP, 1993. 232 p. + anexos. Tese (Doutor. Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1993.

- VILAS BOAS, D. **Estudo da microbiota anaeróbia hidrolítico-fermentativa em aterro sanitário.** São Carlos: EESC-USP, 1990. 157 p. Dissertação (Mestr. Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1990.

- VISVANATHAN, C., MUTTAMARA, S., BABEL, S., AIM, R.B. Treatment of landfill leachate by crossflow microfiltration and ozonization. **Separation Science and Technology**, v.29, n.3, p.315-332, 1994 (Abstract do Autor).

ANEXOS DE TABELAS

TABELA A.1: Valores de pH no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 80 dias

Coletas	Afluente Bruto	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 4
1	5,55	7,52	7,78	8	8,45
2	5,76	8,36	8,32	8,37	8,65
3	5,87	7,79	8,64	8,69	8,85
4	6,04	8,23	8,55	8,79	8,89

TABELA A.2: Valores de Alcalinidade no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 80 dias

Coletas	Afluente Bruto	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 4
1	9.183	7.877	6.469	6.861	5.340
2	9.633	7.504	7.199	6.692	6.590
3	16.731	8.416	6.793	7.706	5.982
4	15.007	7.711	5.415	6.185	3.448

TABELA A.3: Valores de DQO no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 80 dias

Coleta	Afluente Bruto	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 4
1	30.720	1.411	990	890	943
2	21.493	1.713	1.276	1.167	1.000
3	70.141	2.820	1.385	1.125	970
4	58.520	2.360	1.230	1.097	958

TABELA A.4: Valores de Ácidos Voláteis no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 80 dias

Coleta	Afluente Bruto	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 4
1	9.264	720	864	576	576
2	9.552	960	576	336	432
3	16.464	1.584	288	480	336
4	13.344	1.968	912	528	336

TABELA A.5: Valores de Sólidos Totais no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 80 dias

Coletas	Afluente Bruto	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 4
1	40.750	16.630	12.150	3.530	3.540
2	42.667	16.460	7.810	6.840	8.190
3	35.010	13.230	8.220	6.220	6.740
4	45.380	19.380	15.160	14.914	12.970

TABELA A.6: Valores de Sólidos Suspensos Totais no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 80 dias

Coletas	Afluente Bruto	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 4
1	2.450	2.533	2.783	683	367
2	1.783	1.483	1.117	567	433
3	1.183	1.400	767	417	367
4	1.680	1.917	3.340	1.667	817

TABELA A.7: Valores de Sólidos Suspensos Voláteis no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 80 dias

Coletas	Afluente Bruto	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 4
1	983	1.050	1.100	217	133
2	817	650	300	167	150
3	500	500	267	50	133
4	800	1.083	2.180	400	250

TABELA A.8: Valores de pH no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para 0h de 45 dias

Coleta	Afluente Bruto	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 4
1	5,03	7,9	8,8	8,89	9,4
2	5,83	8,07	9,32	9,02	9,39
3	5,59	7,95	8,35	8,46	8,5
4	5,48	8,11	8,36	8,38	8,53

TABELA A.9: Valores de Alcalinidade no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para 0h de 45 dias

Coletas	Afluente Bruto	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 4
1	14.804	14.804	12.979	13.182	11.154
2	18.750	11.475	11.000	11.025	9.000
3	10.418	8.592	9.133	9.877	9.870
4	10.012	8.930	9.471	9.268	9.200

TABELA A.10: Valores de DQO no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para 0h de 45 dias

	Afluente Bruto	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 4
1	58.065	17.719	3.928	2.217	1.796
2	53.032	20.269	6.108	3.793	1.930
3	57.394	9.598	4.732	2.132	3.123
4	69.137	17.182	6.645	4.632	3.121

TABELA A.11: Valores de Ácidos Voláteis no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para 0h de 45 dias

	Afluente Bruto	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 4
1	10.656	8.832	1.056	480	1.056
2	18.432	10.560	6.720	6.528	5.664
3	13.158	5.558	1.639	1.116	499
4	13.300	4.655	1.758	1.330	238

TABELA A.12: Valores de Sólidos Totais no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para 0h de 45 dias

	Afluente Bruto	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 4
1	44.000	25.840	18.720	15.160	14.740
2	40.650	23.288	16.640	14.866	14.263
3	42.210	21.650	16.220	14.385	13.823
4	37.632	19.370	15.850	13.922	13.455

TABELA A.13: Valores de Sólidos Suspensos Totais no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para 0h de 45 dias

Coletas	Afluente Bruto	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 4
1	660	1.700	1.760	1.070	630
2	1.740	1.630	1.212	1.021	820
3	1.830	1.410	1.030	917	806
4	1.310	1.205	1.002	970	607

TABELA A.14: Valores de Sólidos Suspensos Voláteis no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para 0h de 45 dias

Coletas	Afluente Bruto	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 4
1	320	840	980	480	280
2	815	800	790	630	620
3	878	836	819	750	738
4	743	717	840	470	260

TABELA A.15: Valores de pH no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para 0h de 15 dias

Coletas	Afluente Bruto	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 4
1	5,58	7,23	8,25	8,38	8,28
2	5,62	7,6	8,27	8,36	8,44
3	5,56	6,45	7,85	8,18	8,36
4	5,52	6,98	7,91	8,2	8,4

TABELA A.16: Valores de Alcalinidade no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para 0h de 15 dias

Coletas	Afluente Bruto	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 4
1	14.288	11.096	11.780	12.388	12.540
2	15.048	11.476	12.236	12.464	12.464
3	13.376	12.844	10.488	10.944	11.400
4	14.896	12.920	10.716	11.172	11.628

TABELA A.17: Valores de DQO no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para 0h de 15 dias

Coletas	Afluente Bruto	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 4
1	14.288	11.096	11.780	12.388	12.540
2	15.048	11.476	12.236	12.464	12.464
3	13.376	12.844	10.488	10.944	11.400
4	14.896	12.920	10.716	11.172	11.628

TABELA A.18: Valores de Ácidos Voláteis no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para 0h de 15 dias

Coletas	Afluente Bruto	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 4
1	16.657	7.136	1.789	724	518
2	17.338	7.604	1.022	554	518
3	14.569	7.881	5.644	3.422	1.668
4	16.870	7.604	5.410	4.963	1.711

TABELA A.19: Valores de Sólidos Totais no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para 0h de 15 dias

Coletas	Afluente Bruto	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 4
1	40.560	23.550	18.780	14.590	14.107
2	42.500	24.660	18.380	14.910	14.250
3	40.885	30.740	26.210	20.010	16.290
4	44.130	31.170	27.850	19.130	16.320

TABELA A.20: Valores de Sólidos Suspensos Totais no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 15 dias

Coletas	Afluente Bruto	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 4
1	3.250	5.444	2.400	3.095	1.340
2	3.870	3.700	3.675	2.500	890
3	4.510	4.200	6.840	4.075	1.800
4	2.170	3.460	10.080	4.025	1.750

TABELA A.21: Valores de Sólidos Suspensos Voláteis no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 15 dias

	Afluente Bruto	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 4
1	1.460	2.511	831	1.262	570
2	1.770	1.700	1.550	975	230
3	2.080	1.900	4.160	1.850	700
4	1.100	1.580	6.160	2.075	700

TABELA A.22: Valores de pH no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 5 dias

Coleta	Afluente Bruto	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 4
1	5,57	6,45	8,06	8,21	8,22
2	5,45	5,65	6,92	7,01	8,11
3	5,47	5,68	6,08	7,22	7,88

TABELA A.23: Valores de Alcalinidade no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 5 dias

Coletas	Afluente Bruto	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 4
1	9.930	11.420	9.268	9.516	9.764
2	9.930	11.254	9.599	9.268	9.434
3	10.923	12.247	12.909	9.599	9.020

TABELA A.24: Valores de DQO no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 5 dias

	Afluente Bruto	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 4
1	39.008	29.385	17.273	10.351	9.842 - 75%
2	56.223	46.741	28.529	11.144	7.034 87%
3	55.054	52.339	47.159	23.776	12.448 - 77%

TABELA A.25: Valores de Ácidos Voláteis no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 5 dias

Coleta	Afluente Bruto	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 4
1	12.876	12.789	7.250	4.930	4.640
2	13.688	14.500	8.845	3.190	1.943
3	14.848	16.878	16.153	8.410	4.292

TABELA A.26: Valores de Sólidos Totais no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 5 dias

Coletas	Afluente Bruto	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 4
1	28.820	26.140	19.500	16.850	17.380
2	29.630	31.050	22.090	18.310	16.280
3	35.750	36.170	31.830	22.590	19.760

TABELA A.27: Valores de Sólidos Suspensos Totais no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ h de 5 dias

Coletas	Afluente Bruto	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 4
1	1.640	2.600	3.167	9.350	3.700
2	1.460	3.033	2.083	4.300	4.600
3	4.300	3.340	1.800	2.633	2.100

TABELA A.28: Valores de Sólidos Suspensos Voláteis no afluente bruto e nos diferentes pontos de coleta, para θ_h de 5 dias

Coletas	Afluente Bruto	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 4
1	840	1.260	2.000	5.500	1.700
2	690	1.300	833	2.450	2.160
3	2.067	1.560	717	1.300	1.067

TABELA A.29: Desempenho do Reator Anaeróbio Compartimentado na eficiência de remoção da DQO em relação à TCO média aplicada, nos θ_h empregados durante o experimento.

	Dias de Operação	Taxa de Carregamento Orgânico (kg DQO/m ³ dia)	% Remoção DQO
80	240	0,4	97
	250	0,3	95
	260	0,9	99
	270	0,7	98
45	360	1,29	97
	370	1,18	96
	380	1,27	95
	390	1,53	96
15	420	4,5	96
	427	3,37	93
	434	4,01	90
	442	4,48	91
5	460	7,8	75
	465	11,24	88
	470	11,01	77

TABELA A.30: Desempenho do Reator Anaeróbio Compartimentado na eficiência de remoção da DQO em relação à TCO média aplicada, nos θ_h empregados durante o experimento. Valores encontrados na Câmara 1

θ_h	Dias de Operação	Taxa de Carregamento Orgânico (kg DQO/m ³ dia)	% Remoção DQO
80	240	1,16	95
	250	0,81	92
	260	2,66	96
	270	2,22	96
45	360	3,91	70
	370	3,57	62
	380	3,86	83
	390	4,65	75
15	420	13,63	73
	427	10,21	58
	434	12,16	18
	442	14,68	36
5	460	23,64	25
	465	34,07	17
	470	33,37	5

TABELA A.31: Desempenho do Reator Anaeróbio Compartimentado na eficiência de remoção da DQO em relação à TCO média aplicada, nos θ_h empregados durante o experimento. Valores encontrados na Câmara 2

θ_h	Dias de Operação	Taxa de Carregamento Orgânico (kg DQO/m ³ dia)	% Remoção DQO
80	240	0,08	30
	250	0,1	26
	260	0,16	51
	270	0,13	48
45	360	1,79	78
	370	2,04	70
	380	0,97	51
	390	1,73	61
15	420	5,55	66
	427	6,37	73
	434	14,88	61
	442	14,08	61
5	460	26,71	41
	465	42,49	39
	470	47,58	10

TABELA A.32: Desempenho do Reator Anaeróbio Compartimentado na eficiência de remoção da DQO em relação à TCO média aplicada, nos θ_h empregados durante o experimento. Valores encontrados na Câmara 3

θ_h	Dias de Operação	Taxa de Carregamento Orgânico (kg DQO/m ³ dia)	% Remoção DQO
80	240	0,06	10
	250	0,07	8
	260	0,08	19
	270	0,07	11
45	360	0,4	44
	370	0,62	38
	380	0,48	55
	390	0,67	30
15	420	1,87	48
	427	1,72	24
	434	5,86	47
	442	5,53	54
5	460	15,7	40
	465	25,94	61
	470	42,87	50

TABELA A.33: Desempenho do Reator Anaeróbio Compartimentado na eficiência de remoção da DQO em relação à TCO média aplicada, nos θ_h empregados durante o experimento. Valores encontrados na Câmara 4

	Dias de Operação	Taxa de Carregamento Orgânico (kg DQO/m ³ dia)	% Remoção DQO
80	240	0,05	
	250	0,07	14
	260	0,06	14
	270	0,06	13
45	360	0,22	19
	370	0,38	49
	380	0,22	0
	390	0,48	33
15	420	0,97	19
	427	1,31	21
	434	3,12	39
	442	2,56	24
5	460	9,41	5
	465	10,13	37
	470	21,61	48