

***VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA DIGESTÃO
ANAERÓBIA DO LODO DE EXCESSO DA CETREL***

JOSÉ BELDSON ELIAS RAMOS

**VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA
DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DO LODO DE EXCESSO DA CETREL**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre (M.Eng.).

Área de Concentração: RECURSOS HÍDRICOS

Sub-Área: ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Orientadores: Prof. ADRIANUS C. VAN HAANDEL

Prof.^a PAULA FRASSINETTI C. CATUNDA

Campina Grande-PB

Maior/1996



R175v Ramos, Jose Beldson Elias
Viabilidade tecnica e economica da digestao anaerobia do lodo de excesso da Cetrel / Jose Beldson Elias Ramos. - Campina Grande, 1996.
149f . : il.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e Tecnologia.

1. Lodo Ativado 2. Digestao Anaerobia 3. Recursos Hidricos 4. Engenharia Sanitaria e Ambiental 5. Dissertacao I. Haandel, Adrianus C. Van, Ph.D. II. Catunda, Paula Frassinete C. , M.Sc. III. Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB). IV. Título

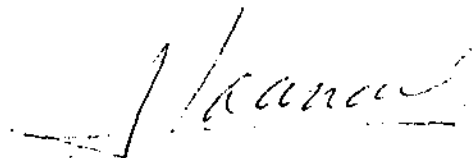
CDU 628.355(043)

**VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA
DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DO LODO DE EXCESSO DA CETREL**

JOSÉ BELDSON ELIAS RAMOS

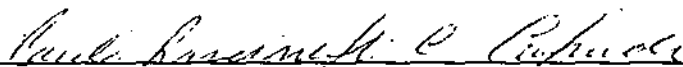
DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 10/06/96

COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. ADRIANUS C. VAN HAANDEL - Ph.D.

Orientador



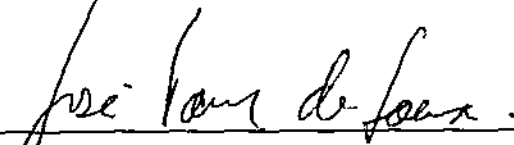
Prof.ª PAULA FRASSINETTI C. CATUNDA - M.Sc.

Co-orientador



Prof. RUI DE OLIVEIRA - Ph.D.

Examinador Interno



Prof. JOSÉ TAVARES DE SOUSA - Ph.D.

Examinador Externo

Campina Grande-PB

Mai/1006

A violenta destruição dos nossos recursos naturais tem levado a humanidade à condições deploráveis de vida. Cabe a cada um de nós exercer um papel de transformação, preservando e assegurando os recursos ainda existentes, para garantir a suprema sobrevivência dos ecossistemas e da espécie humana.

Beldson Elias

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA

AGRADECIMENTOS

LISTA DE QUADROS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

RESUMO

ABSTRACT

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO.....	1
--------------------	---

CAPÍTULO 2

2. CETREL.....	4
----------------	---

CAPÍTULO 3

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
3.1 - Introdução.....	10
3.2 - Histórico.....	11
3.3 - Mecanismo do Processo de Digestão.....	12
3.4 - Aspectos Microbiológicos do Metabolismo Bacteriano.....	16
3.5 - Cinética da Digestão.....	19
3.6 - Fatores que Influenciam a Eficiência da Digestão.....	20
3.6.1 - Temperatura.....	21
3.6.2 - Nutrientes.....	22
3.6.3 - Substâncias Tóxicas.....	23
3.6.4 - Mistura do Lodo.....	27
3.6.5 - Composição do Lodo.....	28

3.7 - Classificação dos Digestores.....	30
3.8 - Aspectos de Dimensionamento.....	33
3.9 - Características do Biogás.....	37
3.10 - Partida do Digestor e Controle Operacional.....	38
3.10.1 - Partida do Digestor.....	38
3.10.2 - Controle Operacional.....	40
3.11 - Estabilização do Lodo.....	43

CAPÍTULO 4

4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
4.1 - Digestor Anaeróbio em Escala Piloto.....	47
4.1.1 - Descrição e Funcionamento do Digestor.....	47
4.1.2 - Alimentação do Digestor.....	50
4.1.3 - Recirculação do Lodo (mistura) no Digestor.....	51
4.1.4 - Partida do Digestor.....	52
4.1.5 - Operação do Sistema Experimental.....	54
4.1.6 - Análises.....	56
4.2 - Testes de Bancadas.....	59
4.2.1 - Produção de Biogás.....	59
4.2.2 - Propriedades Mecânicas do Lodo.....	61
4.2.2.1 - Percolação (LAE e LDG): Sistema Experimental e Procedimento.....	61
4.2.2.2 - Evaporação e Secagem (LAE e LDG): Sistema Experimental e Procedimento.....	63
4.2.2.3 - Percolação, Evaporação e Secagem (LDD).....	66

CAPÍTULO 5

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	68
5.1 - Digestor Anaeróbio em Escala Piloto da CETREL.....	68
5.1.1 - Estabilidade do pH.....	68
5.1.2 - Demanda Química de Oxigênio (DQO).....	71
5.1.3 - Eficiência da Digestão.....	72
5.1.4 - Nutrientes.....	73
5.2 - Teste de Bancada: Avaliação do Processo de Digestão do Lodo.....	86
5.2.1 - Estabilidade do pH.....	86
5.2.2 - Eficiência da Digestão.....	87
5.2.3 - Produção de Biogás.....	88
5.3 - Teste de Bancada: Percolação, Evaporação e Secagem do Lodo.....	98

5.3.1 - Percolação.....	98
5.3.2 - Evaporação e Secagem.....	99

CAPÍTULO 6

6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	121
6.1 - Considerações Gerais.....	123
6.2 - Viabilidade Técnica da Digestão.....	123
6.2.1 - Estabilidade do pH no Digestor Piloto.....	123
6.2.2 - Eficiência da Digestão do Lodo no Digestor Piloto.....	124
6.2.3 - Estimativa da Produção de Biogás no Digestor Piloto.....	127
6.2.4 - Teste de Bancada.....	128
6.2.4.1 - Eficiência da Digestão.....	128
6.2.4.2 - Produção de Biogás.....	129
6.2.4.3 - Dimensionamento e Otimização do Leito de Secagem.....	131
6.3 - Viabilidade Econômica da Digestão Anaeróbia.....	135
6.3.1 - Estimativa dos Custos de Implantação do Sistema em Escala Real.....	135
6.3.2 - Benefício (Economia) Resultante da Aplicação da Digestão Anaeróbia para Estabilização do Lodo de Excesso da CETREL.....	137

CAPÍTULO 7

7. CONCLUSÃO.....	140
-------------------	-----

CAPÍTULO 8

8. RECOMENDAÇÕES.....	142
-----------------------	-----

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	144
------------------------------------	-----

APÊNDICE

LISTA DE QUADROS

QUADRO 2.1 - Produção Industrial / Geração de resíduos no complexo petroquímico de Camaçari.....	5
QUADRO 3.1 - Aumento da produtividade agrícola com o uso do biofertilizante.....	45
QUADRO 6.1 - Valores médios mensais relacionados à estabilidade do pH na unidade piloto.....	123
QUADRO 6.2 - Valores médios mensais relacionados a eficiência de digestão na unidade piloto.....	125
QUADRO 6.3 - Regime de alimentação dos digestores utilizando como substrato lodo de excesso (CETREL), sendo a frequência de alimentação 1 vez de 2 em 2 dias.....	130
QUADRO 6.4 - Concentração dos sólidos em suspensão no lodo a ser digerido nos afluentes e nos efluentes dos 6 digestores (D_1 a D_6).....	130
QUADRO 6.5 - Produção média de metano por alimentação e produção por unidade de massa de sólidos voláteis aplicados e removidos nos digestores D_1 a D_6 , e a produção teórica de metano.....	131

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1	- Unidades básicas do sistema de tratamento da CETREL e suas respectivas capacidades.....	9
FIGURA 3.1	- Representação do processo microbiológico atuante na digestão anaeróbia.....	15
FIGURA 3.2	- Estrutura celular típica da <i>Archaeobacteria</i>	17
FIGURA 3.3	- Metabolismo bacteriano.....	18
FIGURA 3.4	- Representação esquemática da composição do lodo e da taxa máxima de utilização para três tipos de substrato.....	20
FIGURA 3.5	- Produção específica de gás em função da temperatura.....	21
FIGURA 3.6	- Relação entre amônia liberada e a concentração de lodo volátil digerido nos digestores anaeróbios.....	29
FIGURA 3.7	- Relação entre o aumento de alcalinidade e a concentração de lodo volátil digerido nos digestores.....	29
FIGURA 3.8	- Digestor anaeróbio de baixa-taxa.....	31
FIGURA 3.9	- Digestor anaeróbio de alta-taxa.....	32
FIGURA 3.10	- Digestor anaeróbio de alta-taxa, duas fases.....	33
FIGURA 3.11	- Destruição de sólidos voláteis como função da temperatura e TRS.....	34
FIGURA 3.12a	- Relação dos ácidos voláteis com a alcalinidade.....	41
FIGURA 3.12b	- Ácidos voláteis / alcalinidade, AV/AT.....	41
FIGURA 3.12c	- Produção de metano (CH ₄) e dióxido de carbono (CO ₂).....	42
FIGURA 3.12d	- Estabilidade do pH.....	42
FIGURA 3.13	- Tratamento de lodo.....	44
FIGURA 4.1	- Representação esquemática da planta piloto para digestão do lodo de excesso da CETREL.....	58
FIGURA 4.2	- Representação do conjunto utilizado no teste de bancada para medição de gás (Digestor + Gasômetro).....	59

FIGURA 4.3	- Representação esquemática do dispositivo usado no teste de percolação da água do lodo.....	62
FIGURA 4.4	- Representação dos tubos cilíndricos utilizados no teste de evaporação e secagem do lodo.....	65
FIGURA 5.1a	- Resultados do pH durante a operação da planta piloto com o aumento progressivo da vazão afluente.....	83
FIGURA 5.1b	- Resultados da alcalinidade durante a operação da planta piloto com o aumento progressivo da vazão afluente.....	84
FIGURA 5.1c	- Resultados dos ácidos voláteis durante a operação da planta piloto com o aumento progressivo da vazão afluente.....	85
FIGURA 5.2a	- Relação entre o pH e AV/AT para o Digestor-1 (D ₁ , T _p = 10d).....	96
FIGURA 5.2b	- Relação entre o pH e AV/AT para o Digestor-2 (D ₂ , T _p = 13,3d).....	96
FIGURA 5.2c	- Relação entre o pH e AV/AT para o Digestor-3 (D ₃ , T _p = 16d).....	96
FIGURA 5.3	- Remoção de sólidos suspensos observados por O'ROURKE (1968) em função do tempo de permanência para diferentes temperaturas e valores experimentais observados na presente investigação.....	97
FIGURA 5.4a	- Umidade do lodo em função do tempo de evaporação para diferentes cargas de lodo digerido aerobicamente.....	111
FIGURA 5.4b	- Umidade do lodo em função do tempo de evaporação para diferentes cargas de lodo digerido anaerobicamente (lodo do digestor em escala piloto).....	112
FIGURA 5.4c	- Umidade do lodo em função do tempo de evaporação para diferentes cargas de lodo digerido anaerobicamente (lodo do decantador).....	113
FIGURA 5.5a	- Tempo de evaporação em função da carga de sólidos para diferentes valores da umidade final (70 a 10%). Os tempos para percolação, alimentação e retirada do lodo também estão indicados.....	114
FIGURA 5.5b	- Tempo de evaporação em função da carga de sólidos para diferentes valores da umidade final (80 a 10%). Os tempos para percolação, alimentação e retirada do lodo também estão indicados.....	115

FIGURA 5.5c - Tempo de evaporação em função da carga de sólidos para diferentes valores da umidade final (70 a 10%). Os tempos para percolação, alimentação e retirada do lodo também estão indicados.....	116
FIGURA 5.6a - Produtividade em função da carga de sólidos para diferentes valores da umidade final (10 a 70%).....	117
FIGURA 5.6b - Produtividade em função da carga de sólidos para diferentes valores da umidade final (10 a 80%).....	118
FIGURA 5.6c - Produtividade em função da carga de sólidos para diferentes valores da umidade final (10 a 70%).....	119
FIGURA 5.7 - Estimativa de área do leito para se processar uma unidade de massa de sólidos secos por dia em função da umidade do lodo.....	120

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1	- Valores das constantes cinéticas de culturas anaeróbias.....	19
TABELA 3.2	- Concentração total de metal solúvel necessário para provocar severa inibição na flora bacteriana.....	25
TABELA 3.3	- Poluentes tóxicos inibitórios para digestão anaeróbia do lodo.....	26
TABELA 3.4	- Destruição de sólidos voláteis.....	37
TABELA 3.5	- Produção de gás de alguns compostos presentes no lodo de águas residuárias.....	38
TABELA 4.1	- Parâmetros de projeto e características das instalações do digestor anaeróbio em escala piloto da CETREL.....	48
TABELA 4.2	- Sequência operacional no sistema anaeróbio em escala piloto da CETREL.....	49
TABELA 4.3	- Características operacionais do experimento.....	51
TABELA 4.4	- Características médias do lodo afluente do sistema de digestão anaeróbia em escala piloto da CETREL.....	53
TABELA 4.5	- Análises físico-químicas, frequências e métodos.....	57
TABELA 4.6	- Padrão de alimentação e rotina operacional dos digestores utilizados no teste de bancada.....	60
TABELA 4.7	- Caracterização dos tubos cilíndricos usados no teste de evaporação dos lodos digeridos via mecanismo aeróbio e anaeróbio.....	64
TABELA 4.8	- Caracterização do lodo percolado antes da secagem ao ar livre (LAE e LDG).....	66
TABELA 4.9	- Caracterização do lodo percolado antes da secagem ao ar livre(LDD).....	67
TABELA 5.1	- Valores do pH, da alcalinidade total, da concentração de ácidos voláteis e da alcalinidade de bicarbonato no lodo digerido do digestor piloto da CETREL.....	74

TABELA 5.2	- Valores da DQO (fase líquida) no lodo a ser digerido no afluente e no efluente do digestor.....	78
TABELA 5.3	- Concentração dos sólidos em suspensão no lodo a ser digerido (afl.) e no efluente (efl.) do digestor piloto, bem como a percentagem de remoção dos sólidos.....	79
TABELA 5.4	- Valores dos nutrientes presentes no afluente e no sobrenadante do digestor piloto.....	81
TABELA 5.5a	- Valores do pH, alcalinidade total e de bicarbonato, e concentração de ácidos voláteis no lodo digerido do digestor-1 com $T_p = 10d$	89
TABELA 5.5b	- Valores do pH, alcalinidade total e de bicarbonato, e concentração de ácidos voláteis no lodo digerido do digestor-2 com $T_p = 13,3d$	90
TABELA 5.5c	- Valores do pH, alcalinidade total e de bicarbonato, e concentração de ácidos voláteis no lodo digerido do digestor-3 com $T_p = 16d$	91
TABELA 5.5d	- Valores médios do pH, da alcalinidade total, da concentração de ácidos voláteis e da alcalinidade de bicarbonato nos efluentes dos digestores D_1 , D_2 e D_3	92
TABELA 5.6a	- Concentração dos sólidos em suspensão no lodo a ser digerido no afluente (afl.) e no efluente (efl.) do digestor-1 bem como a percentagem de remoção dos sólidos ($T_p = 10d$).....	92
TABELA 5.6b	- Concentração dos sólidos em suspensão no lodo a ser digerido no afluente (afl.) e no efluente (efl.) do digestor-2 bem como a percentagem de remoção dos sólidos ($T_p = 13,3d$).....	93
TABELA 5.6c	- Concentração dos sólidos em suspensão no lodo a ser digerido no afluente (afl.) e no efluente (efl.) do digestor-3 bem como a percentagem de remoção dos sólidos ($T_p = 16d$).....	94
TABELA 5.7	- Concentração média dos sólidos em suspensão no lodo a ser digerido nos afluentes e nos efluentes dos digestores D_1 , D_2 e D_3 (conc. g/L), bem como a percentagem de remoção de sólidos suspensos.....	94
TABELA 5.8	- Produção de biogás nos digestores D_1 , D_2 e D_3	95
TABELA 5.9	- Produção média de biogás por alimentação dos digestores D_1 , D_2 e D_3	95

TABELA 5.10	- Tempo de percolação em função da carga aplicada no teste.....	99
TABELA 5.11	- Peso das amostras de lodo digerido aerobicamente em função do tempo de evaporação da água do lodo.....	103
TABELA 5.12	- Peso das amostras de lodo digerido anaerobicamente em função do tempo de evaporação da água do lodo.....	104
TABELA 5.13	- Peso das amostras de lodo anaeróbio decantado em função do tempo de evaporação da água do lodo.....	105
TABELA 5.14	- Umidade do lodo aeróbio em função do tempo de evaporação.....	106
TABELA 5.15	- Umidade do lodo anaeróbio (digestor) em função do tempo de evaporação.....	107
TABELA 5.16	- Umidade do lodo anaeróbio (decantador) em função do tempo de evaporação.....	108
TABELA 5.17	- % Remoção da água do lodo aeróbio e anaeróbio respectivamente através da secagem ao ar livre (evaporação), utilizando tubos cilíndricos com área de 19,6 cm ²	109
TABELA 5.18	- % Remoção da água do lodo anaeróbio decantado através da secagem ao ar livre (evaporação), utilizando tubos cilíndricos com área de 19,6cm ²	110

*Dedicado aos meus pais,
Expedito e Dulcinete.
E ao meu irmão,
Denilson.*

AGRADECIMENTOS

•A DEUS, por ter me dado forças para chegar a esse momento de felicidade e êxito.

•A minha esposa Maria Solange Rodrigues Elias.

•Aos professores Adrianus C. Van Haandel e Paula Frassinetti C. Catunda.

•A CETREL - Empresa de Proteção Ambiental, através da GETRAD (Gerência de Tratamento e Disposição dos Efluentes), COLAB (Coordenação do Laboratório), COTEL (Coordenação de Tratamento de Efluente Líquido) e GOMECC (Gerência e Monitoramento da CETREL).

•A todos que trabalharam na CETREL no ano de 1995 e aos seguintes órgãos conveniados:

- ♦ Universidade Federal da Paraíba (UFPB).
- ♦ Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

•A FONTES & HAANDEL - Engenharia Ambiental, na pessoa dos Drs. Francisco F. Lima (Diretor), Adrianus C. Van Haandel (Diretor) e Lindalberto Rodrigues Coura (Eng^o Ambiental).

•A todos que colaboraram direta ou indiretamente com o meu trabalho.

•E, especialmente, à minha família e amigos pelo apoio e por sempre acreditarem em mim.

RESUMO

A CETREL - Companhia de Proteção Ambiental é responsável pelo tratamento dos efluentes líquidos orgânicos e inorgânicos provenientes do complexo petroquímico de Camaçari-Bahia. A parte orgânica é tratada na Estação Central de Tratamento, através de sistemas de lodos ativados, resultando na geração de 30t/d de lodo de excesso. Atualmente se emprega a digestão aeróbia para a estabilização desse lodo antes de sua disposição final nas fazendas de lodo. Embora tenha comprovada eficiência, o mecanismo aeróbio associado às fazendas de lodo, tornam-se inconvenientes porque oneram os custos da Empresa, devido ao consumo de energia para a aeração do lodo. Na tentativa de minimizar os custos operacionais da CETREL, foi realizada uma investigação experimental, visando estabelecer a viabilidade técnica e econômica da estabilização do lodo de excesso, através da digestão anaeróbia. A investigação foi realizada numa unidade piloto e em digestores de bancada. Com base nos dados experimentais foi verificado que a aplicação da digestão anaeróbia é tecnicamente viável para a estabilização do lodo da CETREL. Dessa forma, o digestor aeróbio da CETREL pode ser transformado num digestor anaeróbio e operado a uma temperatura ambiente entre 25 a 35°C com um tempo mínimo de permanência (detenção) de 10 dias. A eficiência de remoção de sólidos suspensos voláteis variou de 30 a 40 por cento para um tempo de permanência de 10 e 16 dias, respectivamente. O tempo de permanência de 16 dias se mostrou ser o tempo ótimo para um bom desempenho do digestor. A produção de metano foi estimada em 82m³ para um tempo de permanência de 10 dias e em 134m³ para um tempo de permanência de 16 dias, por tonelada de lodo volátil aplicado. Os resultados demonstraram que existe um potencial de geração de 3,8t/d de metano (Tp = 16d), suficiente para gerar 800kW de energia elétrica, enquanto se gasta hoje cerca de 800kW no reator aeróbio principal existente. A energia total economizada no sistema atual somada a

geração de energia interna através do processo anaeróbio representa uma economia total de 1.600kW, no qual custa atualmente R\$0,07/kWh, resultando numa economia de aproximadamente R\$1.200.000,00 por ano. O custo do investimento foi estimado em R\$2.000.000,00 para conversão do digestor aeróbio numa unidade anaeróbia. Sob o ponto de vista econômico esse investimento é muito atrativo, uma vez que o tempo de retorno seria de menos de 2 (dois) anos. Verificou-se também que o lodo estabilizado anaerobiamente, depois de um período de decantação, pode ser secado mais facilmente em leitos de secagem do que o lodo aeróbio.

ABSTRACT

CETREL - a Company of Environmental Protection is responsible for the treatment of the organic and inorganic liquid effluents discharged from the petrochemical complex at Camaçari-Bahia. The organic part is treated at the Central Treatment Plant by means of an activated sludge, process which results in the generation of 30 t/d of excess sludge. Presently aerobic digestion is applied for sludge stabilisation, before its final destination at land farms. Although the aerobic mechanism associated to the land farms has proved its efficiency, it has become unsuitable because of the high energy costs. In an attempt to reduce operational costs, an experimental investigation was carried out with the objective to establish the technical and economical feasibility of excess sludge stabilisation by anaerobic digestion. Pilot and bench scale units were used in the investigation. On the basis of experimental data, it was verified that the application of anaerobic digestion is technically feasible for CETREL sludge. The existing main aerobic digester can be converted into an anaerobic unit and operated at environmental temperature (25 to 35°C) with a minimum retention time of 10 days. The removal efficiency of suspended solids varied from 30 to 40 per cent for retention times of 10 to 16 days. The latter retention time was identified as the optimal one. The methane production was estimated at 82m³ (10 d) to 134m³ (16 d) per ton of applied volatile sludge. The results show that there is a generation potential of 3,8 t/d of methane from which a electric power of 800kW can be produced. At the same time the power required in the aerobic reactor (800kW) is strongly reduced. The total energy savings of reducing the consumption and having internal power generation represent a total of 1600kW which at current cost of 0,07 US\$/kWh result in an economy of approximately US\$1.200.000 per annum. The required investment is estimated at US\$2.000.000 so that the conversion of aerobic to anaerobic digestion is very attractive from the economical point of view having a pay-back time of less than 2 years. It was also established that anaerobic sludge, after a period of settling, can be processed more easily on drying beds than aerobic sludge.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

A Estação de Tratamento da CETREL foi planejada e projetada para receber os rejeitos industriais líquidos e sólidos do Pólo Petroquímico de Camaçari-Bahia. Para a execução dessa tarefa, esses rejeitos são coletados, transportados, tratados e dispostos segundo suas características, de acordo com as mais exigentes normas internacionais de proteção ambiental.

Na Estação Central de Tratamento (ECT), onde são tratados os efluentes líquidos orgânicos, há uma produção diária de grande quantidade de lodo, constituído especialmente de bactérias e outros materiais biodegradáveis. Na CETREL esse lodo é incorporado ao solo, nas chamadas fazendas de lodo (FAZ's). Devido ao seu alto teor de material biodegradável esse lodo entra em decomposição liberando odores putrescíveis. Por essa razão, torna-se necessário implementar um sistema de tratamento de lodo antes da sua disposição final nas fazendas, a fim de estabilizá-lo.

Na época da construção da ECT cogitava-se inicialmente que o mecanismo aeróbio era o processo ideal para estabilização preliminar do lodo de excesso da CETREL. Isso porque já se sabia que os efluentes industriais continham substâncias tóxicas para as bactérias metanogênicas, consideradas como os organismos "chave" do mecanismo anaeróbio. Como naquela ocasião não havia resultados concretos de estudos sobre a viabilidade da digestão anaeróbia aplicada especificamente ao lodo de excesso da CETREL e, temendo-se que esse processo pudesse levar a problemas operacionais futuros, optou-se pela digestão aeróbia pela sua comprovada eficiência.

A ECT da CETREL produz diariamente 30 ton. de lodo de excesso, com uma concentração de sólidos de aproximadamente 30 a 40g/L. Atualmente a estabilização desse lodo ainda se dá por via aeróbia, utilizando-se uma potência de 800kW para aeração de um digestor com volume útil de 10.000m³. Embora a digestão aeróbia seja um mecanismo eficiente para se fazer a estabilização do lodo, os custos operacionais são bastante elevados, haja visto o grande consumo de energia introduzida no sistema pelo processo de aeração.

Com o avanço da biotecnologia, principalmente nas duas últimas décadas, a digestão anaeróbia tornou-se mais atrativa. A compreensão da cinética de degradação da matéria orgânica associada à microbiologia, bioquímica e fatores ambientais e nutricionais influentes no processo anaeróbio, possibilitaram um amplo desenvolvimento do mecanismo anaeróbio, o que passou a ser bastante difundido no tratamento de grande variedade de águas residuárias.

Com o intuito de reduzir os custos operacionais, a CETREL iniciou uma pesquisa experimental sobre a viabilidade técnica e econômica da digestão anaeróbia do lodo de excesso adensado produzido na estação de tratamento. Para tal, a CETREL construiu um digestor anaeróbio seguido de um decantador. Durante o período de 12/12/94 a 26/10/95 foi acompanhado o desempenho do digestor piloto com relação à eficiência de remoção de sólidos voláteis, influência da mistura no conteúdo do digestor, estabilidade do pH, nutrientes e produção de gás. Paralelamente a essa investigação foi feito um estudo comparativo sobre a secagem do lodo estabilizado por via anaeróbia e aeróbia, visando obter uma otimização dos leitos de secagem.

A presente investigação vem demonstrar a viabilidade técnica e econômica da aplicação do tratamento anaeróbio no lodo de excesso da CETREL, estabelecendo as condições operacionais mais convenientes para se ter não somente uma estabilização do lodo, mas, também, uma grande produção de metano (CH₄) que pode ser usado na geração de energia elétrica, reduzindo futuramente os custos operacionais da ECT.

Esta dissertação está organizada em capítulos. Além desta INTRODUÇÃO (1), serão apresentados mais 7 (sete) capítulos. O Capítulo 2 descreve de forma sucinta o sistema de tratamento implantado na CETREL e suas respectivas unidades. O Capítulo 3 apresenta a REVISÃO DE LITERATURA, contendo os antecedentes da digestão anaeróbia para melhor compreensão do assunto. A descrição dos materiais utilizados e a metodologia adotada na presente investigação estão agrupadas no Capítulo 4, denominado de MATERIAIS E MÉTODOS. O Capítulo 5 apresenta uma minuciosa avaliação dos RESULTADOS EXPERIMENTAIS obtidos durante o experimento. Em seguida, no Capítulo 6, é apresentada a DISCUSSÃO sobre o comportamento e desempenho do sistema em estudo, perante as questões levantadas. As CONCLUSÕES e RECOMENDAÇÕES encontram-se nos Capítulos 7 e 8, respectivamente. E por fim, as REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS, encerrando o trabalho.

CAPÍTULO 2

2. CETREL

Localizada próximo ao Pólo Petroquímico de Camaçari-Bahia, a CETREL começou a operar juntamente com o Pólo, no final de 1978, com a incumbência de desenvolver cinco linhas de atividades básicas: (1) - coleta, tratamento e disposição final dos efluentes líquidos; (2) - tratamento e disposição final de resíduos sólidos perigosos; (3) - incineração de resíduos líquidos perigosos; (4) - monitoramento ambiental, pesquisa e controle ambiental; e (5) - desenvolvimento de serviços de proteção ambiental para empresas de todo o país.

Dentre os mais variados sistemas de tratamento da CETREL, destaca-se a Estação Central de Tratamento (ECT) responsável pelo tratamento de efluentes líquidos e de natureza orgânica do Pólo. Esses efluentes, resultantes de processos industriais petroquímicos gerados pelas indústrias de plásticos, lubrificantes, tintas, solventes, resinas, fibras, fertilizantes e outros, constituem as águas residuárias industriais, compostas de uma variedade de 32 (trinta e dois) elementos químicos prioritários já identificados, que devem atender a certos limites pré-estabelecidos pela CETREL, objetivando uma maior eficiência do tratamento e proteção das instalações e acessórios do sistema operacional. Tais substâncias, em concentrações acima desses limites, podem acarretar ondas de choque para os microrganismos do sistema de Lodos Ativados. (CETREL, 1978; QUÍMICA INDUSTRIAL e NOVA QUÍMICA, 1995).

O complexo petroquímico de Camaçari-Bahia conta com mais de cinquenta indústrias que atuam nos ramos da química, metalurgia, montagens industriais, cervejaria,

etc. (REV. ENG. SANITÁRIA, 1988). Este complexo é um dos principais produtores petroquímicos do Brasil, sendo responsável pela produção de 2,5% de etileno, 2,2% de benzeno, e 2,8% de propileno do mercado mundial. Em média há uma produção de $100.000\text{m}^3.\text{d}^{-1}$ de efluentes líquidos inorgânicos provenientes das torres de resfriamento, e $70.000\text{m}^3.\text{d}^{-1}$ de efluentes orgânicos oriundos dos processos petroquímicos, totalizando uma vazão média afluyente na ECT de aproximadamente $170.000\text{m}^3.\text{d}^{-1}$. Estima-se que são produzidos no Pólo 10.000ton/ano de efluentes organoclorados e 70.000ton/ano de resíduos sólidos perigosos, conforme mostra o Quadro 2.1.

QUADRO 2.1 - Produção Industrial / Geração de resíduos no complexo petroquímico de Camaçari.

TIPO DE INDÚSTRIA	PRODUÇÃO INDUSTRIAL (1000ton/ano)	PRODUÇÃO DE DEJETOS				EFLUENTES DE HIDROCARBONETOS CLORADOS (ton/ano)
		EFLUENTES LÍQUIDOS ORGÂNICOS		RESÍDUOS SÓLIDOS PERIGOSOS		
		VAZÃO, $\text{m}^3.\text{d}^{-1}$	DBO ₅ , $\text{kg}.\text{d}^{-1}$	ORGÂNICOS	INORGÂNICOS	
• Petroquímicos e Química Básica	2.958	26.700	13.730	3.700	---	---
• Petroquímicos e Química Intermediária	602	9.440	34.700	1.700	---	6.000
• Polímeros	807	11.100	5.040	---	---	---
• Química Fina	246	10.550	6.700	4.600	---	4.000
• Cervejaria	240	8.800	5.800	---	---	---
• Metalurgia do Cobre	180	3.410	1.030	---	60.000	---
TOTAL		70.000	67.000	10.000	60.000	10.000

FONTE: LIMA & PEREIRA, 1995.

O processo adotado na depuração dos efluentes industriais que chegam à ECT, consiste na manutenção de uma colônia de microrganismos, formado de bactérias, fungos e protozoários, que segregando uma substância gelatinosa, formam os flocos biológicos nos tanques de aeração (TA's) capazes de assimilar partículas do material poluente. Esse sistema, denominado de LODOS ATIVADOS, tem demonstrado excelentes resultados no tratamento de águas residuárias industriais, com remoção de até 98% de DBO e 88% de DQO. (LIMA & PEREIRA, 1995).

O Sistema de Tratamento da CETREL para Efluentes Líquidos Orgânicos compreende dois segmentos conjugados. O primeiro composto de uma malha de coletores interceptores e emissários de cerca de 30km de extensão, e três estações elevatórias, através das quais são recolhidos e transportados os efluentes industriais; o segundo, uma Estação Central de Tratamento (ECT), para onde os efluentes são transportados. A capacidade instalada é de aproximadamente 120 toneladas diárias de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio), 360 toneladas diárias de DQO (Demanda Química de Oxigênio) e 55 toneladas diárias de sólidos em suspensão. A ECT, mais comumente chamada de ETE - Estação de Tratamento de Efluentes, trata um volume de efluentes orgânicos equivalente a uma rede de esgotos de uma cidade de três milhões de habitantes.

Após o tratamento na ETE, o efluente final é encaminhado para o oceano através do emissário terrestre, com 11km de extensão, e pelo emissário submarino, que avança 5 km no mar. O sistema de dispersão existente nos últimos 500m da tubulação do emissário submarino, permite uma diluição dos efluentes no oceano, numa proporção de 1:150. A qualidade do efluente a ser lançado no oceano deverá atender aos limites estabelecidos pela resolução CEPRAM (Conselho Estadual de Proteção ao Meio Ambiente), número 619 de 12 de julho de 1992. Os parâmetros padrões exigidos pelo CEPRAM são os seguintes:

- ♦ $T < 40^{\circ}\text{C}$
- ♦ pH na faixa de 6,5 a 8,5
- ♦ $\text{DQO} < 500\text{mg/L}$
- ♦ $\text{DBO} < 50\text{mg/L}$
- ♦ $\text{SS} < 40\text{mg/L}$.

A Figura 1.1 mostra o fluxograma da ETE da CETREL constituída de várias unidades, destacando-se:

1. BACIA DE EMERGÊNCIA (BAE):

Área destinada à estocagem de efluentes cuja característica seja indesejável (tóxico) ao processo de lodos ativados.

2. UNIDADE DE REMOÇÃO DE VOLÁTEIS (URV):

Unidade inicial de tratamento onde são removidas substâncias voláteis e semi-voláteis dos efluentes por dessorção (70% a 80%), promovida pelo ar borbulhado de 8 (oito) aeradores de 44kW cada. Os compostos voláteis removidos são lançados na atmosfera, através de uma chaminé de 30m de altura, mediante um sistema de exaustão.

3. BACIA DE EQUALIZAÇÃO (BEQ):

O efluente proveniente da URV é equalizado e homogeneizado em um tanque por meio de aeradores de superfície para evitar picos de carga orgânica e de vazão inconvenientes ao processo.

4. TANQUES DE AERAÇÃO (TA's):

Unidades seguintes à BEQ onde a massa líquida encontra uma população de microrganismos (lodo ativado), que consomem a carga orgânica poluidora presente no efluente industrial. Cada tanque tem um tempo médio de detenção hidráulica de 30 horas e uma idade de lodo de 18 (dezoito) dias.

5. DECANTADORES (DEC's):

Unidades de separação das fases líquida e sólida (lodo ativado) sendo, parte desse lodo decantado, recirculado para manter o equilíbrio da colônia de microrganismos nos TA's e o restante descartado como lodo de excesso para os espessadores de lodo.

6. ESPESSADORES (ESP's):

Unidades onde ocorre a desidratação do lodo por gravidade (adensamento do lodo de excesso proveniente dos DEC's), aumentando o teor de sólidos de 1% para 4%.

7. SISTEMA DE TRANSPORTE DE LODO (STL):

O lodo adensado retirado do fundo dos espessadores (ESP's) segue, por gravidade, até a estação elevatória. Quando o lodo de excesso adensado atinge um determinado nível no poço úmido da elevatória, automaticamente é feito o bombeamento deste para caixa de distribuição de vazão (CDV). Desta caixa, o lodo de excesso é distribuído para os digestores aeróbios (DA's).

8. DIGESTORES AERÓBIOS (DA's):

Unidades onde se processa a mineralização do lodo de excesso proveniente dos ESP's, os quais são estabilizados aerobiamente pela oxidação do material biodegradável.

9. FAZENDAS DE LODO (FAZ's):

Após o processo de mineralização nos digestores aeróbios (DA's), o lodo é bombeado para disposição final em fazendas de lodo (FAZ's). Nessa unidade de tratamento o lodo estabilizado biologicamente é incorporado ao solo.

10. SISTEMA DE REUNIÃO DE EFLUENTES (SRE):

Sistema de coleta da parte líquida (sobrenadante) dos DEC's.

11. SISTEMA DE DISPOSIÇÃO OCEÂNICA (SDO):

Adutora que conduz o efluente tratado até um ponto de lançamento na massa oceânica onde serão diluídos.

FLUXOGRAMA

ETE - ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

EQUIVALENTE POPULACIONAL: 3.000.000 HAB.

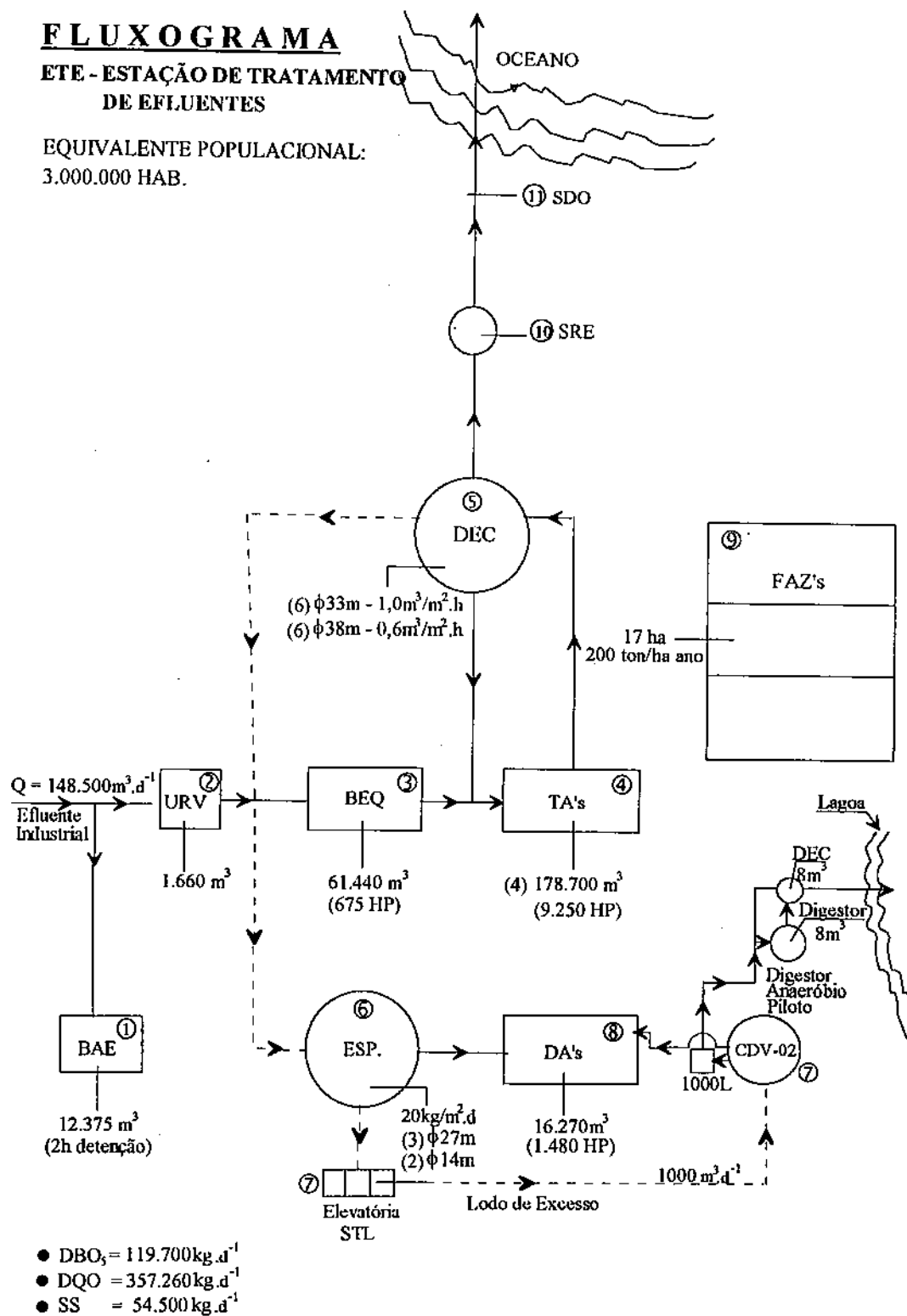


Figura 1.1 - Unidades básicas do sistema de tratamento da CETREL e suas respectivas capacidades.

CAPÍTULO 3

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 - Introdução.

Embora a evolução do processo de digestão tenha ocorrido lentamente, a crise energética nos anos setenta e o avanço da biotecnologia nas últimas décadas despertaram um grande interesse por pesquisas sobre o tratamento anaeróbio, na tentativa de resolver os problemas existentes nos sistemas clássicos de tratamento. Os constantes prejuízos causados ao meio ambiente, principalmente por águas residuárias industriais, também contribuíram de forma efetiva para o avanço de novos processos alternativos de tratamento. Particularmente os sistemas biológicos regidos pelo mecanismo anaeróbio, apresentam-se bastante vantajosos não só pelo aspecto econômico, mas, sobretudo, pela elevada eficiência de remoção da carga orgânica poluidora, a qual é uma fonte em potencial de degradação ambiental (CORBELLINI, 1995).

Atualmente, tem-se constatado que a biotecnologia anaeróbia atingiu um nível desejado de confiança por parte dos pesquisadores, incluindo-se na lista dos processos de tratamento de uma ampla variedade de águas residuárias (CORBELLINI, 1995).

A literatura especializada registra uma diversidade de fatores internos e externos inerentes ao mecanismo da digestão, os quais são responsáveis pelo grau de desempenho dos digestores. A seguir são apresentadas algumas referências sobre o assunto para melhor compreensão do processo de digestão anaeróbia.

3.2 - Histórico.

A revolução industrial (séc. XIX) foi o ponto de partida para o desenvolvimento da tecnologia anaeróbia. O “rush” demográfico nos centros urbanos da Europa apresentava as novas condições sanitárias e delineava o perfil da civilização moderna (GARCEZ, 1976).

Com o surgimento das fábricas e o aumento das atividades humanas em decorrência do novo estilo de vida, registrou-se na época uma elevada produção de águas residuárias industriais e domésticas, *“não sendo mais possível a sua disposição sanitária num curso d’água ou no solo por simples remoção ou lançamento in-natura”* (GARCEZ, 1976; MAGALHÃES, 1982).

VAN HAANDEL & LETTINGA (1994) reportam que os primeiros sistemas comunitários de esgotos surgiram no final do séc. XIX, sendo desenvolvidos inicialmente para a remoção de sólidos sedimentáveis (tratamento primário). Mais tarde tornou-se necessário desenvolver um tratamento secundário para remoção do restante do material orgânico dos esgotos (sólidos não sedimentáveis), na tentativa de evitar a degradação dos corpos d’água receptores de águas servidas. Na segunda metade do séc. XX o tratamento pela via aeróbia predominava e era sinônimo de tratamento secundário. No entanto, a disponibilidade de nutrientes nos efluentes oriundos do tratamento secundário ainda acarretava deterioração dos mananciais, através do fenômeno de eutrofização, ou seja, a descarga excessiva de nutrientes constituía uma fonte de poluição ambiental para os corpos receptores de esgotos. Esse problema levou à descoberta dos chamados sistemas de tratamento terciário.

CORBELLINI (1995) cita em seu trabalho que a primeira aplicação da digestão anaeróbia ocorreu na França em 1881. A fossa séptica idealizada por LOUIS MOURAS, destinava-se ao tratamento de águas residuárias com baixo teor de matéria orgânica. A partir daí os estudos da digestão anaeróbia evoluíram, sendo mais tarde estudada por THUM & REICHEE (1914) especialmente quanto ao desenvolvimento das fases do processo de digestão, que posteriormente foram batizadas de “Digestão Ácida” e “Digestão Metânica” por IMHOFF em 1916.

O tratamento primário associado com a digestão anaeróbia teve grande aplicação na 2ª Guerra Mundial, sendo o biogás produzido no sistema utilizado como combustível automotivo (McCARTY, 1981 apud VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994).

Nos primórdios do séc. XX foram desenvolvidos novos sistemas anaeróbios: tanque Imhoff (na Alemanha), tanque séptico (por CAMERON, Inglaterra), cuja característica peculiar em ambos sistemas era a direção horizontal do fluxo afluente no digestor. Nas décadas seguintes do corrente século, o tratamento aeróbio tomou impulso com a predominância do tratamento biológico em sistemas de lodos ativados (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994).

Com a crise do petróleo (1973) as pesquisas tecnológicas despontaram em busca de novos sistemas alternativos de tratamento. LETTINGA e colaboradores, no fim da década de 1970, desenvolveram os digestores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo, denominados de "Upflow Anaerobic Sludge Blanket" (UASB), para tratamento de águas residuárias concentradas (industriais), sendo também destinados para o tratamento de esgotos domésticos.

Nos últimos quinze anos, com o desenvolvimento da tecnologia, novos e modernos sistemas surgiram, tornando-se possível tratar águas residuárias de alta concentração orgânica, conferindo uma boa qualidade aos efluentes industriais, a um custo relativamente baixo, grande aceitabilidade e simplicidade operacional.

3.3 - Mecanismo do Processo de Digestão.

Quando devidamente projetado e operado, o processo de digestão via mecanismo anaeróbio realiza a oxidação da matéria orgânica dos diversos tipos de efluentes (urbanos, rurais e industriais), objetivando uma ou mais das seguintes finalidades: tratamento dos resíduos (remoção da matéria orgânica poluente e de organismos patogênicos), produção de biogás e produção de biofertilizantes estáveis, ricos em

nutrientes assimiláveis e com melhor qualidade sanitária em relação ao material original (CURDS & HAWKES, 1983).

CORBELLINI (1995), com base nos estudos de BALCH *et al.* (1979) e MAH & SMITH (1981) afirma que:

“...o que se tentou e de certo modo se conseguiu com êxito, foi transferir para o interior de um recipiente (digestor), o desenvolvimento de um ecossistema, composto por culturas de microrganismos capazes de realizar a decomposição da matéria orgânica. Esses ecossistemas ocorrem de forma natural em ambientes desprovidos de oxigênio e com a mínima penetração de luz...”

METCALF & EDDY (1991) apresentam o metabolismo bacteriano como o mecanismo responsável pelo processo de estabilização do lodo através da remoção da matéria orgânica pelos microrganismos anaeróbios. Esse mecanismo é dividido em dois processos interdependentes: catabolismo e anabolismo. Chama-se catabolismo quando a matéria orgânica é utilizada como fonte de energia pelas bactérias, enquanto que no anabolismo o material orgânico se transforma e é incorporado na massa celular.

De acordo com VAN HAANDEL & LETTINGA (1994), o processo de fermentação anaeróbia dos substratos presentes em águas residuárias pode ser dividido em 4 (quatro) fases distintas: (1) hidrólise, (2) acidogênese, (3) acetogênese e (4) metanogênese.

1. HIDRÓLISE:

Processo em que o material orgânico particulado (proteínas, carboidratos, lipídios) é convertido em compostos dissolvidos de menor peso molecular, por ação das exo-enzimas excretadas pelas bactérias fermentativas, pois estas bactérias não têm capacidade de digerir a matéria orgânica particulada.

2. ACIDOGÊNESE:

Os compostos liquefeitos pelo processo de hidrólise são absorvidos pelas células das bactérias fermentativas e, posteriormente, excretados como compostos simples, tais como: ácidos graxos voláteis (AGV), álcoois, ácido lático e compostos minerais como CO_2 , H_2 , NH_3 , H_2S , etc.

3. ACETOGÊNESE:

Os produtos da acidogênese formam os substratos para produção de metano. Dependendo do estado de oxidação do material a ser digerido, uma fração de aproximadamente 70% da DQO se converte em ácido acético (acetato) e 30% pode ser convertido em hidrogênio ou dióxido de carbono.

4. METANOGÊNESE:

Esta é a última fase do processo de digestão. Por isso é de grande importância, sobretudo por se tratar do processo de conversão do acetato, hidrogênio e CO_2 em metano sob ação das bactérias metanogênicas. Estas bactérias são consideradas os microrganismos “chave” na biotecnologia anaeróbia, dada a sua sensibilidade às condições ambientais do processo, atribuídas especialmente a variações do pH, concentração de ácidos voláteis e temperatura do sistema.

Por conveniência, chama-se as 3 (três) primeiras fases do processo de Fermentação Ácida, que deve ser completada com a Fermentação Metanogênica (JOHANSSON *et al.*, 1993). Essa relação de dependência é de suma importância para o bom funcionamento do sistema, uma vez que a remoção dos ácidos voláteis, através da alta atividade metanogênica, resulta numa estabilidade do pH dentro da faixa ótima (6,3 - 7,8), condição necessária para manter o equilíbrio das populações bacterianas. Desse modo, evita-se o perigo de “azedamento” do conteúdo do digestor pela ocorrência de um pH baixo (< 6,3) que indica a preponderância da fermentação ácida sobre a fermentação metanogênica. Sob essas condições, podem ocorrer enormes prejuízos ao digestor que, só começará a funcionar adequadamente, quando da adição de alcalinidade externa até atingir

uma capacidade de tamponação satisfatória para afastar o risco de instabilidade no sistema (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994).

A U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (U. S. EPA, 1976) e STEPHEN & NEWBRY (1985) consideram que a digestão anaeróbia se processa segundo dois principais estágios bastante característicos: formação de ácidos e produção de biogás. A população microbiana responsável por esta conversão pode ser dividida em 3 (três) grupos, cada um responsável por uma função separadamente: solubilização, formação de ácidos, e produção de metano. A Fig. 3.1 apresenta um esquema do processo de digestão.

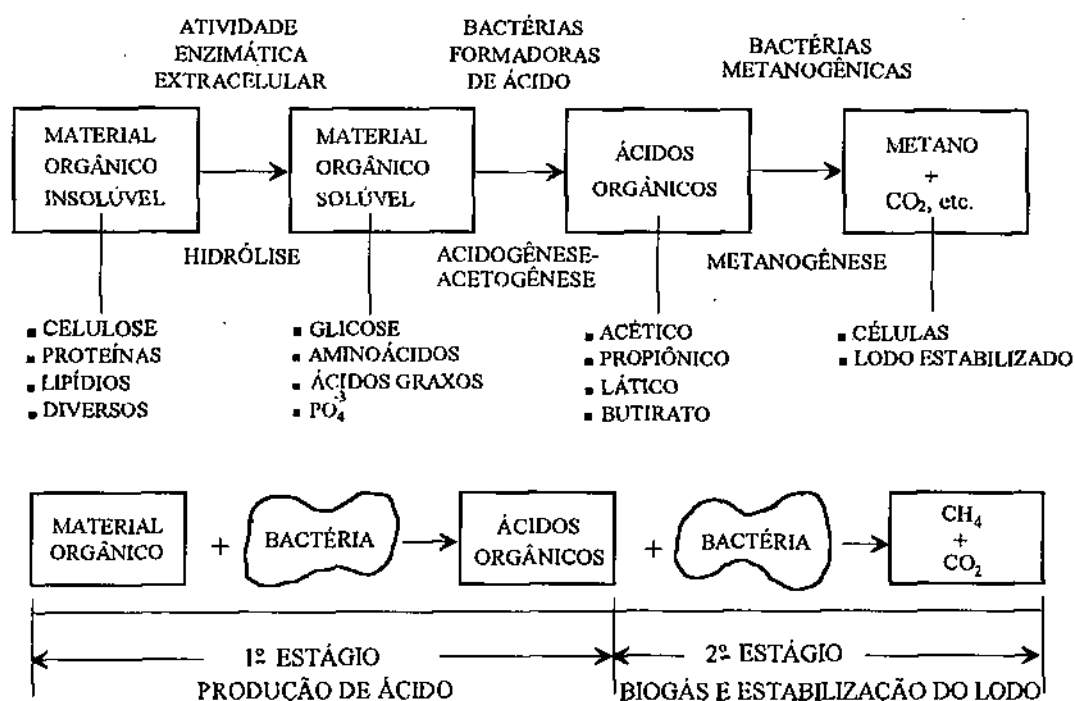


Figura 3.1 - Representação do processo microbiológico atuante na digestão anaeróbia.
Fonte: U. S. EPA, 1976; STEPHEN & NEWBRY, 1985

Estudos sobre a digestão anaeróbia levaram à conclusão que a produção de gás está intrinsecamente relacionado à degradação de sólidos voláteis (SSV). FADRUS & MALY (1971) e FAIR & MOORE (1932) apud VAN HAANDEL *et al.* (1990), trabalhando com lodo primário obtiveram uma relação DQO/SSV de $p = 2,0gDQO/gSSV$ contra $p = 1,5gDQO/gSSV$ para lodo secundário.

VAN HAANDEL & ARAÚJO (1993) pesquisando a degradação do lodo secundário doméstico concluíram que 53% da fração ativa (massa de microrganismos) e 15% do lodo inativo, podiam ser degradados anaerobiamente em digestores com mistura completa.

Com base nesse estudo e utilizando a teoria de MARAIS & EKAMA (1976), BARBOSA NETO *et al.* (1993) informaram que na composição do lodo afluyente da CETREL a fração de lodo ativo é apenas 49% da concentração de lodo volátil.

3.4 - Aspectos Microbiológicos do Metabolismo Bacteriano.

As bactérias metanogênicas geralmente são constituídas de pequenas células na ordem de um micrômetro (1μ), contendo uma estrutura formada de parede celular, membrana celular, ribossomos, citoplasma, flagelo e material genético (DNA), conforme mostra a Figura 3.2 (COLETÂNEA DE TRABALHOS SOBRE DIGESTÃO ANAERÓBIA, 1993). Essas bactérias são filogeneticamente distintas dos microrganismos típicos procarióticos. As paredes das células desses organismos não contêm os ácidos murânicos, como ocorre com outros microrganismos procarióticos. Por isso, essas bactérias têm sido classificadas como grupo *Archaeobacteria*, o qual inclui 3 (três) diferentes sub-grupos: (a) metanogênicas, (b) halófilos e (c) termoacidófilas (MUDRACK & KUNST, 1986). As metanogênicas são amplamente distribuídas na natureza, podendo ser encontradas em ambientes desprovidos de oxigênio, a exemplo do trato intestinal dos animais em geral, em águas estagnadas e nas estações de tratamento de águas residuárias. As bactérias halófilas exigem uma alta concentração de sal, algumas delas crescem rapidamente em ambientes extremamente salgados, sendo encontradas com frequência no mar. O terceiro tipo de *Archaeobacteria*, as termoacidófilas, são espécies que sobrevivem em ambientes ácidos e temperaturas em torno de 80°C (MUDRACK & KUNST, 1986).

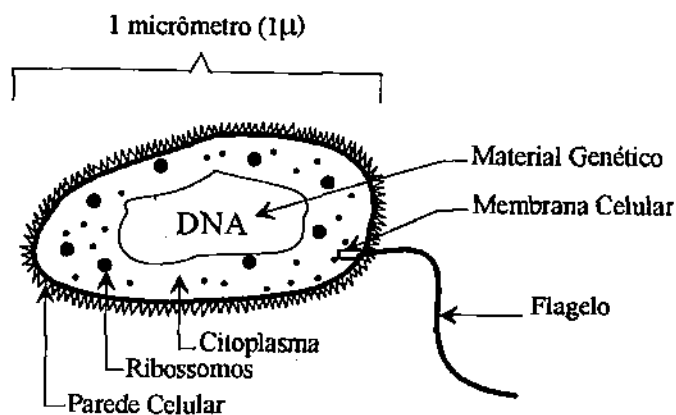


Figura 3.2 - Estrutura celular típica da *Archaeobacteria*.
 Fonte: Coletânea de trabalhos sobre digestão anaeróbia, 1993.

De acordo com POHLAND (1971), comumente as bactérias metanogênicas ocorrem na forma de bastonetes e cocos, são altamente móveis e tem parede celular muito frágil. Elas podem crescer em uma ampla variedade de temperaturas, mas são extremamente sensíveis a meio ácido. Várias espécies já foram identificadas, tais como:

- ♦ *Methanococcus vannielli*
- ♦ *Methanosarcina barkeri*
- ♦ *M. voltae*
- ♦ *Methanospirillum hungatei*
- ♦ *Methanomicrobium mobile*
- ♦ *M. marisnigri*
- ♦ *Methanogenium cariaci*
- ♦ *Methenobacterium bryantii*
- ♦ *M. ruminantium*
- ♦ *M. arboriphilus*
- ♦ *Methanobrevibacter smithii*
- ♦ *M. thermoautotrophicum*
- ♦ *M. formicicum*
- ♦ *Methanotherix soehngeni*

As bactérias metanogênicas são organismos de extrema sensibilidade; e a quantidade e qualidade do substrato é um dos fatores determinantes das características de biodegradabilidade na digestão anaeróbia (TOLEDO, A. S. *et al.*, 1995). Os componentes orgânicos e inorgânicos presentes no substrato conduzem a uma seleção natural entre as bactérias, onde vigora a lei do mais forte, exatamente àquelas que são capazes de metabolizar a matéria orgânica disponível. Em se tratando de efluentes industriais, o risco de colapso da população bacteriana metanogênica é um tanto considerável, dada a diversidade de componentes tóxicos presentes nesses efluentes.

Na composição de qualquer tipo de lodo existem duas formas de material orgânico presente: parte solúvel e parte insolúvel. As partículas insolúveis tais como gordura ou sólidos complexos, são mais difíceis de serem metabolizadas pelas bactérias. Naturalmente esta alíquota deve ser solubilizada previamente para servir como alimento bacteriano. As bactérias formadoras de ácidos, por exemplo, excretam enzimas que se responsabilizam pela quebra do material insolúvel, convertendo-o em compostos dissolvidos de fácil absorção. A parede celular da bactéria funciona como se fosse uma peneira para reter as partículas maiores, enquanto a membrana interna seleciona e conduz o material solúvel para o interior da célula, como mostra a Figura 3.3. (U. S. EPA, 1976).

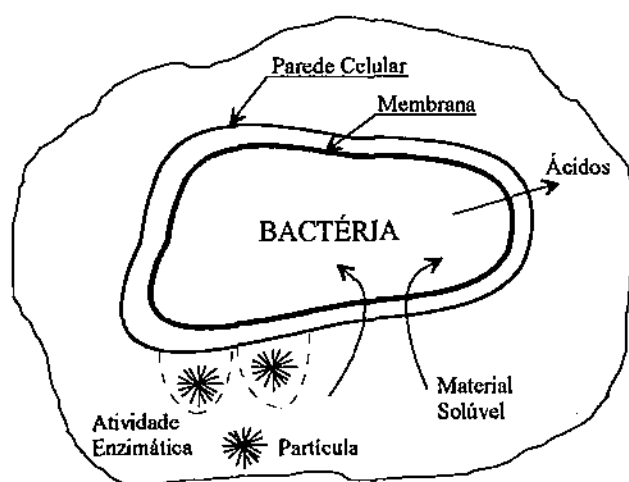


Figura 3.3 - Metabolismo bacteriano.
Fonte: U. S. EPA, 1976.

3.5 - Cinética da Digestão.

No tratamento de efluentes industriais utilizando digestores anaeróbios típicos, geralmente obtém-se uma taxa específica máxima de utilização na ordem de 1-2kg DQO/(kg .biomassa .d). Existem duas classes principais de metanogênicas que convertem o acetato em metano: *Methanothrix* e *Methanosarcina* (SPEECE, 1986 apud ECKENFELDER, 1963). A *Methanothrix* tem uma baixa atividade específica em sistemas com baixa concentração de acetato. Em sistemas altamente carregados, a *Methanosarcina* predomina com alta atividade específica, especialmente se traços de cobalto, níquel, molibdênio, selênio, cálcio, magnésio, etc. estão disponíveis (ECKENFELDER, 1963).

VAN HAANDEL & LETTINGA (1994) definem a taxa específica máxima de utilização do substrato, (K_m), como sendo a massa máxima de substrato que pode ser metabolizada por unidade de tempo e por unidade de massa de microrganismos. O seu valor pode ser calculado a partir da taxa específica de crescimento máximo relativo aos microrganismos, μ_m , e do coeficiente de rendimento Y:

$$K_m = \mu_m / Y \quad (1)$$

Segundo HENZEN & HARREMÕES (1983), os valores das constantes cinéticas podem ser estimados a partir da Tabela 3.1, obtida através de vários experimentos relatados por diversos autores (HENZEN & HARREMÕES, 1983 apud VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994).

TABELA 3.1 - Valores das constantes cinéticas de culturas anaeróbias.

CULTURAS	μ_m (d ⁻¹)	Y mg/SSV mg DQO	K_m mg DQO mg SSV.d	K_s mg DQO/L
Bactérias de Fermentação Ácida	2,0	0,15	13	200
Bactérias Produtoras de Metano	0,4	0,03	13	50
Cultura Combinada	0,4	0,18	2	---

Nota: K_s - constante de meia saturação (Monod).
Fonte: VAN HAANDEL & LETTINGA (1994).

VAN HAANDEL & LETTINGA (1994) representaram esquematicamente (ver Figura 3.4) a composição do lodo com a taxa máxima de utilização do substrato para (1) acetato, (2) material orgânico complexo (dissolvido) e, (3) esgoto bruto.

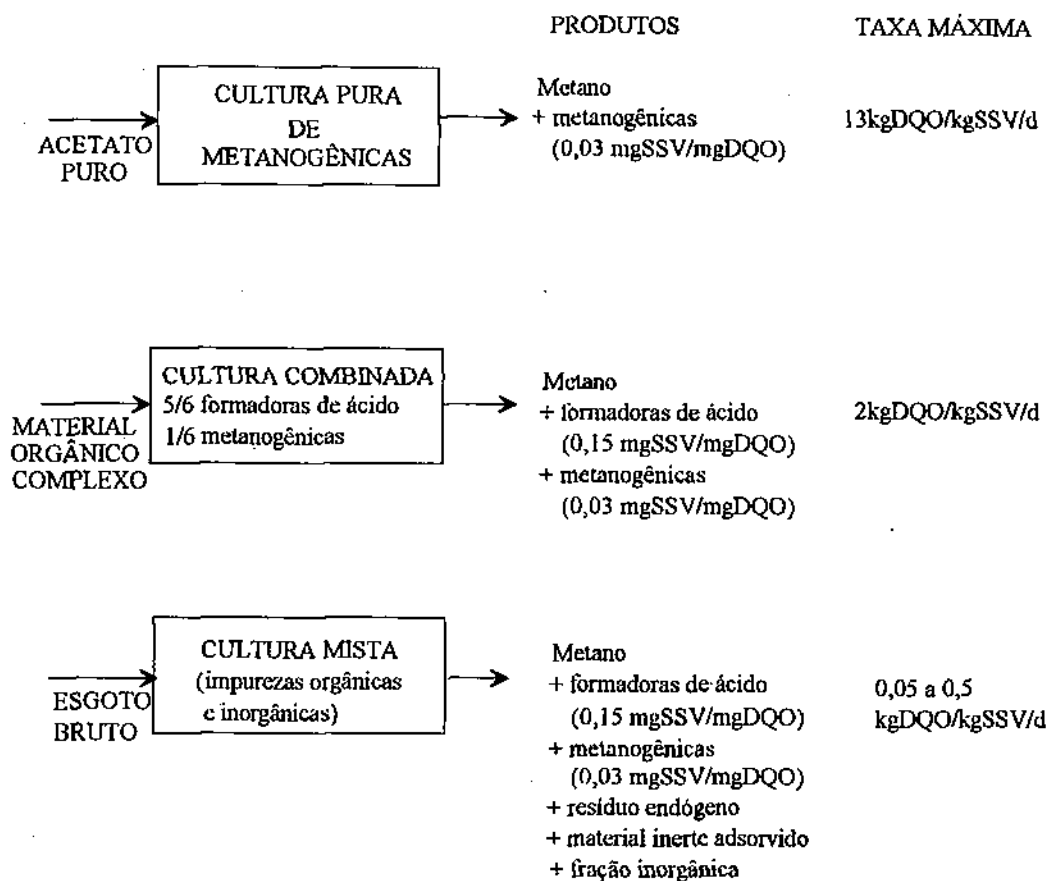


Figura 3.4 - Representação esquemática da composição do lodo e da taxa máxima de utilização para três tipos de substrato.

Fonte: VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994.

3.6 - Fatores que Influenciam a Eficiência da Digestão.

A eficiência de um digestor anaeróbio é afetada por uma série de fatores que vão desde as condições ambientais, operação do sistema, natureza da matéria prima afluyente, temperatura, presença de nutrientes, ausência de materiais tóxicos e até do projeto do digestor. A combinação harmoniosa dessa variedade de fatores acarreta numa boa eficiência de digestão do material orgânico em biogás (U.S. EPA, 1976).

3.6.1 - Temperatura.

Em se tratando de fatores ambientais a temperatura é considerada uma variável de processo, dada a sua importância para a digestão anaeróbia (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994). O desenvolvimento dos microrganismos e, conseqüentemente, a produção de biogás, depende fortemente da temperatura na câmara de digestão. São conhecidos 3 (três) grupos distintos de bactérias metanogênicas associadas a uma faixa específica de temperatura:

- ♦ Termofílica - maior que 45°C
- ♦ Mesofílica - entre 20 - 45°C
- ♦ Psicofílica - menor que 20°C

Os microrganismos anaeróbios são bastante sensíveis a variações térmicas, podendo acarretar até o decaimento da população microbiana, levando à redução da eficiência da taxa de digestão com a diminuição ou aumento excessivo da temperatura. Segundo VAN HAANDEL & LETTINGA (1994), existe um máximo relativo a 35°C e um máximo absoluto de aproximadamente 55°C, onde se obtém um valor máximo da taxa de digestão. Por essa razão, distingue-se uma região mesofílica abaixo de 45°C e uma região termofílica acima desta temperatura, associada diretamente com a máxima produção específica de gás, conforme ilustra a Fig. 3.5.

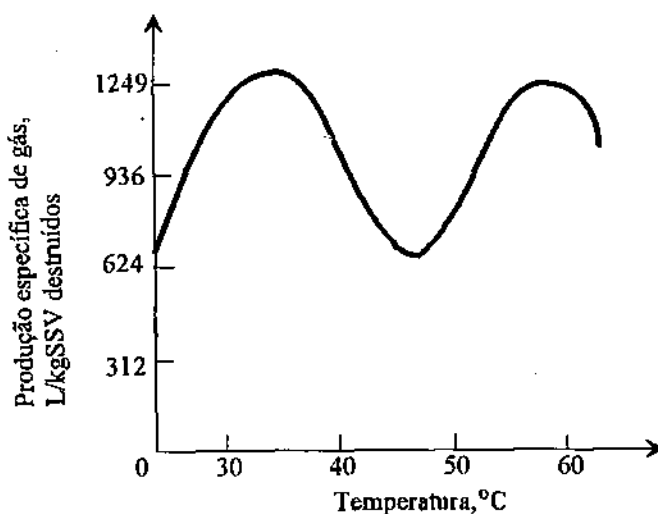


Figura 3.5 - Produção específica de gás em função da temperatura
Fonte: STEPHEN & NEWBRY, 1985.

Segundo BATISTA (1981: Cap. 2):

“...o grupo das termofílicas apresenta uma taxa máxima de digestão próxima a 54°C e as mesofílicas a 35°C. Apesar das termofílicas apresentarem vantagens substanciais, em termos de tempo de retenção, sobre as mesofílicas, há evidências de que o grau de decomposição dos sólidos orgânicos é praticamente igual para todos os grupos de bactérias. Ainda assim, o custo de infra-estrutura do sistema é bem maior no que opera com as bactérias termofílicas do que um outro que opera com as mesofílicas, produzindo, ambos os grupos, o mesmo volume de biogás...”

Este aumento do custo está associado à implantação de um sistema de aquecimento no digestor para manter a alta temperatura no sistema digestor termofílico, embora seja necessário, nesse caso, um digestor de volume menor devido à baixa retenção de sólidos. Em outros termos, a temperatura afeta a fração de sólidos orgânicos que pode ser metabolizada no processo de digestão. De acordo com O'ROURKE (1968) a fração de material digerido diminui marcadamente com a diminuição da temperatura. Isso se deve provavelmente à baixa taxa de hidrólise, o que permite que grande parte de partículas sólidas e macromoléculas permaneçam intactos (O'ROURKE, 1968 apud VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994).

As evidências experimentais denotam que um digestor funcionando a temperatura abaixo de 30°C, a taxa máxima de digestão anaeróbia decresce a uma taxa de 11% por °C, o que de certo modo privilegia as regiões tropicais e subtropicais por terem uma temperatura ambiental constante da ordem de 30°C ± 5°C (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994).

3.6.2 - Nutrientes.

A presença de nutrientes também é de vital importância para o bom funcionamento de um digestor anaeróbio. A necessidade de fósforo está em torno de 15% da necessidade de nitrogênio (MUDRACK & KUNST, 1986). Além do nitrogênio e fósforo existem os micronutrientes ou traços de nutrientes, que são também importantes para as

metanogênicas. Os nutrientes comumente disponíveis são de origem orgânica e inorgânica, destacando-se principalmente os elementos carbono, nitrato, fosfatos e sulfatos (BATISTA, 1981: Cap. 2). Convém lembrar que qualquer nutriente ou elemento em solução no digestor, desde que em excesso, pode provocar sintomas de toxidez na colônia de microrganismos presentes.

3.6.3 - Substâncias Tóxicas.

Embora seja difícil estabelecer o limite máximo da concentração permissível para elementos supostamente tóxicos, devido à complexidade do processo, alguns autores apresentam uma variedade de grupos de substâncias químicas que constituem fortes agentes tóxicos à digestão anaeróbia, tais como: metais pesados, substâncias organoclorados, sulfetos, nitrogênio amoniacal, cianetos, oxigênio, etc. Tais substâncias podem ser introduzidas no sistema segundo 2 (duas) condições: (1) adição em batelada provocando ondas de choque na flora bacteriana e, (2) acumulação gradual devido à presença frequente de eventuais elementos tóxicos na vazão afluyente. A conseqüência mais notável das cargas de choque é a parada quase que de imediato da produção de biogás. Já a ocorrência de uma dose acumulativa de elementos tóxicos acarreta vários inconvenientes de ordem operacional no digestor, evidenciado rapidamente pela elevação na concentração de ácidos voláteis no conteúdo do digestor, o que demanda tempo até haver uma completa aclimatação dos microrganismos aos agentes tóxicos (U. S. EPA, 1976). Segundo MOSEY (1975) o valor de 400 meq de metais / kg SST corresponde à concentração máxima permissível de toxicidade nos lodos em digestão, estabelecido como limite acima do qual é provável a inibição da digestão anaeróbia (MOSEY, 1975 apud SOUSA, 1982).

Uma concentração excessiva de sulfetos, cianetos, ácidos voláteis, amônia, metais pesados e outros, constituem um desequilíbrio no processo de digestão quando estas substâncias são produzidas e/ou adicionadas dentro do digestor em concentrações acima do valor tolerado. DO NASCIMENTO (1994) cita alguns exemplos:

- ♦ **“CIANETOS”**: as bactérias metanogênicas podem se aclimatar a concentrações de cianetos de até 20 a 40mg/L, sem inibição da produção de metano. Doses de choque de até 750mg/L provocam severa inibição do processo, mas o digestor se recupera em poucos dias;
- ♦ **“ÁCIDOS VOLÁTEIS”**: os ácidos voláteis até concentrações de 6.000 a 8.000mg/L não são tóxicos à digestão anaeróbia, desde que o pH do sistema seja mantido próximo à neutralidade, ou seja, 7. Entretanto, a acumulação desses ácidos pode inibir tanto as bactérias metanogênicas como as próprias bactérias acidogênicas;
- ♦ **“OXIGÊNIO”**: as bactérias metanogênicas são estritamente anaeróbias, e por isto, em culturas puras, qualquer traço de oxigênio molecular pode lhes ser prejudicial. Observou-se que adições de uma só vez de até 360mgO₂/L no digestor, não afetam o processo de digestão, ao passo que há inibição quando a adição for de 1.300mgO₂/L;
- ♦ **“SULFETOS”**: os sulfetos podem ser produzidos no digestor por uma variedade de compostos de enxofre, incluindo os sulfatos e alguns aminoácidos. Os pesquisadores observaram os seguintes efeitos de toxicidade dos sulfetos solúveis na digestão anaeróbia:

CONCENTRAÇÃO DE SULFETOS SOLÚVEIS (mg/L)	EFEITO
50 a 100	tolerável com pouca ou nenhuma aclimação
até 200	tolerável com aclimação
acima de 200	bastante tóxico

- ♦ **“NITROGÊNIO AMONIACAL”**: observou-se que o efeito da amônia pode ser causado por ambas as formas químicas: gás amônia dissolvido (NH₃), ou íon amônio (NH₄⁺) (STEPHEN & NEWBRY, 1985). A concentração inibitória de N-amoniaco depende da sua

concentração, sendo a dosagem limite dada por um valor menor que 1500mg/L, conforme mostra o quadro abaixo:

CONCENTRAÇÃO DE N-AMONÍACAL	EFEITO
50 - 200	benéfico
200 - 1.000	sem efeitos adversos
1.500 - 3.000	inibitório a altos valores de pH
> 3.000	tóxico em qualquer pH

Fonte: DO NASCIMENTO, 1994.

- ♦ **“METAIS PESADOS”**: a presença de metais pesados em excesso no digestor é uma importante causa de falhas no processo de digestão (BHATTACHARYA *et al.*, 1995). Somente as frações solúveis dos metais pesados são tóxicos à digestão anaeróbia. Alguns pesquisadores observaram que certas concentrações de metais solúveis são inibitórios aos organismos metanogênicos. A Tabela 3.2 apresenta os valores das concentrações inibitórias de alguns metais:

TABELA 3.2 - Concentração total de metal solúvel necessário para provocar severa inibição na flora bacteriana.

CONCENTRAÇÃO NO CONTEÚDO DO DIGESTOR			
METAL	(%) DE METAIS NOS SÓLIDOS SECOS	MILIMOLES DE METAL POR QUILOGRAMA DE SÓLIDOS SECOS	METAL SOLÚVEL (mg/L)
Cobre	0.93	150	0.5
Cádmio	1.08	100	---
Zinco	0.97	150	1.0
Ferro	9.56	1.710	---
Cromo + 6	2.20	420	3.0
+ 3	2.60	500	---
Níquel	---	---	2.0

Fonte: STEPHEN & NEWBRY, 1985.

STEPHEN & NEWBRY (1985) informam ainda os efeitos de toxicidade de outros poluentes, como mostra a Tabela 3.3.

TABELA 3.3 - Poluentes tóxicos inibitórios para digestão anaeróbia do lodo.

POLUENTES TÓXICOS	CONCENTRAÇÃO INIBITÓRIA (mg/L)
Acrilonitrilo	5 (S)
Arsênico	1.6 (S)
Benzeno	5 (S)
Tetracloroeto de Carbono	10 a 20 (S)
Clorofórmio	10 a 16 (S)
Cádmio	0.02 (S) ≥ 20 (T)
Cromo	
+ 6	5 a 50 (S) / 110 (T)
+ 3	50 a 500 (S) / 130 (T)
Cobre	1 a 10 (S) / 40 (T)
Cianeto	4 (S) / 1 a 2 (S)
Hexaclorociclohexano	48 (S)
Mercúrio	13 a 65 (S)
Níquel	10 (T)
Pentaclorofenol	0.4 (S)
Tricloroetileno	20 (S)
Zinco	5 a 20 (S) / 400 (T)

Fonte: STEPHEN & NEWBRY, 1985.

Nota: (T) Total, (S) Solúvel.

3.6.4 - Mistura do Lodo.

A literatura especializada mostra que a eficiência de digestão também está intrinsecamente relacionada com o grau de mistura do lodo. Isso porque a mistura proporciona um melhoramento das condições ambientais existentes na câmara de digestão. Para tanto, faz-se necessário escolher um método adequado de mistura, sob pena de tornar o sistema prejudicado pela existência de zonas mortas dentro do digestor. Em geral 3 (três) métodos são comumente usados: mistura mecânica, bombeamento e recirculação do gás. Os tipos de misturadores mecânicos empregados são os impulsores, hélices e turbinas giratórias. Esses dispositivos apresentam desvantagens por serem afetados pela vibração e desgaste devido ao atrito com as partículas sólidas do lodo dentro do digestor. A mistura por bombeamento envolve a reciclagem do conteúdo do digestor com o auxílio de uma bomba externa. Este método pode ser usado eficientemente em conjunto com o pré-aquecimento do lodo bruto afluente. Já a recirculação do gás inclui o uso de hastes tubulares contendo difusores, localizados no fundo do digestor, por onde são liberadas as bolhas de gás que irão promover a mistura. Cada um desses métodos tem suas vantagens e desvantagens e o grau de mistura depende basicamente da energia dissipada dentro do digestor. As pesquisas revelam que a mistura do lodo é extremamente importante para o processo de digestão pelos vários benefícios obtidos, tais como: minimização da estratificação do lodo; distribuição uniforme do substrato para melhorar o contato do material orgânico com a biomassa ativa; redução da espuma; diluição e inibição de substâncias tóxicas; aumento do volume útil do digestor; facilidade de liberação do gás da massa líquida; redução da sedimentação do material inorgânico suspenso e melhoramento do processo de granulação do lodo (PEREBOOM *et al.*, 1994; STEPHEN & NEWBRY, 1985).

A eficiência da mistura no digestor depende de vários fatores, os quais incluem o método adotado para se processar a mistura, volume e geometria do digestor, tipo do equipamento e nível de potência disponível e, ainda, a viscosidade do fluido. Alguns autores sugerem uma seleção adequada do nível de potência dissipada no lodo, sob pena de prejudicar o processo de digestão. Esses valores se encontram na faixa de 5,2 a 40 watts por metro cúbico do digestor. Com base em experimentos em escala de laboratório, SPEED (1972), prognosticou um nível de potência de 40w/m^3 , segundo o qual a energia liberada na

mistura é suficiente para proporcionar uma mistura completa no conteúdo do digestor (SPEED, 1972 apud STEPHEN & NEWBRY, 1985).

3.6.5 - Composição do Lodo.

Convém lembrar que parâmetros operacionais como alcalinidade, ácidos voláteis, pH, temperatura, tempo de permanência, nutrientes e outros, têm sido objeto de muitas pesquisas, como atesta a ampla literatura encontrada sobre esses temas. Em contraste, a composição do lodo de excesso é muito menos estudada.

Recentes estudos revelaram uma relação entre a composição do material orgânico no lodo a ser digerido e o desempenho do digestor, destinado a fazer a estabilização via anaeróbia do lodo de excesso de sistemas de lodo ativado. Para VAN HAANDEL & ARAÚJO (1993).

“...o lodo de excesso pode ser uma mistura dos sólidos sedimentáveis, presentes no afluente e decantados antes do tratamento biológico (lodo primário) e dos sólidos gerados no próprio digestor biológico do sistema de tratamento (lodo secundário). O lodo primário normalmente contém uma alta fração de material biodegradável e por esta razão ele é instável, isto é, entra rapidamente em putrefação, [grifo nosso] o que resulta na produção de um forte odor desagradável [grifo nosso] na liquefação dos materiais sólidos. Já o lodo secundário se compõe de uma fração biodegradável, composto pela massa de microrganismos vivos - o lodo ativo - e de uma fração não biodegradável - o lodo inativo. Basicamente a composição do lodo de excesso é uma mistura de lodo primário e secundário ou somente lodo secundário...”

VAN HAANDEL & ARAÚJO (1993) mostraram através de experimentos que a eficiência de conversão do material orgânico em metano depende acentuadamente da composição do lodo. Segundo eles *“um digestor anaeróbio com um tempo de permanência de 20 (vinte) dias e uma temperatura de 25°C pode converter até 53% do lodo ativo e 15% do lodo inativo”*. Durante o processo de digestão anaeróbia, no experimento por eles

realizado, os pesquisadores concluíram ainda que há mineralização de nitrogênio, que resulta na produção de alcalinidade no digestor. Observaram também uma liberação de $0,105\text{gN/gSSV}$ como amônia e um aumento de alcalinidade de $0,28\text{mgCaCO}_3/\text{mgSSV}$. A concentração de amônia liberada não chega a ser tóxica para bactérias metanogênicas e a alcalinidade é mais que suficiente para uma operação estável do digestor anaeróbio de lodo sem que haja necessidade de adicionar alcalinizante. Na Figura 3.6 observa-se graficamente a concentração de amônia liberada e a concentração de lodo digerido nas investigações experimentais. Semelhantemente a Figura 3.7 mostra a relação entre o aumento da alcalinidade e a concentração de lodo volátil digerido nos digestores.

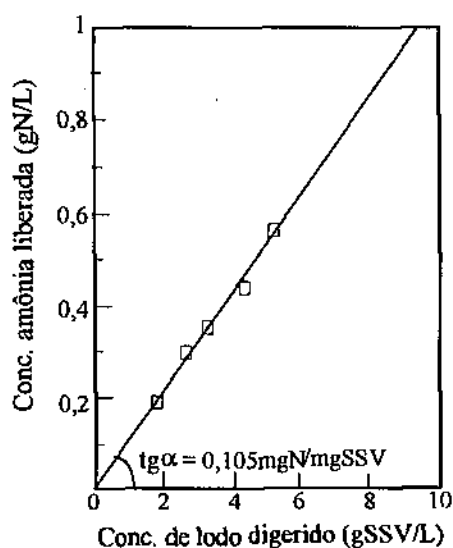


Figura 3.6 - Relação entre amônia liberada e a concentração de lodo volátil digerido nos digestores anaeróbios

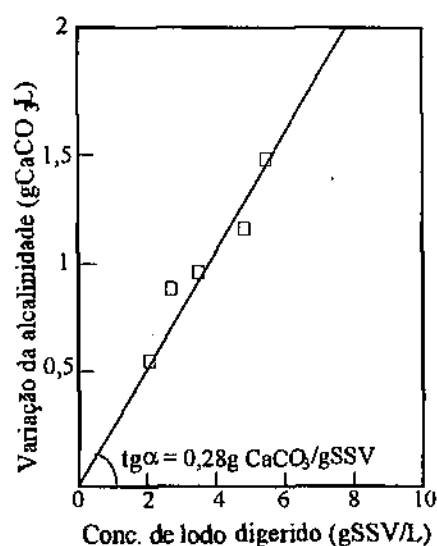


Figura 3.7 - Relação entre o aumento de alcalinidade e a concentração de lodo volátil digerido nos digestores.

Fonte: VAN HAANDEL & ARAÚJO, 1993.

3.7 - Classificação dos Digestores.

Quanto a descrição do sistema de digestão os digestores são classificados em 2 (dois) tipos: alta-taxa e baixa-taxa. Esses digestores são geralmente constituídos de tanques em forma cilíndrica com inclinação no fundo, podendo ter ou não qualquer dispositivo de mistura externa no conteúdo do digestor (STEPHEN & NEWBRY, 1985).

A ausência de mistura e/ou mistura deficiente no digestor representa um grande problema ao processo de digestão. Isso porque fatores físico-químicos interferem no conteúdo do digestor e proporcionam a formação de camadas distintas no lodo, o que dificulta o contato entre a população bacteriana e o material orgânico afluyente. O lodo estratificado forma basicamente 5 (cinco) camadas: (1) lodo digerido, (2) zona ativa, (3) sobrenadante, (4) camada de espuma e (5) biogás. Os sólidos voláteis e inorgânicos que não são facilmente digeridos se sedimentam e formam a camada de fundo do digestor. Assente sobre a primeira camada se encontra a população bacteriana, limitada pelo extremo superior por uma camada líquida denominada sobrenadante, cuja origem resulta do fenômeno da exsudação da água do lodo. O lençol de espuma formado acima do sobrenadante, provém da concentração de bolhas de gás não desprendida da massa líquida. As consequências imediatas da estratificação do lodo são a acumulação gradativa de materiais indesejáveis (sólidos inorgânicos, água, espuma), que tenderão formar camadas compactas dentro do digestor, atuando como verdadeiras barreiras físicas, as quais interferem na operação do sistema, reduzindo o volume efetivo do digestor e prejudicando a produção e liberação do gás (U. S. EPA, 1976).

A Figura 3.8 ilustra o esquema de um digestor anaeróbio de baixa taxa. De acordo com STEPHEN & NEWBRY (1985) esse digestor tem como características peculiares de projeto e funcionamento: alimentação intermitente, baixa taxa de carregamento orgânico, ausência de mistura externa, longo tempo de detenção (30 a 60 dias), grandes tanques devido a redução do seu volume útil, dada a acumulação de materiais inertes (areia) no fundo e espuma na parte superior do digestor. Comumente esse tipo de sistema é mais utilizado em pequenas estações de tratamento de águas residuárias diluídas (esgoto doméstico) com vazões abaixo de 40 L/s, sob pena de se obter pouca eficiência no processo de digestão.

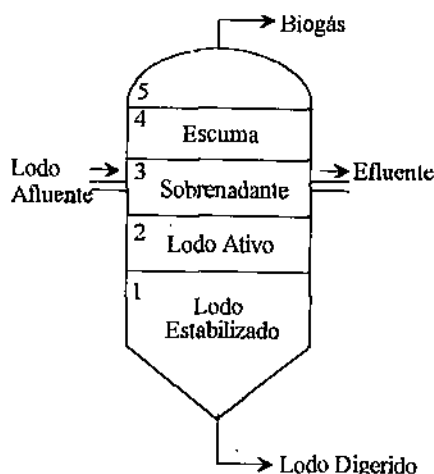


Figura 3.8 - Digestor anaeróbico de baixa-taxa.

Fonte: STEPHEN & NEWBRY, 1985

Na tentativa de melhorar o sistema padrão (baixa-taxa) foi criado na década de 1950 o sistema anaeróbico de alta-taxa, cujas características de projeto incluem dispositivos de aquecimento auxiliar (opcional) e um sistema de mistura externa para promover uma homogeneização uniforme e completa no conteúdo do digestor, a fim de otimizar as condições ambientais do processo, objetivando o crescimento das bactérias metanogênicas (lodo ativo) e conseqüentemente o aumento da taxa de produção de biogás.

A Figura 3.9 representa um esquema de um digestor anaeróbico de alta-taxa. Segundo STEPHEN & NEWBRY (1985) esses digestores são geralmente empregados no tratamento de águas residuárias concentradas (efluentes industriais), sendo operados na faixa de temperatura mesofílica ou termofílica, dependendo do local de construção do sistema (temperatura operacional) e da disponibilidade de recursos necessários para implantação do dispositivo de aquecimento do digestor. Embora a digestão mesofílica seja comprovadamente eficiente, a digestão termofílica oferece diversas vantagens sobre a mesofílica, tais como: aumento da taxa de digestão, aumento da redução de patógenos, baixo tempo de retenção do lodo, menor volume do tanque e superioridade nas características de secagem do lodo digerido (STEPHEN & NEWBRY, 1985). No entanto, os custos de implantação são maiores do que um sistema mesofílico, o que representa um entrave para alguns países em desenvolvimento que não dispõem de recursos financeiros

suficientes para tal fim. Naturalmente essas regiões são agraciadas com o privilégio de oferecer, a contento, uma temperatura ambiental favorável dentro da faixa mesofílica, o que dispensa a implantação do digestor termofílico.

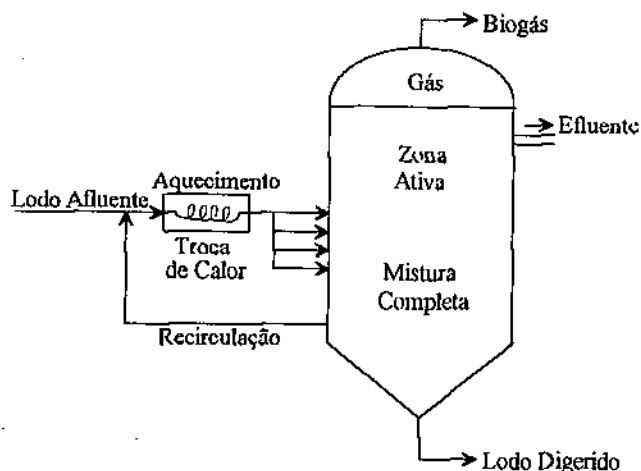


Figura 3.9 - Digestor anaeróbico de alta-taxa.
Fonte: STEPHEN & NEWBRY, 1985.

Novas tecnologias têm sido desenvolvidas no sentido de otimizar o processo de digestão. Especificamente, merecem atenção os sistemas de separação física de fases entre as bactérias acidogênicas e metanogênicas, utilizando dois digestores separados em série (BABBIT & BAUMANN, 1958). Esses pesquisadores sugeriram que os efeitos inibitórios dos produtos intermediários produzidos durante o processo de digestão poderiam ser minimizados submetendo o sistema a separação em duas fases. Já POHLAND & GHOSH (1971) publicaram dados demonstrando que o emprego de dois digestores separados e em série, fornece oportunidade para otimizar o processo de digestão, convertendo os subprodutos a taxa mais altas comparando com o sistema convencional de fase única (POHLAND & GHOSH, 1971 e BABBIT & BAUMANN, 1958 apud CORBELLINI, 1995).

Estudos mais recentes demonstram a viabilidade do sistema, especificamente utilizando substrato sintético a base de glicose (CORBELLINI, 1995). A Fig. 3.10 ilustra uma representação esquemática de um digestor anaeróbico típico de alta-taxa em duas fases.

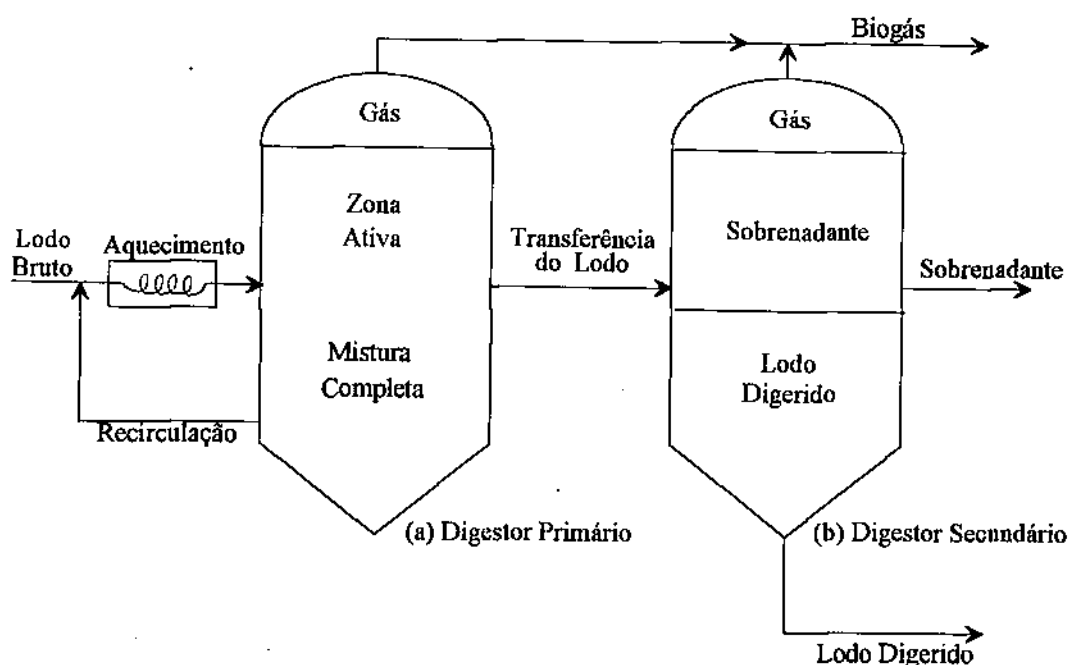


Figura 3.10 - Digestor anaeróbico de alta-taxa, duas fases
 Fonte: STEPHEN & NEWBRY, 1985.

3.8 - Aspectos de Dimensionamento.

Quanto ao aspecto físico do sistema, o primeiro parâmetro necessário para o dimensionamento de um digestor anaeróbico é o Tempo de Retenção de Sólidos (TRS), também denominado de tempo de permanência (T_p), que representa o tempo (em dias) em que a fração sólida permanece no digestor. VAN HAANDEL & LETTINGA (1994) definem o tempo de permanência (T_p , d) como sendo a razão entre o volume do digestor (V_d , m^3) e a vazão afluente (Q_a , m^3/d).

Em se tratando do grau de digestão, a temperatura também afeta a fração de sólidos orgânicos no lodo digerido. A quantidade de sólidos suspensos voláteis (SSV) destruídos é função da temperatura e do tempo de retenção de sólidos (TRS), segundo preconiza O'ROURKE (1968) através de suas investigações utilizando lodo anaeróbico primário. A Figura 3.11 ilustra esses efeitos empregando um digestor mesofílico em escala de laboratório.

De acordo com STEPHEN & NEWBRY (1985) estima-se que um digestor típico de alta-taxa remove cerca de 40 a 60% dos sólidos suspensos voláteis. Naturalmente cada digestor, na prática, exibe seu próprio nível de degradação dependendo das características do lodo afluyente. Várias investigações indicam que somente 60 a 80% dos sólidos voláteis da vazão de alimentação são biodegradados no digestor (STEPHEN & NEWBRY, 1985).

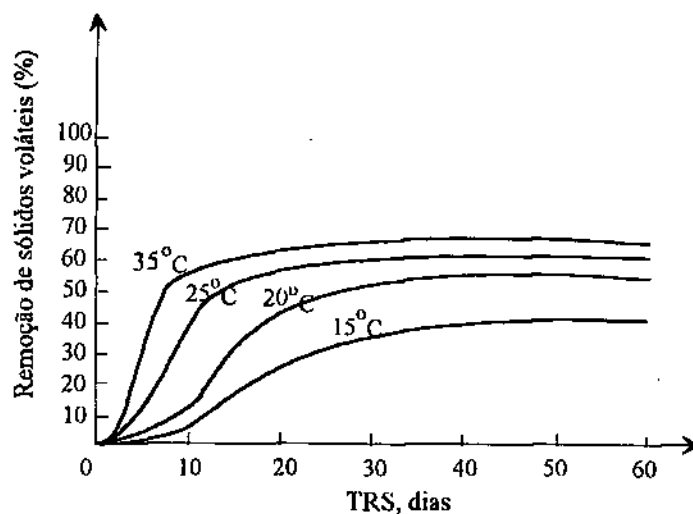


Figura 3.11 - Destruição de sólidos voláteis como função da temperatura e TRS.
Fonte: STEPHEN & NEWBRY, 1985.

Investigações sobre o comportamento dos organismos anaeróbios comprovaram que se faz necessário definir um TRS mínimo necessário para o desenvolvimento do metabolismo bacteriano. STEPHEN & NEWBRY (1985) apresentam o TRS de 15 (quinze) dias como tempo crítico para uma operação normal de um digestor anaeróbio de alta-taxa. Valores mais baixos podem levar a preponderância da acidogênese sobre a metanogênese, devido à produção de ácidos graxos voláteis e outros produtos intermediários em excesso, acarretando uma instabilidade no pH, resultando num possível "azedamento" do conteúdo do digestor.

Em geral, o cálculo do TRS crítico é baseado nos estudos da cinética da digestão, os quais são o ponto de partida para o dimensionamento e funcionamento dos digestores. Naturalmente são modelos matemáticos resultantes de diversas investigações, a partir de experimentos laboratoriais onde os pesquisadores comprovam princípios que

regem o comportamento dos organismos anaeróbios. Com o apoio destes conhecimentos preliminares, torna-se possível projetar, operar e investigar a eficiência do processo de digestão.

Teoricamente pode-se estimar o TRS crítico baseado no modelo matemático desenvolvido por BENEFIELD & RANDALL (1948) de acordo com a expressão:

$$\frac{1}{\phi_c^m} = Y_t \cdot \frac{k \cdot S_o}{K_s + S_o} - K_d \quad (2)$$

- Onde: ϕ_c^m : TRS crítico, (d);
 Y_t : coeficiente de rendimento;
 k : taxa máxima de utilização do substrato (d^{-1});
 S_o : concentração do substrato afluente; massa por volume, (mgDQO/L)
 K_s : constante de meia saturação; massa por volume, (mgDQO/L);
 K_d : coeficiente de decaimento, (d^{-1}).

A biomassa líquida, X , produzida no digestor em kg/d será:

$$X = \frac{Y_t \cdot Q \cdot S_o \cdot E}{1 + K_d \cdot \phi_d^m} \quad (3)$$

- Onde: E : eficiência
 $= 0,60 - 0,90$ (usualmente 0,80)
 Q : vazão do lodo afluente; m^3/d e
 ϕ_d^m : TRS de projeto; d.

Estudos anteriores apresentam valores estimados para os seguintes coeficientes:

$$\begin{array}{l} \text{LAWRENCE} \\ \text{(1971)} \end{array} \left[\begin{array}{l} Y_t = 0,04 \\ K_d = 0,015 \text{ d}^{-1} \end{array} \right.$$

$$\begin{array}{l} \text{O'ROURKE} \\ \text{(1968)} \end{array} \left[\begin{array}{l} k = 6,67 \text{ d}^{-1} \\ K_s = 222,4 \text{ mg/L (DQO a } 35^\circ\text{C)} \end{array} \right.$$

O TRS crítico deverá ser multiplicado por um fator de segurança obtendo-se o TRS de projeto:

$$\phi_d^m = \text{FS} \times \phi_c^m \quad (4)$$

Onde: FS - fator de segurança recomendado: 2 - 10.

Para melhor compreensão e avaliação da operação dos digestores se faz necessário mostrar algumas expressões que conduzem o seu desempenho. A começar pelo percentual de sólidos suspensos voláteis (SSV) convertidos durante a digestão, uma vez que a quantidade e qualidade do gás produzido no sistema está diretamente relacionado ao grau de destruição bioquímica dos sólidos voláteis.

STEPHEN & NEWBRY (1985) propõem as seguintes expressões para estimar a remoção de sólidos voláteis.

- ♦ Para um sistema de alta-taxa:

$$V_d = 13,7 \cdot \ln(\phi_d^m) + 18,94 \quad (5)$$

Onde: V_d : sólidos voláteis destruídos; %
 ϕ_d^m : TRS de projeto; d.

- ♦ Já para o sistema de baixa-taxa a expressão difere da anterior, podendo ser calculada normalmente segundo a equação:

$$V_d = 30 + \frac{t}{2} \quad (6)$$

Onde: V_d - sólidos voláteis destruídos; %

t - tempo de digestão, d.

A Tabela 3.4 apresenta valores estimados do percentual de remoção de sólidos voláteis para digestores de alta e baixa-taxa.

TABELA 3.4 - Destruição de sólidos voláteis.

DIGESTOR	TEMPO DE DIGESTÃO (d)	REMOÇÃO DE SÓLIDOS VOLÁTEIS (%)
ALTA-TAXA	30	65,5
	20	60,0
	15	56,0
BAIXA-TAXA	40	50,0
	30	45,0
	20	40,0

Fonte: STEPHEN & NEWBRY, 1985.

3.9 - Características do Biogás.

Metano e dióxido de carbono são os dois principais constituintes do biogás, embora existam traços de outros gases misturados a exemplo do nitrogênio (N_2), hidrogênio (H_2), gás sulfídrico (H_2S), vapor d'água, etc. (U. S. EPA, 1976; STEPHEN & NEWBRY, 1985; VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994). Em digestores operando em condições satisfatórias estima-se um percentual de metano de 65 a 70%, e dióxido de carbono na ordem de 30 a 35% em volume (U. S. EPA, 1976).

Em geral, se expressa a quantidade de gás produzido no digestor como volume de gás por unidade de sólidos destruídos. A composição do gás depende das características do lodo afluente. Cada substância orgânica contida no lodo tem sua produção específica de gás, conforme mostra a Tabela 3.5.

TABELA 3.5 - Produção de gás de alguns compostos presentes no lodo de águas residuárias.

MATERIAL	PRODUÇÃO ESPECÍFICA DE GÁS POR MASSA DE SÓLIDOS DESTRUÍDOS	
	(m ³ /kg)	METANO, %
Óleo	1,2 a 1,6	62 a 72
Escuma	0,9 a 1,0	70 a 75
Gordura	1,1	68
Fibras brutas	0,8	45 a 50
Proteínas	0,7	73

Fonte: STEPHEN & NEWBRY, 1985.

3.10 - Partida do Digestor e Controle Operacional.

3.10.1 - Partida do Digestor.

A partida do digestor requer cuidados devido ao perigo de sobrecarga orgânica até que se estabeleça um regime estacionário. Diz-se que um digestor anaeróbio atingiu o “estado estacionário” quando a remoção de sólidos voláteis (SSV) apresenta-se praticamente constante com o tempo, sinal de que houve uma aclimação das bactérias àquele substrato, a partir da estabilidade do processo de digestão (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994).

A partida do digestor anaeróbio pode ser iniciada de 2 (duas) formas: com inóculo externo (lodo ativo) ou sem inóculo. Quando se utiliza o próprio lodo a ser tratado (inóculo pobre) tem-se que considerar um “tempo de maturação” do lodo para se obter uma biomassa ativa (lodo granular). Normalmente a produção de lodo é bastante lenta (3% ao dia), sendo 0,1kg lodo/kgDQO com 5 a 10% de massa sólida (DI BERNARDO, *et al.*, 1989).

A literatura destaca alguns fatores para o desenvolvimento do processo de “granulação” do lodo na partida do digestor: (1) condições ambientais: pH, nutrientes, substâncias tóxicas, temperatura, mistura; (2) qualidade do inóculo utilizado e (3) incremento da taxa de carregamento orgânico (LETTINGA *et al.*, 1982 apud DI BERNARDO, 1993).

Além desses fatores, LETTINGA (1995) enumera alguns outros elementos que envolvem o processo de crescimento e deterioração da granulação do lodo:

- ♦ **Características específicas dos organismos:** tipo e morfologia das bactérias, disponibilidade e sensibilidade desses microrganismos;
- ♦ **Taxa de crescimento dos organismos:** o crescimento dos organismos metanogênicos produz um lodo mais compacto e granular, enquanto a preponderância de organismos acidogênicos desenvolvem um lodo com característica floculenta;
- ♦ **Taxa de decaimento dos organismos:** o desequilíbrio entre as populações bacterianas (decaimento das metanogênicas) leva à instabilidade do processo e, conseqüentemente, haverá uma desintegração do conteúdo granular do lodo.

Em geral, os pesquisadores estimam em média um período de partida em torno de 3-5 meses (LETTINGA, 1995), 2-3 meses (GOODWIN *et al.*, 1990 apud BOARDMAN *et al.*, 1995), 5 meses (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994), conforme as condições operacionais: com ou sem inóculo, tipo e composição do substrato, vazão de alimentação (carga aplicada ao lodo metanogênico), desempenho do mecanismo de digestão, etc.

3.10.2 - Controle Operacional.

Em geral, o controle externo em um sistema de digestão de alta-taxa compreende a observância de algumas técnicas preliminares, tais como: características do lodo afluente, funcionamento da bomba de alimentação, recirculação e acessórios, e das condições de estanqueidade do digestor, sob pena de ocorrerem prejuízos no processo - seja por estratificação do lodo, presença de cargas tóxicas, acúmulo excessivo de materiais inertes no tanque de digestão ou mesmo escapamento do biogás.

Já o controle interno é feito de acordo com os resultados obtidos na rotina de análises laboratoriais do lodo digerido, que informam as condições ambientais no conteúdo do digestor. Por esse motivo, exige-se uma minuciosa avaliação dos ácidos voláteis (AV) e da alcalinidade total (AT) produzida no sistema. Isso porque a razão AV/AT se apresenta como um indicativo da eficiência da digestão. Recomenda-se que $AV/AT \leq 0,35$ para que a capacidade de tamponação do sistema seja mantida sem a adição de alcalinizante externo (U. S. EPA, 1976). Segundo informações relatadas em trabalhos de diversos autores, os valores médios da alcalinidade total em digestores anaeróbios se encontram na faixa de 1500 a 5000mg/L como $CaCO_3$, e os valores da concentração de ácidos voláteis em condições estáveis é cerca de 100 a 500mg/L (STEPHEN & NEWBRY, 1985).

A sequência de figuras a seguir relaciona vários parâmetros operacionais com o desempenho do digestor, conforme estudos da U. S. EPA, 1976):

1 - Relação dos Ácidos Voláteis com a Alcalinidade.

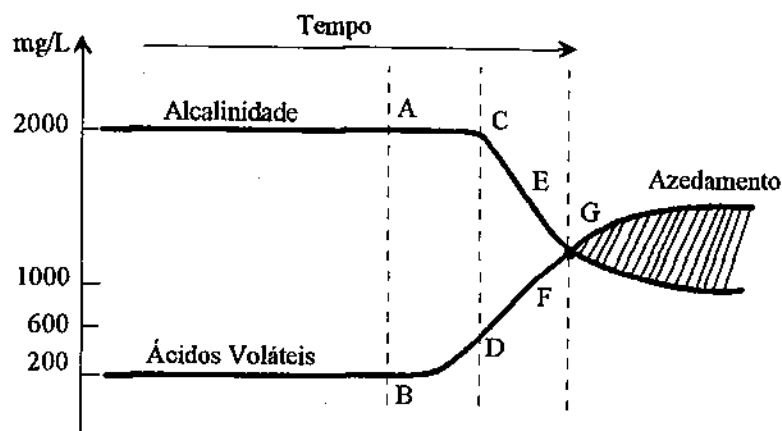


Figura 3.12a

A Figura 3.12a mostra um digestor operando inicialmente com uma boa capacidade de tamponação (concentração baixa de ácidos voláteis 200mg/L comparada com a alcalinidade 2000mg/L). No ponto B, por alguma razão houve um aumento dos ácidos voláteis proporcionando um decréscimo da alcalinidade no ponto C. No ponto G o digestor começa a entrar em colapso com o risco do “azedamento”.

2 - Ácidos Voláteis / Alcalinidade, AV/AT.

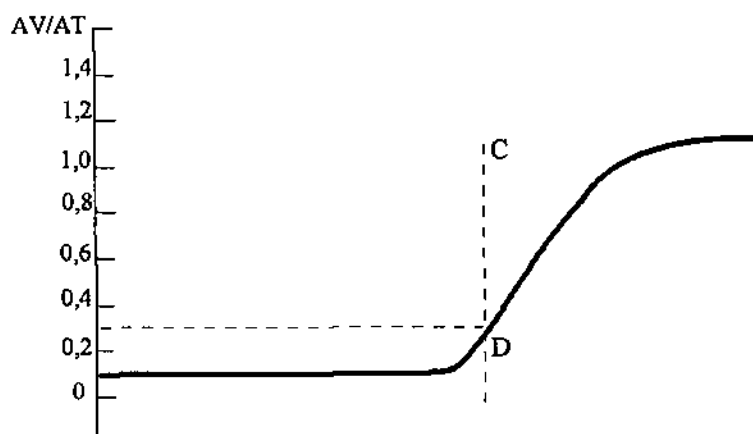


Figura 3.12b

A Figura 3.12b mostra o desempenho do mesmo digestor através da relação AV/AT. Nota-se que nos pontos CD o aumento dos ácidos voláteis produziu um aumento na razão de 0,1 para 0,3.

3 - Produção de Metano (CH_4) e Dióxido de Carbono (CO_2).

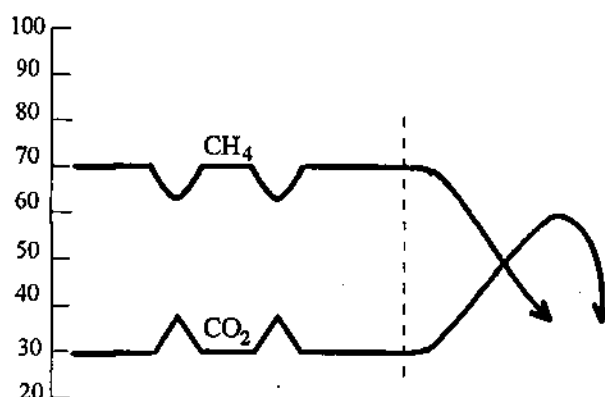


Figura 3.12c

Comparando a Figura 3.12c com a Figura 3.12b, a produção de metano começa a cair com o correspondente aumento de CO_2 quando a relação (AV/AT) na Figura 3.12b atinge cerca de 0,5.

4 - Estabilidade do pH.

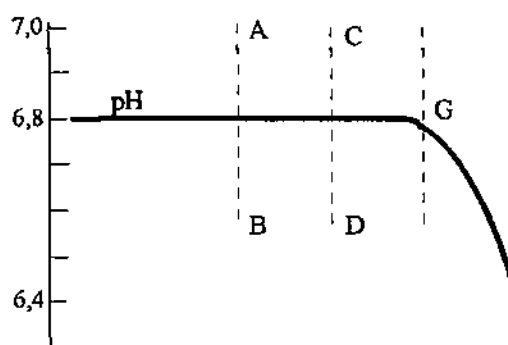


Figura 3.12d

A Figura 3.12d mostra o decaimento do pH a partir do ponto G, exatamente onde o digestor em estudo apresenta sinais de instabilidade no processo.

Torna-se conveniente frisar que as variações de alcalinidade no digestor se originam basicamente de dois processos: (a) amonificação (mineralização do nitrogênio orgânico) e, (b) remoção de AGV. A reação de amonificação resulta da conversão de 1 mol TKN (14gN) em 1 equivalente de alcalinidade (50g CaCO₃), sendo esta uma reação de hidrólise. Uma segunda fonte de alcalinidade no digestor é o consumo de ácidos graxos voláteis (AGV), cuja redução da sua concentração resultará em idêntico aumento da alcalinidade. O equilíbrio desses parâmetros formam a base da estabilidade do processo, possibilitando uma boa estabilização do lodo através da redução substancial de material orgânico biodegradável, que supostamente entraria em decomposição (odor putrescível) quando incorporados ao solo (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994; VAN HAANDEL, 1993).

Segundo a EPA quando AV/AT > 0,35 deve-se adotar algumas mudanças na rotina operacional do sistema para reduzir a produção de ácidos. Os requisitos básicos recomendados para execução dessa tarefa são: (1) aumentar o tempo de mistura no conteúdo do digestor, (2) adicionar alcalinizante externo e/ou, (3) cancelar temporariamente a alimentação até se estabelecer um pH ótimo.

3.11 - Estabilização do Lodo.

A estabilização do lodo é geralmente associada à putrescibilidade, ou à tendência da matéria orgânica a biodegradar, conduzindo à produção de odor (LOTITO *et al.*, 1991 apud NOBUYOSHI IDE *et al.*, 1993). Em geral, a literatura informa que o lodo constitui uma mistura complexa de sólidos de origem biológica e mineral, resultante de algum processo de tratamento. O constituinte principal em todos os tipos de lodo é a água (mais de 50%). Outras substâncias podem estar eventualmente presentes, como: compostos orgânicos carbonáceos (dissolvidos e suspensos), orgânicos tóxicos perigosos, metais pesados, patógenos, nutrientes (N, P e K) e traços de micronutrientes (NOBUYOSHI IDE *et al.*, 1993).

Há diversos processos de tratamento do lodo para efetuar a separação das fases sólida e líquida. Alguns métodos de tratamento e disposição final do lodo são apresentados esquematicamente na Figura 3.13.

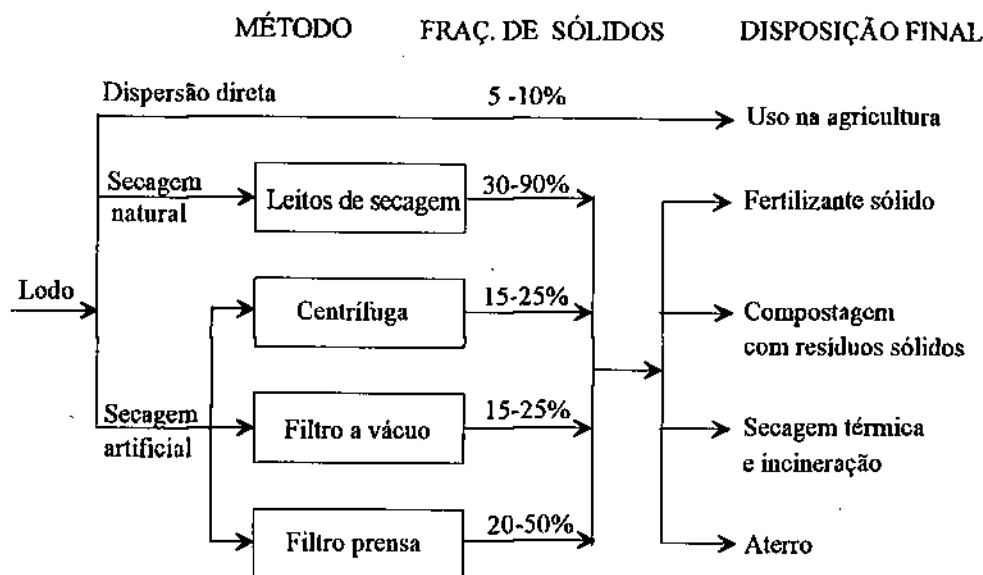


Figura 3.13 - Tratamento de lodo

Fonte: VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994

Segundo VAN HAANDEL & LETTINGA (1994), os sólidos estabilizados via digestor anaeróbio podem ser utilizados como fertilizantes na agricultura, ou podem ter outro destino final (aterro, incineração, etc). De acordo com os dados registrados na literatura especializada, a fermentação metanogênica aumenta o conteúdo de amônia em mais de 120%, enquanto que a quantidade de fósforo no efluente atinge facilmente valores acima de 150%, devido às reações de amonificação e hidrólise durante o processo de digestão. Esse aumento do nível de nutrientes, notadamente nitrogênio (N) e fósforo (P), transforma o resíduo da digestão em fonte de energia vegetal (BEZERRA, 1986).

O lodo estabilizado via mecanismo anaeróbio, após a secagem sob ação da radiação solar, através de leitos de secagem, pode ser utilizado como adubo orgânico (biofertilizante), apresentando as seguintes vantagens: (1) retenção da umidade do solo, o que favorece o crescimento dos vegetais; (2) tornam os nutrientes mais facilmente

assimiláveis pelos vegetais, acelerando o crescimento destes; (3) quando incorporado ao solo este adubo facilita a penetração de ar nas raízes das plantas, estimulando a oxidação da matéria orgânica, fonte indispensável de nutrientes para os vegetais; (4) considerável redução do odor putrescível do lodo e; (5) excelente qualidade sanitária, atribuída à remoção de patógenos devido ao tempo prolongado de exposição ao sol (BEZERRA, 1986 e VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994).

A literatura pertinente ao assunto faz referências ao uso do biofertilizante na agricultura da China. Os estudos desenvolvidos naquele país atestam um aumento da produtividade agrícola, tendo-se registrado os seguintes resultados, como mostra o Quadro 3.1 abaixo:

QUADRO 3.1 - Aumento da produtividade agrícola com o uso do biofertilizante.

PRODUTO	AUMENTO DA PRODUTIVIDADE
Algodão	24,8%
Trigo	12,5%
Arroz	10,0%
Milho	28,0%

Nota: Matéria prima utilizada nos digestores = dejetos animais, resíduos vegetais e lixo.

Fonte: BEZERRA, 1986.

Para avaliar a eficiência dos leitos de secagem, VAN HAANDEL & LETTINGA (1994) utilizaram experimentos com lodo anaeróbio doméstico, proveniente de um digestor anaeróbio de fluxo ascendente (DAFA) em Campina Grande-PB, verificando que existe uma carga de sólidos ótima que resulta na taxa máxima de lodo seco no leito, cuja produtividade é influenciada pela fração de sólidos que se deseja no lodo após a secagem. Concluíram, também, que parte da água do lodo classificada como livre era removida durante um período relativamente curto de percolação. Entretanto, para uma carga de sólidos elevada era necessário um período relativamente longo de evaporação. Esses estudos apresentam subsídios que viabilizam a utilização de leitos de secagem

otimizados que, adequadamente projetados e operados, deve ser capazes de: (1) reduzir significativamente os patógenos; (2) suportar a quantidade de lodo produzido; (3) eliminar a emissão de odores putrescíveis e (4) produzir lodos mais estáveis, mais ricos em nutrientes e com qualidade compatível com a segurança sanitária.

NOBUYOSHI IDE *et al.* (1993), com base nos estudos de LOTITO *et al.* (1983), informam que a estabilização de lodos com produtos químicos apresentam algumas vantagens sobre os métodos convencionais em termos de custos de investimento, simplicidade operacional, e efeito imediato. Porém, as desvantagens incluem altos custos de operação, necessidade de um controle cuidadoso na adição do produto químico e um efeito estabilizante temporário para manter uma estabilidade do pH próximo ao nível desejado (no caso da cal, $\text{pH} = 12$). Isso porque o processo padrão de estabilização do lodo com cal preconizada pela EPA, estima um tempo de estabilização de apenas 2 (duas) horas, segundo o qual o produto adicionado tem realmente efeito estabilizante para manter um $\text{pH} = 12$.

MARTINS & SANCHEZ (1983):

*"...em seus experimentos com lodo de esgoto da ERQ de Vila Leopoldina-SP, desenvolvido na SABESP, verificaram que no tratamento químico, sempre que o $\text{pH} = 12$ (ou superior) foi mantido, ocorreu uma redução significativa da carga de microrganismos indicadores, bem como foram detectados remoção de alguns patógenos, porém não foi completamente eficiente na inativação de ovos de helmintos..." (MARTINS & SANCHEZ, 1983 apud NOBUYOSHI IDE *et al.*, 1993).*

Evidentemente existem muitos outros processos disponíveis para estabilização do lodo. Naturalmente, não há um processo universalmente aceito, que seja ideal para a maioria das situações. A disponibilidade de recursos, simplicidade operacional e o tempo necessário para estabilização, são fatores que acabam limitando a escolha do tratamento, dependendo do uso para o qual o lodo estabilizado se destina.

CAPÍTULO 4

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 - Digestor Anaeróbio em Escala Piloto.

4.1.1 - Descrição e Funcionamento do Digestor.

O digestor anaeróbio em escala piloto foi construído com o objetivo de investigar, dentre outros parâmetros, a estabilização do lodo de excesso da CETREL e a produção de biogás, utilizando-se como inóculo o lodo proveniente dos espessadores. A Figura 4.1 mostra um diagrama esquemático da planta piloto composta das seguintes unidades:

- ♦ bomba de alimentação (BA) do digestor, com potência de 1/3 HP;
- ♦ tanque de armazenamento de lodo (TAL) com capacidade para 1000L, utilizado para armazenar a batelada de lodo a ser digerido;
- ♦ bomba de recirculação de lodo (BR) com potência de 1/3 HP, podendo haver recirculação ascendente ou descendente, dependendo da manipulação dos registros de comando;
- ♦ digestor convencional com volume útil de 8m³ construído em fibra de vidro;
- ♦ decantador de lodo digerido com volume útil de 8m³ acoplado ao digestor;

- ♦ medidor de gás;
- ♦ tubulação de PVC (2") com registros necessários.

A Tabela 4.1 apresenta as principais características físicas das unidades que constituem o sistema experimental em escala piloto.

TABELA 4.1 - Parâmetros de projeto e características das instalações do digestor anaeróbio em escala piloto da CETREL.

PARÂMETRO	CARACTERÍSTICA
1.0 - Digestor:	
1.1 - Altura útil (m)	3,00
1.2 - Altura total (m)	3,77
1.3 - Diâmetro (m)	2,40
1.4 - P ₁ , coleta do LD (m)	1,95
1.5 - Saída do efluente digerido (m)	3,37
1.6 - Volume útil (m ³)	8,00
1.7 - Área (m ²)	4,52
1.8 - Forma	Cônica
1.9 - Material	Fibra de vidro
2.0 - Decantador:	
2.1 - Altura útil (m)	2,20
2.2 - Altura total (m)	3,05
2.3 - Diâmetro (m)	2,20
2.4 - Saída do efluente decantado (m)	2,20
2.5 - Volume útil (m ³)	8,00
2.6 - Forma	Cúpula c/ abertura superior
2.7 - Material	Fibra de vidro
2.8 - Área (m ²)	3,80
3.0 - Instalações:	
3.1 - Conjunto motor bomba Jacuzzi	1/3 HP, 3,5 L/s
3.2 - Tubo rígido roscável	φ 2", PVC
3.3 - Acessórios	Bronze, PVC

O sistema em escala piloto implantado na CETREL, possui quatro pontos para coleta de lodo: P_1 , P_2 , P_3 e P_4 , conforme ilustra a Figura 4.1. O ponto denominado P_1 , situado a 1,95m de altura do digestor foi destinado à coleta de lodo digerido (LD), enquanto que P_2 e P_3 foram definidos como pontos de amostragem do lodo afluente e lodo efluente do digestor, respectivamente. O ponto P_4 , localizado na base do decantador, destinava-se exclusivamente à coleta eventual de amostras de lodo digerido decantado (LDD).

O conjunto das tubulações de PVC e acessórios disponíveis no sistema (Figura 4.1), formam as linhas de condução do lodo, destacando-se: alimentação e recirculação. Essas duas principais linhas permitem um fluxo de lodo ascendente e descendente no digestor, dependendo da manipulação dos registros. Eventualmente a bomba de recirculação pode recalcar lodo digerido para a caixa de alimentação. A Tabela 4.2 mostra o controle operacional dos registros de comando para funcionamento das unidades do sistema experimental.

TABELA 4.2 - Sequência operacional no sistema anaeróbio em escala piloto da CETREL.

FASE DE FUNCIONAMENTO	RG 1	RG 2	RG 3	RG 4	RG 5	VB 1	RG 6	RG 7	RG 8	OBSERVAÇÃO
Alimentação Ascendente	A	F	A	A	F/A	A	F	F	A	Bomba de recirculação desligada
Recirculação Ascendente	F	F	F	A	A	A	A	F	F/A	Bomba de recirculação ligada
Recirculação Descendente	F	A	A	F	A	F	A	F	F/A	Bomba de recirculação ligada
Recirculação de LDD para caixa de alimentação	A	F	A	F	A	F	F	A	F	Bomba de recirculação ligada
Recirculação de LD para caixa de alimentação	A	F	A	F	A	F	A	F	F/A	Bomba de recirculação ligada
Recirculação de LDD para o digestor	F/A	F/A	F	A	A	A	F	A	F	Bomba de recirculação ligada

Legenda: A = Aberto; F = Fechado; F/A = Fechado ou Aberto;
RG = Registro de Gaveta; VB = Válvula de Bloqueio (tipo esfera).

O digestor dispunha de uma câmara de armazenamento de gás, com capacidade de $1,36\text{m}^3$, entre a tampa e a cota de saída do efluente (Figura 4.1). O volume de biogás produzido durante o processo de digestão, era medido num instrumento mecânico de medição (gasômetro), fabricado pela LAO LTDA (Tipo MG2, $Q_{\text{máx.}} = 2\text{m}^3/\text{h}$ e $Q_{\text{mín.}} = 0,02\text{m}^3/\text{h}$), ligado através de uma mangueira plástica à câmara de gás e instalado a $1,75\text{m}$ de altura do digestor. O volume diário de biogás era dado pela diferença entre a leitura atual, anotada no momento da coleta do lodo digerido, e a leitura anterior feita no mesmo horário (8h), e antes da adição da batelada de lodo.

A operação do sistema se iniciava com o bombeamento do lodo fresco da caixa de distribuição de vazão (CDV) para a caixa de alimentação (tanque de 1000L). Da caixa de alimentação o lodo descia por gravidade para a câmara de digestão (digestor). O fluxo ascendente de lodo exercia uma pressão sobre as camadas posteriores, forçando o transbordamento do sobrenadante numa quantidade igual ao volume de lodo introduzido.

Ao ser concluída a alimentação, acionava-se de imediato a bomba de recirculação para misturar todo o conteúdo do digestor, durante um período de uma hora. Procurou-se avaliar durante esse período qual dos dois fluxos de recirculação (ascendente e descendente) promovia uma melhor mistura do conteúdo do digestor. Após um mês de operação com recirculação com fluxo alternado, constatou-se que o fluxo de lodo ascendente possibilitava uma mistura mais homogênea, ao passo que a recirculação descendente facilitava o surgimento de zonas mortas dentro do digestor. Dessa forma, optou-se pela recirculação ascendente (LR-①) aumentando-se gradativamente o tempo de recirculação ou mistura para 2, 4 e 8 horas diárias.

4.1.2 - Alimentação do Digestor.

A alimentação do digestor anaeróbio em escala piloto era feita diariamente com bateladas de lodo fresco proveniente dos espessadores. A vazão afluente aduzida foi fixada inicialmente em $200\text{L}\cdot\text{d}^{-1}$ para não sobrecarregar o digestor, pois ainda não se dispunha de uma população bacteriana adequada para manter o equilíbrio entre a

fermentação ácida e a metanogênica. Com o crescimento gradativo da biomassa, a produção de ácidos graxos voláteis (AGV) era contrabalanceada com a alcalinidade gerada no próprio digestor, provavelmente devido às reações de amonificação, o que permitiu o aumento gradativo do volume diário aplicado para 400, 600 e 800 litros.

A Tabela 4.3 apresenta o tempo de permanência, taxa de carregamento hidráulico e a carga orgânica volumétrica aplicados no experimento. Esses dados envolvem as fases de partida do digestor, aclimatação e regime estacionário.

TABELA 4.3 - Características operacionais do experimento.

PERÍODO	VAZÃO AFLUENTE (Q_a , L . d ⁻¹)	TEMPO DE PERMANÊNCIA (T_p , d)	TAXA DE CARREGAMENTO HIDRÁULICO (TCH, m ³ .d ⁻¹ .m ⁻³)	CARGA ORGÂNICA VOLUMÉTRICA (COV, kgDQO.m ⁻³ .d ⁻¹)	CARGA ORGÂNICA APLICADA (F_a , g DQO.d ⁻¹)
20/03 - 31/03	200	40,0	0,025	$1,09 \times 10^{-2}$	86,8
03/04 - 24/04	400	20,0	0,050	$2,17 \times 10^{-2}$	173,6
27/04 - 15/05	600	13,3	0,075	$3,25 \times 10^{-2}$	260,4
16/05 - 26/10	800	10,0	0,100	$4,34 \times 10^{-2}$	347,2

Nota: $T_p = V_r \cdot Q_a^{-1}$
 $TCH = Q_a \cdot V_r^{-1}$
 $COV = Q_a \cdot S_o \cdot V_r^{-1} \cdot 10^{-3}$
 $F_a = Q_a \cdot S_o \cdot 10^{-3}$

Onde: COV - taxa volumétrica de carregamento orgânico, kgDQO.m⁻³.d⁻¹.
 Q_a - vazão de alimentação, L . d⁻¹
 V_r - volume do digestor, L
 S_o - concentração de DQO do afluente, mg . L⁻¹.

4.1.3 - Recirculação do Lodo (mistura) no Digestor.

O método adotado no sistema piloto para promover a mistura do conteúdo do digestor foi a recirculação do lodo por bombeamento. Duas linhas de recirculação eram disponíveis: uma ascendente (LR-⊙) e outra descendente (LR-⊗). O jato de lodo recirculado ($\cong 3,5$ L/s) imprimia uma energia de mistura teoricamente satisfatória, uma vez que a bomba de 1/3 HP introduz uma potência de aproximadamente 250W, com uma dissipação de energia teórica de $250/8 = 31\text{W/m}^3$ dentro do digestor. Essa dissipação seria

suficiente para proporcionar uma distribuição uniforme do substrato (mistura completa) melhorando o contato do material orgânico com a biomassa ativa.

4.1.4 - Partida do Digestor.

Iniciou-se a partida do digestor em escala piloto sem inóculo. Esse procedimento tinha como objetivo avaliar se a operação de um digestor em escala real seria adequada, usando-se tão somente lodo de excesso da CETREL como substrato.

Com o digestor inicialmente cheio de água foram introduzidas bateladas de lodo fresco com uma vazão afluyente variável. A cada batelada de lodo uma quantidade de água correspondente à vazão de alimentação extravasava para o decantador. Dessa forma, a massa de lodo ia crescendo gradativamente, na medida em que novas bateladas eram introduzidas no digestor. Quando havia sinais de sobrecarga, detectados pelas análises rotineiras de alcalinidade, ácidos voláteis e pH, adiava-se a adição de novas bateladas até que se estabelecesse uma condição de operação favorável ao processo de digestão, estabelecida com o pH próximo ao ponto neutro. Na fase inicial da operação, o aspecto mais importante e que inspirava cuidados era o controle do equilíbrio entre as fases da acidogênese e metanogênese, pois o aumento excessivo dos ácidos graxos voláteis (AGV) levaria à preponderância da fermentação ácida sobre a fermentação metanogênica, tendo-se como resultado o “azedamento” do conteúdo do digestor.

Levando-se em consideração que o lodo de excesso da CETREL é constituído de uma série de substâncias, muitas delas indesejáveis ao metabolismo bacteriano, ainda assim os resultados iniciais da operação demonstraram uma rápida aclimatação do processo, haja visto que a adição de alcalinizante externo (cal) só foi necessária apenas em situações esporádicas, quando havia presença de elementos inibidores no lodo a ser digerido.

Após a partida, o digestor foi mantido em operação com a vazão afluyente aduzida de $200\text{L}\cdot\text{d}^{-1}$ e uma carga orgânica aplicada de $86,8\text{gDQO}\cdot\text{d}^{-1}$. Depois de sucessivas bateladas ($Q_a = 200\text{L}\cdot\text{d}^{-1}$) ao longo dos quatro primeiros meses de operação, constatou-se

sinais de adaptação no sistema (decréscimo da razão AV/AT), sendo o digestor submetido a aumentos progressivos da carga orgânica afluyente para 173,6; 260,4 e 347,2gDQO.d⁻¹. (Tabela 4.3).

O período inicial da operação foi denominado de “estabilização do digestor”, caracterizado pela presença de uma massa de lodo mínima necessária ao processo de digestão. Já o período final (últimos seis meses) foi definido como “operação do sistema a cargas variáveis” até se chegar a uma carga orgânica aduzida máxima de 347,2gDQO.d⁻¹.

Durante o período de estabilização do digestor, uma vez que o crescimento do lodo metanogênico era bastante lento (em torno de 3% ao dia), dois procedimentos práticos poderiam ser utilizados para acelerar o desenvolvimento de uma população bacteriana mais volumosa e ativa durante a partida do digestor: (1) adicionar continuamente alcalinizante externo (por exemplo: cal) para assegurar as condições ideais necessárias ao processo de fermentação metanogênica e, (2) aumentar gradativamente a vazão de alimentação para reduzir o tempo de permanência, o que possibilitaria um acúmulo substancial de lodo ativo no digestor (VAN HAANDEL, 1995). Em função da boa característica do lodo afluyente (Tabela 4.4), optou-se pelo segundo procedimento, já que a alimentação do digestor somente com o lodo espessado é bem mais atrativa sob o ponto de vista econômico e operacional.

TABELA 4.4 - Características médias do lodo afluyente do sistema de digestão anaeróbia em escala piloto da CETREL.

Continua

PARÂMETRO	VALOR
pH	7,16
Alcalinidade Total (AT)	450mg/L CaCO ₃
Alcalinidade de Bicarbonato (AB)	377mg/L CaCO ₃
Ácidos Voláteis (AV)	105mg/L
DQO, fase líquida	434mg/L
Sólidos Suspensos Totais (SST)	30,82g/L
Sólidos Suspensos Voláteis (SSV)	21,28g/L
Sólidos Suspensos Fixos (SSF)	9,54g/L

TABELA 4.4 - Características médias do lodo afluente do sistema de digestão anaeróbia em escala piloto da CETREL.

Conclusão	
PARÂMETRO	VALOR
Concentração de amônia (N-NH ₃)	46mg/L
Concentração de fosfato (PO ₄ ⁻³)	18mg/L
Concentração de fósforo (P)	6mg/L

4.1.5 - Operação do Sistema Experimental.

A rotina operacional posta em prática no presente trabalho iniciava-se com a coleta do lodo digerido (ponto P₁) às 8h da manhã para análise de pH, alcalinidade total (AT), concentração de ácidos voláteis (AV) e alcalinidade de bicarbonato (AB). Se os valores da concentração de ácidos voláteis, alcalinidade e pH estivessem na faixa adequada ($AV \leq 0,35AT$ e $6,9 \leq pH \leq 7,1$) adicionava-se uma nova batelada de lodo no digestor. Caso contrário, suspendia-se a alimentação e/ou adicionava-se eventualmente alcalinidade externa (cal) em quantidades compatíveis com a necessidade (1-2kg) para manter o pH desejado. Nesse caso, fazia-se o bombeamento do lodo do digestor para a caixa de alimentação e adicionava-se cal. Depois de homogeneizada, a mistura (lodo + alcalinizante) retornava por gravidade à câmara de digestão (digestor). Sem alimentação e com o pH na faixa ótima para a metanogênese, os ácidos eram consumidos garantindo a estabilidade do pH.

Durante a alimentação do digestor eram coletadas uma amostra do afluente (caixa de alimentação, P₂) e outra do efluente (saída do digestor, P₃) para análises de DQO, sólidos (SST, SSV e SSF) e eventualmente nutrientes (N-NH₃, PO₄⁻³ e P). Esses parâmetros informavam sobre a eficiência de digestão no sistema e a qualidade do substrato afluente.

A leitura da vazão de biogás era obtida diretamente no gasômetro instalado na unidade piloto. Ao longo do período de estudo, observou-se que o instrumento de

medição de gás disponível não permitia uma medida representativa e confiável de todo o biogás produzido no sistema. Essa constatação foi atribuída a 3 (três) fatores:

- (1) instrumento de medição inadequado, por ser este um dispositivo tipicamente mecânico, ou seja, só havia medição quando o gás conseguia imprimir uma força motriz capaz de girar o marcador (engrenagens). Como o biogás contém vapor d'água e eventualmente traços de gás sulfídrico (H_2S), ocorria constantemente o travamento das engrenagens devido ao efeito corrosivo desses elementos;
- (2) escapamento do biogás através da mangueira e/ou cúpula do digestor, esse último devido a fissuras existentes em decorrência da insolação (dilatação) e fadiga dos materiais, especialmente na parte superior (tampa) que tinha um movimento frequente de expansão e contração, quando da pressurização da câmara de digestão ao ser introduzida a batelada de lodo;
- (3) mistura incompleta (estratificação do lodo) em função de problemas operacionais com a bomba de recirculação (vazamento contínuo de lodo pela gaxeta do eixo da bomba), não sendo possível imprimir um fluxo de lodo suficiente para promover uma mistura completa no digestor (AZEVEDO NETTO, 1991). Dessa maneira, havia formação de uma camada de espuma prejudicando o desprendimento do gás da massa líquida.

Na tentativa de contornar tais inconvenientes, implantou-se no laboratório um teste de bancada utilizando-se 3 (três) digestores com tempo de permanência de 10; 13,3 e 16d respectivamente, objetivando-se, entre outras coisas, determinar a relação entre o tempo de permanência e a eficiência de remoção de sólidos em suspensão, influência da mistura do lodo digerido e, principalmente, a medição do biogás a partir de um gasômetro convencional acoplado a cada sistema experimental.

4.1.6 - Análises.

Os testes de laboratório visavam sobretudo obter informações sobre as condições ambientais existentes no digestor anaeróbio, uma vez que a eficiência da digestão depende da estabilidade de alguns parâmetros, como: pH, alcalinidade, ácidos graxos voláteis (AGV), substâncias inibidoras presentes, nutrientes, etc. Tais condições determinam o equilíbrio das populações bacterianas, não sendo permitidas variações bruscas nos fatores ambientais pois os microrganismos são bastante sensíveis, especialmente as metanogênicas que são a base do processo, responsável pela produção do biogás. As amostras eram coletadas em recipientes plásticos de 500mL às 8h e, então, levadas imediatamente para o Laboratório Central da CETREL onde eram feitas as análises químicas.

A coleta do afluente (lodo fresco) era feita na saída da tubulação (P_2) que alimentava o tanque de 1000L (caixa de alimentação). Já a coleta do lodo digerido era feita na parte inferior do digestor (P_1), através de um registro de comando. As amostras do efluente do digestor eram tomadas na tubulação de entrada do decantador (P_3), sendo a coleta feita a partir do instante em que se verificava o transbordamento do lodo (efluente) com a introdução gradativa da batelada de lodo fresco dentro do digestor. As frequências de coleta das amostras estão apresentadas na Tabela 4.5.

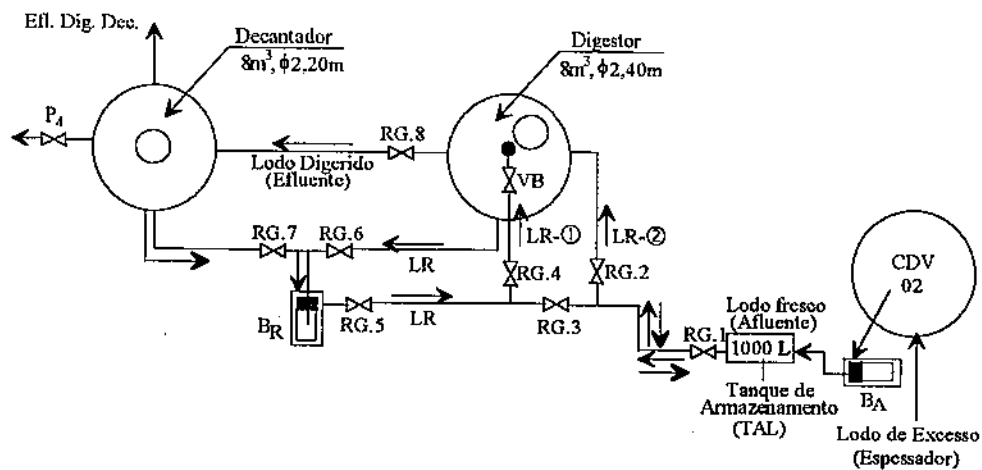
A condução das análises físico-químicas obedeceram aos critérios estabelecidos pelo "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th Edition 1992", com exceção para a determinação da alcalinidade total (AT), ácidos voláteis (AV) e alcalinidade de bicarbonato (AB) que seguiram o procedimento experimental indicado em "Tratamento Anaeróbio de Esgotos (Apêndice 5.2)" por VAN HAANDELL & LETTINGA (1994).

As análises cromatográficas para determinação do % CH_4 nas amostras de biogás foram realizadas pela COPENE (Companhia Petroquímica do Nordeste).

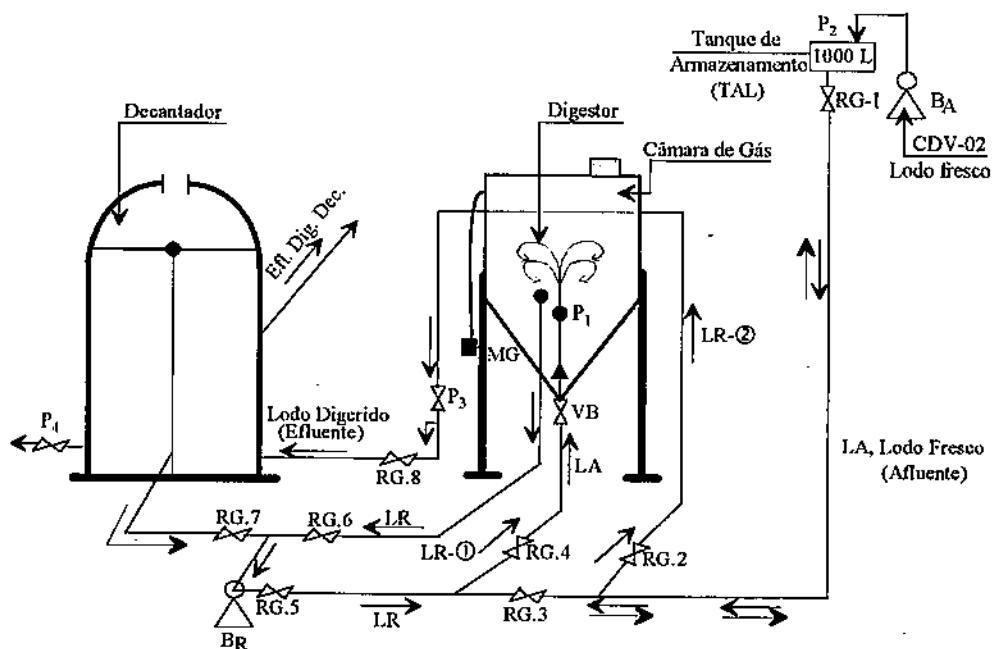
TABELA 4.5 - Análises físico-químicas, frequências e métodos.

PARÂMETRO	AFLUENTE	EFLUENTE	LODO DIGERIDO	MÉTODO
<u>Eficiência da Digestão:</u>				
• SST (mg/L)	2-3/S	2-3/S	-	gravimétrico
• SSV(mg/L)	2-3/S	2-3/S	-	gravimétrico
• SSF (mg/L)	2-3/S	2-3/S	-	gravimétrico
• DQO (mg/L)	1-2/S	1-2/S	-	refluxo fechado
• Biogás	-	-	D	leitura direta
<u>Estabilidade do pH:</u>				
• pH	E	E	D	potenciométrico
• AT (mg/L CaCO ₃)	E	E	D	titulométrico
• AV (mg/L)	E	E	D	titulométrico
• AB (mg/L CaCO ₃)	E	E	D	titulométrico
<u>Nutrientes:</u>				
• N-NH ₃ (mg/L)	E	E	-	titulométrico
• PO ₄ ⁻³ (mg/L)	E	E	-	colorimétrico
• PO (mg/L)	E	E	-	colorimétrico

D - Diária / S - Semanal / E - Eventual.



PLANTA BAIXA



ISOMÉTRICO

CONVENÇÃO:

- CDV - Caixa de Distribuição de Vazão
- TAL - Tanque de Armazenamento de Lodo
- BA - Bomba de Alimentação, 1/3 HP Jacuzzi
- LA - Linha de Alimentação, 2" - PVC
- LR - Linha de Recirculação ①, ascendente, 2" - PVC
- Linha de Recirculação ②, descendente, 2" - PVC
- VB - Válvula de Bloqueio (esfera), 2" - PVC
- MG - Medidor de Gás
- RG (1 a 8) - Registro de Gaveta (bronzc), 2"
- P₁, P₂, P₃ e P₄ - Pontos para coleta de lodo

Figura 4.1 - Representação esquemática da planta piloto para digestão do lodo de excesso da CETREL.

4.2 - Testes de Bancadas.

4.2.1 - Produção de Biogás.

A investigação experimental em escala de laboratório foi realizada operando-se simultaneamente 3 (três) digestores cilíndricos com diâmetro interno de 15cm e altura de 33cm, tendo cada digestor um volume efetivo de aproximadamente 5 (cinco) litros. A produção de biogás era medida com o auxílio de um gasômetro convencional acoplado a cada digestor. A Figura 4.2 é uma representação esquemática da montagem de um dos conjuntos utilizados no experimento.

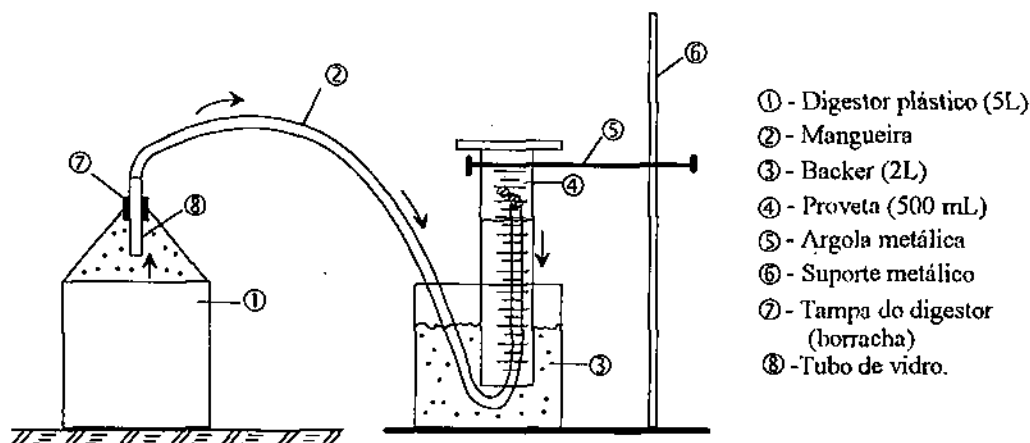


Figura 4.2 - Representação do conjunto utilizado no teste de bancada para medição de gás (Digestor + Gasômetro).

A operação dos digestores teve início com a inoculação de lodo anaeróbio proveniente do digestor em escala piloto sob investigação na CETREL. Em cada digestor foram inoculados 4L de lodo com uma atividade específica de 0,9g DQO/gSSV/d e 16gSSV, tendo-se, portanto, uma capacidade inicial de digestão de 14gDQO/d em todos os digestores.

A alimentação do conjunto era feita inicialmente com frequência diária, utilizando-se bateladas de lodo fresco proveniente dos espessadores. O procedimento operacional para alimentar cada digestor consistia simplesmente da retirada do lodo

digerido e introdução imediata do lodo fresco, sendo a quantidade adicionada exatamente igual àquela retirada inicialmente. Após um período de adaptação no qual optou-se pela alimentação diária com 400, 300 e 250mL, respectivamente, a rotina operacional passou a ter uma periodicidade de 2 (dois) dias consecutivos (ver Tabela 4.6), por ser esta frequência equivalente à descarga de lodo do sistema de lodos ativados da CETREL. Depois da adição de cada batelada de lodo afluente agitava-se (chacoalhava) todo o conteúdo do digestor durante 15 a 30s para assegurar uma mistura completa do lodo. Em seguida, adicionava-se a batelada de lodo fresco e conectava-se o digestor ao gasômetro através de uma mangueira plástica, permanecendo o sistema em repouso até a próxima alimentação.

TABELA 4.6 - Padrão de alimentação e rotina operacional dos digestores utilizados no teste de bancada.

NÚMERO DO DIGESTOR	VOLUME ADICIONADO A CADA DOIS DIAS (mL)	TEMPO DE PERMANÊNCIA (d)
1	800	10
2	600	13.3
3	500	16

O gasômetro convencional esboçado na Figura 4.2 era constituído basicamente de um becker com volume de 2L, uma proveta de 500mL e um suporte metálico para fixar e manter a proveta invertida com água, em posição vertical, imersa dentro do becker que continha um volume d'água de aproximadamente 1200mL. À medida em que o biogás ia sendo produzido no digestor, a pressão exercida pelo gás na proveta aumentava e havia um deslocamento da coluna d'água nela contida. O volume do líquido deslocado era igual ao volume do gás produzido. As leituras do deslocamento da coluna d'água na proveta eram feitas de hora em hora durante 4 a 6h.d⁻¹, obtendo-se uma média horária de produção de gás estimada a partir do instante da alimentação do digestor.

Os digestores eram alimentados com lodo de excesso sem adição de qualquer substância química destinada à correção do pH, por se julgar necessário verificar o comportamento da digestão frente aos possíveis elementos tóxicos presentes no lodo fresco afluente.

O acompanhamento operacional dos digestores era feito segundo uma avaliação apurada das condições ambientais existentes no interior de cada sistema anaeróbio, isoladamente. A alíquota de lodo digerido retirada de cada digestor era utilizada para as análises físico-químicas, tais como: pH, alcalinidade total e de bicarbonatos, concentração de ácidos voláteis e sólidos suspensos. A taxa de produção de biogás era obtida diretamente do gasômetro instalado nos digestores.

4.2.2 - Propriedades Mecânicas do Lodo.

Com o intuito de se avaliar as propriedades mecânicas do lodo digerido anaerobiamente, especificamente quanto à remoção da água do lodo para se obter um produto mais estabilizado, realizou-se uma investigação experimental na qual se determinou o tempo de percolação, evaporação e secagem do lodo estabilizado por via aeróbia na CETREL e do lodo estabilizado por via anaeróbia em escala piloto (objetivo deste estudo), objetivando-se apresentar um diagnóstico comparativo com relação à otimização do processo de secagem. Na investigação separou-se as fases de percolação e evaporação da água dos lodos, utilizando-se 2 (dois) leitos de secagem distintos. Foram utilizadas 3 (três) amostras nos testes: lodo aeróbio do digestor (LAE), lodo digerido anaerobiamente no digestor da planta piloto (LDG) e lodo digerido decantado proveniente do decantador (LDD).

4.2.2.1 - Percolação (LAE e LDG): Sistema Experimental e Procedimento.

O primeiro leito se constituía de 2 (dois) tonéis com capacidade de 250L cada, com área superficial do leito de $0,283\text{m}^2$ e altura de 88,5cm, contendo na parte inferior uma camada de 20cm de brita-25 e outra de areia fina, assentada sobre a primeira camada. A drenagem do sistema era feita através de um tubo PVC $\phi \frac{1}{2}$ ", colocado a 10cm do fundo de cada tonel, onde se coletava toda a água percolada do lodo. (Figura 4.3).

Antes do teste de percolação tomava-se uma alíquota dos lodos em estudo (aeróbio e anaeróbio) para análise da concentração inicial de sólidos, a fim de se determinar qual a carga de sólidos aplicada em cada leito de secagem. Os resultados obtidos apresentaram uma concentração de sólidos nos lodos, antes da percolação, na faixa de 20 a 40kg/m³. Como a altura da camada de lodo permitida em cada tonel era de 43,5cm, a carga máxima de sólidos aplicada no teste seria de $40 \times 0,435 = 17,4\text{kg/m}^2$.

A investigação do tempo de percolação da água do lodo teve início com a introdução nos tonéis de 2 (duas) bateladas com volumes iguais de 123L de lodo e massas de sólidos aplicados diferenciados, contendo o lodo aeróbio uma carga aplicada de 11kg/m² e o lodo anaeróbio uma carga de 17kg/m². Para evitar a interferência da evaporação na massa de lodo, colocou-se sobre o sistema uma tampa de vidro para assegurar que a remoção da água do lodo fosse tão somente dirigida pelo processo de percolação da água no leito filtrante. Sob a ação da gravidade a água do lodo percorria os canais existentes no leito filtrante e se acumulava na parte inferior do tonel, sendo esta eliminada gradativamente do sistema através do tubo drenante. Desse modo, ficou estabelecido que o término do teste seria dado quando a quantidade de água percolada no tubo drenante fosse igual a contagem de 10 gotas/min.

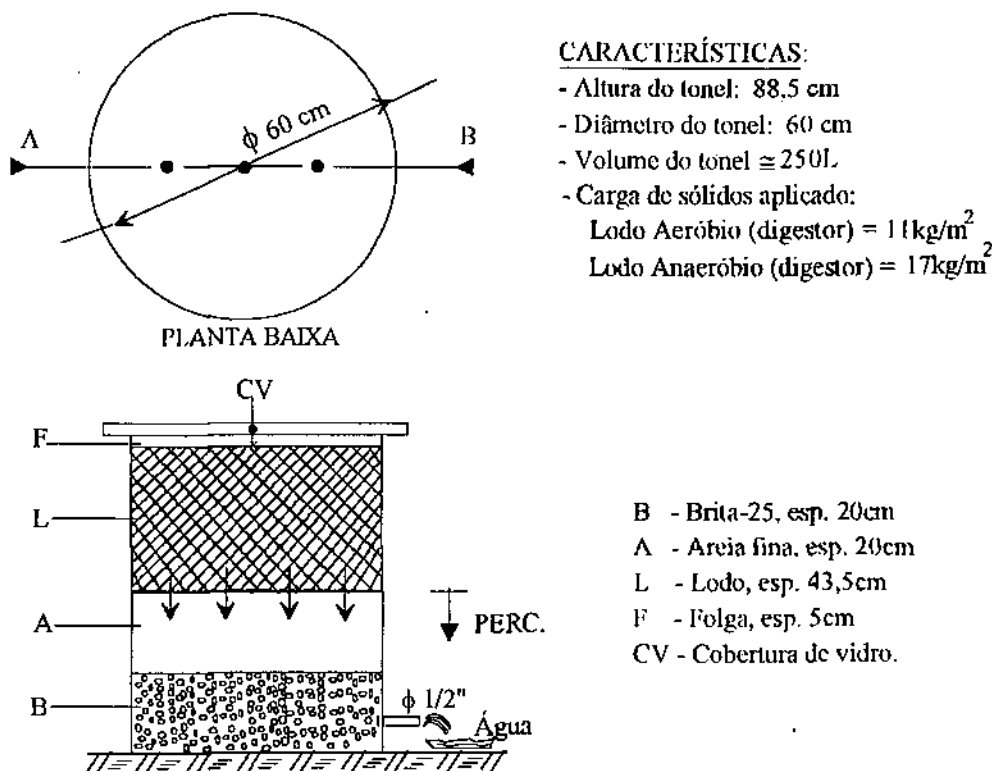


Figura 4.3 - Representação esquemática do dispositivo usado no teste de percolação da água do lodo.

4.2.2.2 - Evaporação e Secagem (LAE e LDG): Sistema Experimental e Procedimento.

O sistema experimental utilizado no teste de evaporação e secagem era constituído de 10 (dez) tubos de PVC cilíndricos com diâmetro interno de 50mm e área superficial de 19,6cm², totalmente fechados numa das extremidades. Os tubos de PVC eram compostos de um ou mais anéis, conectados um ao outro com o auxílio de uma fita adesiva, para facilitar a remoção destes quando necessário. A altura de cada tubo cilíndrico variava entre 5,0cm a 32,5cm, tendo-se anéis de aproximadamente 2,5cm. A Figura 4.4 apresenta um esquema dos tubos utilizados no teste de evaporação e secagem do lodo.

Depois do teste de percolação, uma alíquota do lodo retido sobre o leito filtrante foi utilizada para investigar separadamente a fase de evaporação. Para tanto era necessário obter a nova concentração de sólidos após a percolação devido à remoção de parte da água do lodo. Essa providência era de suma importância, visto que o peso dos sólidos, a carga aplicada e a umidade inicial do lodo em cada tubo, representava, a contento, uma variedade de condições que eram objeto de investigação. E, de fato, o que se procurou estabelecer foi uma relação entre a produtividade do leito em função da carga de sólidos nele aplicado, a fim de se obter um grau de estabilização desejado (redução da fração de sólidos biodegradáveis) a partir da secagem do lodo como resultado da evaporação.

Com os tubos devidamente testados quanto à sua estanqueidade, foram colocadas bateladas de lodo percolado em 2 (dois) conjuntos: um para lodo aeróbio e outro para lodo anaeróbio. Cada conjunto era composto de 5 (cinco) tubos cilíndricos com as características indicadas na Tabela 4.7.

TABELA 4.7 - Caracterização dos tubos cilíndricos usados no teste de evaporação dos lodos digeridos via mecanismo aeróbio e anaeróbio.

TUBO	CARACT.	DIÂMETRO ϕ (mm)	ÁREA A (cm ²)	Nº ANÉIS	ALTURA ANEL (cm)	ALTURA TOTAL (cm)	PESO DO TUBO (g)			VOLUME (cm ³)
							○	△	□	
①	△, □	50	19,6	2	2,5	5,0	67,6	69,1	67,1	78,4
②	△, □	50	19,6	2	2,5	5,0	88,8	90,3	90,4	98,0
③	△, □	50	19,6	5	2,5	12,5	167,8	170,0	173,1	254,8
④	△, □	50	19,6	7	2,5	17,5	232,7	240,1	226,8	352,8
⑤	△, □	50	19,6	10	2,5	25,0	324,8	279,8	319,4	490,0
⑥	△, □	50	19,6	13	2,5	32,5	366,2	361,6	390,1	637,0

Convenção: ○ = Lodo aeróbio (digestor), LAE
 △ = Lodo anaeróbio (digestor), LDG
 □ = Lodo anaeróbio (decantador), LDD
 ①, △, □ = Água da torneira

No enchimento dos tubos teve-se o cuidado de se deixar aproximadamente uns 2cm de folga na boca de cada recipiente para evitar perdas de sólidos, quando da expulsão (inchamento) da massa de lodo, possivelmente ocasionada pela formação de biogás. Nos dias subsequentes o nível do lodo descia gradativamente, na medida que a água do lodo evaporava. Quando o nível do lodo atingia o nível do anel imediatamente inferior, removia-se a fita adesiva a sua volta e o anel era retirado. Desse modo assegurava-se que a superfície do lodo nunca ficava mais que 2,5cm abaixo do nível superior do tubo. Essa providência operacional assegurava que a evaporação não era afetada pela profundidade do lodo no tubo, assemelhando-se às condições reais de um leito de secagem.

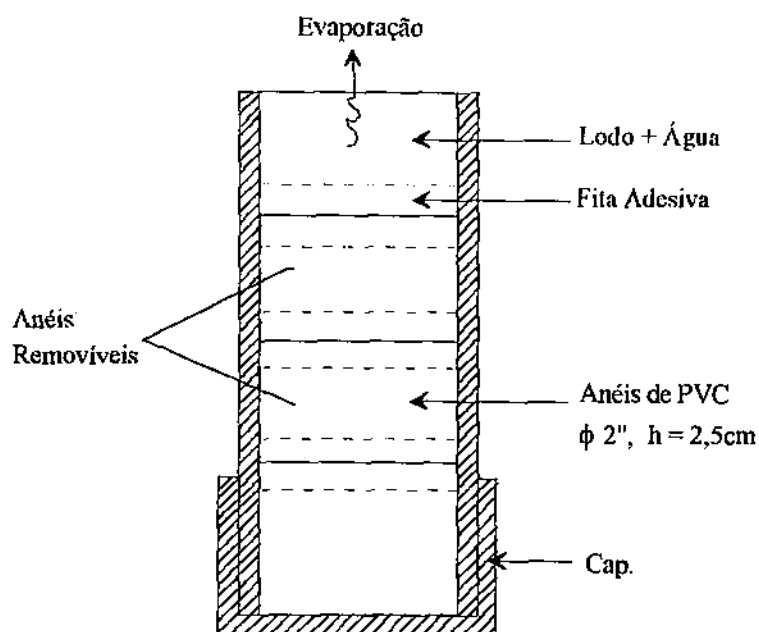


Figura 4.4 - Representação dos tubos cilíndricos utilizado no teste de evaporação e secagem do lodo.

Os recipientes cilíndricos tinham alturas variando entre 5,0cm e 32,5cm. A massa de sólidos aplicada em cada tubo variou de 9,1 a 64,1kg/m² para o lodo percolado aeróbio e 3,7 a 26,4kg/m² para o lodo percolado anaeróbio (ver Tabela 4.8). Para avaliar a remoção da água do lodo através do fenômeno da evaporação, colocou-se os tubos ao ar livre, protegidos por uma cobertura de vidro assente sobre uma estrutura metálica, colocada a uns 50cm dos tubos, para permitir a passagem da energia solar e ventilação lateral sobre os recipientes e impedir a interferência da chuva. A rotina operacional do teste constava exclusivamente da pesagem dos tubos com lodo até que se estabelecesse um peso constante. Simultaneamente, determinou-se, também, a taxa de evaporação da água nas mesmas condições adotadas para as amostras de lodo. No final do teste, determinou-se o peso dos sólidos secos contido nos tubos após um período de 48hs numa estufa a 103 - 105°C.

A Tabela 4.8 mostra os parâmetros que caracterizam os lodos em estudo antes da evaporação.

TABELA 4.8 - Caracterização do lodo percolado antes da secagem ao ar livre (LAE e LDG).

PARÂMETRO	NÚMERO DO TUBO				
	①	②	③	④	⑤
1. Massa de Lodo (g)	102,6	241,2	341,8	489,0	724,4
2. Massa de Sólidos (g)	17,8	41,8	59,3	84,8	125,6
3. Umidade Inicial (%)	82,7	82,7	82,7	82,7	82,7
4. Carga Aplicada (kg/m ²)	9,1	21,3	30,3	43,3	64,1
	△	△	△	△	△
1. Massa de Lodo (g)	99,6	248,5	345,3	538,5	708,4
2. Massa de Sólidos (g)	7,3	18,2	25,3	39,5	51,9
3. Umidade Inicial (%)	92,7	92,7	92,7	92,7	92,7
4. Carga Aplicada (kg/m ²)	3,7	9,3	12,9	20,2	26,5

Convenção: ○ = Lodo aeróbio (digestor)

△ = Lodo anaeróbio (digestor)

4.2.2.3 - Percolação, Evaporação e Secagem (LDD).

Na tentativa de se melhorar os resultados experimentais relativos à secagem dos lodos em estudo, associando-se às diferentes cargas de sólidos aplicados nos tubos cilíndricos, optou-se por um novo teste de evaporação e secagem, desta feita utilizando-se uma amostra de lodo anaeróbio mais compacto, ou seja, com uma massa de sólidos maior que a do lodo do digestor, objetivando-se aproximar a carga aplicada em cada tubo àquela obtida previamente no lodo aeróbio (digestor). Desse modo, tomou-se uma alíquota de lodo anaeróbio proveniente do decantador acoplado ao sistema em escala piloto por se julgar ideal, dado a sua grande massa de sólidos resultante do processo de decantação. E, de fato, a massa de sólidos após a percolação em cada tubo variou de 7,2 a 46,7kg/m² (ver Tabela 4.9), o que representa um resultado representativo, haja visto que esses valores se encontram inseridos na faixa intermediária do experimento, substancialmente conveniente para se comparar com os resultados do lodo aeróbio.

O teste de percolação, evaporação e secagem para amostras do lodo anaeróbio decantado seguiu o mesmo procedimento descrito anteriormente para os demais lodos.

A carga de sólidos aplicada antes da percolação era de 24kg/m². Depois do teste de percolação a massa de sólido percolado era introduzida nos tubos cilíndricos, cujas características estão apresentadas na Tabela 4.7.

Os parâmetros iniciais do teste de evaporação denotam as características do lodo após a percolação da água. A Tabela 4.9 mostra esses parâmetros, cujos valores são o ponto de partida para a realização do experimento.

TABELA 4.9 - Caracterização do lodo percolado antes da secagem ao ar livre (LDD).

PARÂMETRO	NÚMERO DO TUBO				
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
1. (P _l) Massa de Lodo (g)	105,6	257,4	366,2	476,7	679,4
2. (P _s) Massa de Sólidos (g)	14,2	34,7	49,3	64,2	91,5
3. (H _a) Umidade Inicial (%)	86,5	86,5	86,5	86,5	86,5
4. (C _s) Carga Aplicada (kg/m ²)	7,2	17,7	25,2	32,8	46,7

Convenção: □ = Lodo anaeróbio (decantador)

Nota: $H_a = 1 - P_s / P_l$ ou $H_a = 100 - \% ST$
 $C_s = \frac{\text{massa sólidos}}{\text{área do tubo}} = P_s / 19,6 \text{ cm}^2$
 $= \frac{P_s / 1000 \text{ (kg)}}{1,96 \times 10^{-2} \text{ (m}^2\text{)}}$

CAPÍTULO 5

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 - Digestor Anaeróbio em Escala Piloto da CETREL.

5.1.1 - Estabilidade do pH.

Iniciou-se a partida do digestor piloto em 12/12/94, utilizando-se apenas lodo de excesso da CETREL como substrato.

Com o digestor totalmente cheio de água foram adicionadas sucessivas bateladas de lodo (vazão variável) na câmara de digestão. Esse procedimento inicial tinha como objetivo proporcionar o enchimento do digestor com uma massa de lodo ativo, a partir da expulsão da água armazenada na câmara de digestão para o decantador.

A Tabela 5.1 apresenta os resultados experimentais relativos ao valor do pH e da sua estabilidade [alcalinidade de bicarbonato (AB) e razão entre ácidos voláteis (AV) e alcalinidade total (AT), AV/AT], bem como a adição de alcalinidade externa (cal) e o tempo e a forma da recirculação do lodo (se efetuado pela linha ascendente (LR-①) ou descendente (LR-②)). Os valores obtidos do pH, alcalinidade total e de bicarbonato e ácidos voláteis estão plotados nas Figuras 5.1(a, b e c) respectivamente.

Nos primeiros 60 (sessenta) dias de operação o digestor apresentou uma média de alcalinidade total (AT) na ordem de 1342mgCaCO₃/L e uma concentração de

ácidos voláteis (AV) também de 1342mg/L, com uma razão AV/AT = 1,00 (Tabela 5.1). Ao longo desse período registrou-se uma baixa concentração de sólidos em suspensão no efluente, o que era um indicativo de que o digestor ainda não dispunha de uma camada de lodo satisfatória, dado ao crescimento lento do lodo metanogênico.

A razão AV/AT \cong 1,00 era um demonstrativo de que a produção de ácidos graxos voláteis (AGV) se igualava a alcalinidade gerada no próprio digestor. Essa razão excedia em muito o valor recomendado pela EPA (AV/AT \leq 0,35). Mas isso já era esperado, porque se iniciou a operação do sistema sem nenhum inóculo externo.

Para acelerar o desenvolvimento do lodo metanogênico e assegurar o pH do lodo digerido (LD) dentro da faixa adequada ($6,3 \leq \text{pH} \leq 7,8$), ou, ainda, próximo ao valor ótimo (7,0) optou-se pela adição temporária de uma substância alcalinizante (cal). Uma vez estabelecida uma população metanogênica adequada não haveria mais necessidade de adição de alcalinizante. Isso porque a remoção de ácidos voláteis seria mais eficiente com o desenvolvimento de uma população metanogênica mais volumosa e ativa, o que resultaria numa boa capacidade de tamponação do sistema.

Completados 95 (noventa e cinco) dias de operação (19/03/95), o digestor apresentou valores médios de AV/AT = 0,83, pH = 7,00 e uma concentração de 2,0gSST/L (Tabelas 5.1 e 5.3) de sólidos suspensos totais (SST) no efluente. Com esses resultados preliminares, o digestor já apresentava os primeiros sinais de aclimação do processo de digestão.

A partir de 20/03/95 iniciou-se uma investigação, no sentido de avaliar o desempenho do digestor com o aumento progressivo da vazão afluyente, sob dois aspectos: primeiro, saber até quanto o digestor poderia assimilar o aumento progressivo da carga orgânica aplicada e, segundo, determinar a influência da redução do tempo de permanência na eficiência de remoção de sólidos voláteis.

Observa-se na Tabela 5.1 que para uma vazão afluyente de 200L.d⁻¹ (Tp = 40d), o pH manteve-se uniforme com um valor de 6,74 e AV/AT = 0,83 em média. Para Qa = 400L.d⁻¹ (Tp = 20d) registrou-se os valores médios de 6,88 e 0,65 para o pH e

AV/AT, respectivamente. Com o aumento da vazão afluyente para $Q_a = 600\text{L.d}^{-1}$ ($T_p = 13,3\text{d}$), observou-se um decréscimo do pH para 6,77, uma vez que houve, nesse período (27/04 - 15/05), um pequeno aumento da relação AV/AT para 0,68.

Na tentativa de se verificar o comportamento do digestor operando com um tempo de permanência curto, a vazão de alimentação foi aumentada para 800L.d^{-1} ($T_p = 10\text{d}$) no dia 16/05/95. A partir desta data constatou-se duas fases operacionais: aclimatação e estabilização do digestor. No período operacional de 16/05 a 07/07, o digestor apresentou mais um decréscimo do pH, que atingiu uma média de 6,74 devido ao aumento de AV/AT para 0,70. Esse aumento da razão AV/AT nesse período já era esperado, dado ao processo de aclimatação do digestor frente às novas condições operacionais. Já os resultados obtidos durante o período final de operação (07/07 a 26/10/95), demonstraram a completa estabilidade operacional do sistema piloto, dada a obtenção de um lodo metanogênico de alta atividade, que permitiu uma operação satisfatória do digestor, operando com uma carga máxima de 800L.d^{-1} ($347,2\text{gDQO.d}^{-1}$) e um tempo de permanência curto ($T_p = 10\text{d}$), mantendo-se dentro dos padrões recomendados pela EPA. Os valores médios registrados nesse período foram $\text{pH} = 7,01$ e $\text{AV/AT} = 0,22$, sendo estes valores considerados excelentes para o bom desempenho de um digestor anaeróbio.

No período operacional de 20/03 a 26/10/95, o lodo de excesso utilizado neste estudo apresentou boas características para a digestão anaeróbia, não sendo necessário fazer correções diárias no seu pH, exceto em situações esporádicas para reduzir a acumulação de ácidos voláteis no digestor, quando este apresentava sinais de sobrecarga. Após 19/06/95 não houve mais necessidade de adicionar alcalinidade externa (cal), haja visto o digestor apresentar uma satisfatória capacidade de tamponação, provavelmente resultante dos processos de amonificação e/ou produção de alcalinidade no digestor, tornando possível a remoção dos ácidos graxos voláteis (AGV) gerados no processo de digestão.

Durante a operação do sistema foi avaliado também a influência do tempo e a forma da recirculação do lodo. Foram investigadas as seguintes condições: (1) recirculação alternada (LR-① e LR-②) com um tempo de recirculação de 1 hora por dia;

(2) aumento progressivo do tempo de recirculação para 2, 4 e 8 horas diárias, utilizando-se somente a recirculação ascendente (LR-①). Para a condição (1), observou-se que a recirculação descendente (LR-②) proporcionava a formação de uma camada de espuma (estratificação do lodo), atribuída à existência de zonas mortas no conteúdo do digestor, provavelmente devido ao fluxo preferencial do lodo na região próxima à entrada do lodo recirculado. Devido a esse inconveniente foi descartada a operação com a linha LR-②. Já na condição (2), observou-se uma boa eficiência de mistura para um tempo de recirculação de 4-8 horas diárias, nitidamente comprovada pela redução substancial da razão AV/AT para valores menores que 0,35 (11/07/95), o que significa dizer que nessas condições o sistema apresentou uma característica operacional adequada, graças à distribuição uniforme da energia de mistura dissipada dentro do digestor.

Ao longo da operação do digestor piloto não houve necessidade de se verificar a toxicidade do lodo afluente. O bom desempenho do digestor durante a investigação, por si só, já era um demonstrativo de que o risco de colapso no sistema estava descartado, embora fosse possível ocorrer eventualmente uma carga tóxica indesejável ao processo de digestão. E, de fato, no dia 16/09/95 registrou-se uma grande descarga na ETE de 3 (três) produtos tóxicos: 30,5 toneladas de dinitrotolueno (DNT), 700 quilos de nitrobenzeno e 3,3 mil quilos de ortodichlorobenzeno (ODCB); quando a legislação permite apenas 80ppm (partes por milhão) para o ODCB e 500ppm para o DNT. A resposta do digestor a essa carga tóxica foi um pequeno aumento de AV/AT, que atingiu um valor máximo de 0,39 (04/10/95), estabilizando-se logo em seguida com um pH = 7,0 e $AV/AT \leq 0,30$.

5.1.2 - Demanda Química de Oxigênio (DQO).

A Tabela 5.2 mostra os resultados das análises da DQO para o afluente e efluente do digestor, realizadas em amostras brutas e centrifugadas (2500rpm/10min).

Observa-se que a concentração de DQO no efluente é maior do que no afluente. Essa variação decorre do efeito de liquefação do material orgânico (hidrólise) durante o processo de digestão.

Os altos valores da DQO efluente (DQO digerida) denotam a grande atuação das bactérias hidrolíticas no processo de solubilização (liquefação) dos sólidos orgânicos acumulados no digestor, liberando produtos dissolvidos na fase líquida, resultando no aumento do material orgânico no efluente.

Esse resultado já era esperado, haja visto ser o lodo de excesso composto de uma série de elementos, muitos deles complexos, não sendo convertido em biogás pelo processo de digestão anaeróbia.

5.1.3 - Eficiência da Digestão.

Durante a operação entre 20/03 e 09/10/95 foram realizadas análises da concentração de sólidos em suspensão no lodo afluente e efluente do digestor piloto. Através desses resultados foi possível acompanhar a evolução do lodo em função do tempo, de acordo com o plano adotado de acelerar o crescimento da população bacteriana, a partir da redução gradativa do tempo de permanência.

Verificou-se que a eficiência de remoção de sólidos em suspensão (SST, SSV e SSF) variou ao longo da operação do digestor. A concentração de sólidos no efluente era muito baixa durante a fase inicial da partida, quando o digestor ainda operava com uma pequena quantidade de lodo. Na medida em que o período operacional progrediu, a massa de lodo foi aumentando gradativamente, com a respectiva redução da água armazenada na câmara de digestão. Como não havia descarte de lodo do digestor, a tendência de remoção de sólidos era diminuir paulatinamente com o aumento da concentração de sólidos no efluente, até o estabelecimento do regime estacionário.

A Tabela 5.3 apresenta os resultados das concentrações de sólidos (SST, SSV e SSF), bem como as eficiências de remoção durante o período operacional acima referido.

Observa-se na Tabela 5.3 que houve um aumento da concentração de sólidos no efluente do digestor (SST, SSV e SSF) e uma redução na eficiência de remoção de

sólidos voláteis (SSV), atribuído à diminuição do tempo de permanência, conforme mostram os resultados experimentais. É interessante observar que a eficiência de remoção de SSV é diretamente proporcional ao tempo de permanência, ou seja, quanto menor o tempo de permanência menos eficiente é o sistema. Essa constatação é de suma importância para uma operação adequada do digestor.

Com base na Tabela 5.3, constatou-se que a partir do dia 11/07/95 ($T_p = 10d$) a remoção de sólidos voláteis (SSV) no digestor permaneceu praticamente constante ao longo do tempo, variando entre um mínimo de 18% e um máximo de 42%, cuja média registrada foi de 30%. Esse valor define a estabilidade operacional do sistema, consolidada durante o período de 11/07 a 09/10/95, com o estabelecimento do regime estacionário.

5.1.4 - Nutrientes.

Na digestão anaeróbia os nutrientes básicos indispensáveis ao processo de digestão são as concentrações de amônia e fosfato disponíveis no sistema. Esses nutrientes liberados do lodo digerido servem para assegurar o desenvolvimento do lodo metanogênico e para gerar alcalinidade na digestão (amonificação).

A Tabela 5.4 mostra as concentrações dos nutrientes [(nitrogênio amoniacal ($N-NH_3$), fosfato total (PO_4^{3-}) e fósforo orgânico (P))] presentes no afluente e efluente do digestor para avaliação dos fatores nutricionais disponíveis.

É importante observar na Tabela 5.4 que a forma predominante de material nitrogenado no efluente do digestor era o nitrogênio amoniacal ($N-NH_3$), que exibiu um aumento médio acima de 750% com relação ao valor encontrado no afluente. Os outros nutrientes (PO_4^{3-} e P) foram aumentados em torno de 200% ao longo do período operacional (05/06 a 23/10/95). Durante esse período registrou-se uma baixa concentração de nutrientes no afluente.

Para tanto, convém ressaltar que a concentração de nutrientes depende da origem do lodo. Como o substrato utilizado no experimento (lodo de excesso) era resultante dos processos industriais petroquímicos, pobres em carboidratos e proteínas, já era de se esperar que a concentração de nutrientes no afluente fosse baixa. No entanto, os valores encontrados foram suficientes para o desenvolvimento da população bacteriana, nitidamente comprovada pela boa performance do digester.

TABELA 5.1 - Valores do pH, da alcalinidade total, da concentração de ácidos voláteis e da alcalinidade de bicarbonato no lodo digerido do digester piloto da CETREL.

Continua

DATA	VAZÃO AFLUENTE (Qa, L.d ⁻¹)	pH	ALCALINIDADE (mg/L CaCO ₃)		ÁCIDOS VOLÁTEIS (AV, mg/L)	AV/AT	ALCALINIDADE EXTERNA (CAL, kg)	RECIRCULAÇÃO	OBS.
			TOTAL (AT)	BICARB. (AB)					
12/12/94 a 12/02/95	VAR.	(6,8)	(1342)	(403)	(1342)	(1,00)	(1 - 2)	ASC., 1h	---
12/02/95 a 19/03/95	VAR.	(7,0)	(1954)	(833)	(1632)	(0,83)	(1 - 2)	ASC., 1h	---
20/03/95	200	7,0	2273	1128	1636	0,72	--	ASC., 1h	(pH = 6,74) (AV/AT= 0,83)
21/03/95		6,7	1607	857	1071	0,67	--	ASC., 1h	
23/03/95		6,7	2200	856	1920	0,87	--	ASC., 1h	
24/03/95		6,7	2000	670	1900	0,95	--	ASC., 1h	
28/03/95		6,7	1917	447	2100	1,10	--	ASC., 1h	
29/03/95		6,7	1886	650	1766	0,94	--	ASC., 1h	
30/03/95		6,7	2200	1150	1500	0,68	--	ASC., 1h	
31/03/95		6,7	2038	1009	1470	0,72	2,0	ASC., 1h	
03/04/95		400	7,0	2100	1120	1400	0,67	--	
10/04/95	6,7		1704	903	1145	0,67	--	ASC., 1h	
11/04/95	6,9		2133	1013	1600	0,75	2,0	ASC., 1h	
12/04/95	7,2		2233	1127	1580	0,71	--	DESC., 1h	
13/04/95	6,9		2000	1062	1340	0,67	--	ASC., 1h	
17/04/95	6,8		2100	1148	1360	0,65	--	DESC., 1h	
18/04/95	6,9		1925	1295	900	0,47	--	ASC., 1h	
19/04/95	6,7		2019	1101	1311	0,65	--	DESC., 1h	

TABELA 5.1 - Valores do pH, da alcalinidade total, da concentração de ácidos voláteis e da alcalinidade de bicarbonato no lodo digerido do digestor piloto da CETREL.

Continuação

DATA	VAZÃO AFLUENTE (Qa, L.d ⁻¹)	pH	ALCALINIDADE (mg/L CaCO ₃)		ÁCIDOS VOLÁTEIS (AV, mg/L)	AV/AT	ALCALINIDADE EXTERNA (CAL, kg)	RECIRCULAÇÃO	OBSERVAÇÃO	
			TOTAL (AT)	BICARB. (AB)						
20/04/95	400	7,1	1667	967	1000	0,60	--	ASC., 1h	(pH = 6,88)	
24/04/95		6,6	2188	1121	1525	0,70	--	DESC., 1h	(AV/AT= 0,65)	
25/04/95	600	6,6	1860	869	1416	0,76	--	ASC., 1h		
26/04/95		6,6	2150	1086	1520	0,71	2,0	DESC., 1h		
27/04/95		6,8	1960	1053	1296	0,66	2,0	ASC., 1h		
02/05/95		6,8	2440	1197	1776	0,73	2,0	DESC., 1h		
03/05/95		7,0	2500	1275	1750	0,70	--	ASC., 1h		
04/05/95		7,0	2360	1100	1800	0,76	--	DESC., 1h		
05/05/95		7,0	2300	1355	1350	0,59	--	ASC., 1h		
08/05/95		6,8	2140	1216	1320	0,62	--	DESC., 1h		
09/05/95		6,6	2100	1058	1488	0,71	1,0	ASC., 1h		
10/05/95		6,6	2020	1096	1320	0,65	1,0	ASC., 1h		
11/05/95		6,8	2150	1243	1296	0,60	--	--		
12/05/95		6,7	2020	1062	1368	0,68	--	ASC., 1h	(pH = 6,77)	
15/05/95		6,7	2100	1092	1440	0,69	--	ASC., 1h	(AV/AT= 0,68)	
16/05/95		800	6,8	2234	1262	1389	0,62	--	ASC., 1h	aclimação
17/05/95			6,7	1940	966	1392	0,72	1,0	ASC., 1h	(16/05 a 07/07)
18/05/95	6,9		1660	837	1176	0,71	--	ASC., 1h		
19/05/95	6,8		1640	901	1056	0,64	--	ASC., 1h		
22/05/95	6,6		1860	818	1488	0,80	--	ASC., 1h		
23/05/95	6,7		1720	880	1200	0,70	2,0	ASC., 1h		
25/05/95	6,5		1780	772	1440	0,81	3,0	ASC., 1h		
26/05/95	7,2		2000	1009	1416	0,71	--	ASC., 1h		
30/05/95	6,6		2040	864	1680	0,82	1,0	ASC., 1h		
31/05/95	6,5		2080	854	1752	0,84	2,0	ASC., 1h		
01/06/95	6,6		2040	965	1536	0,75	1,0	ASC., 1h		
02/06/95	6,8		1780	906	1248	0,70	1,0	ASC., 1h		
05/06/95	6,6		1980	888	1560	0,79	1,0	ASC., 1h		

TABELA 5.1 - Valores do pH, da alcalinidade total, da concentração de ácidos voláteis e da alcalinidade de bicarbonato no lodo digerido do digestor piloto da CETREL.

DATA	VAZÃO AFLUENTE (Qa, L.d ⁻¹)	pH	ALCALINIDADE (mg/L CaCO ₃)		ÁCIDOS VOLÁTEIS (AV, mg/L)	AV/AT	ALCALINIDADE EXTERNA (CAL, kg)	RECIRCULAÇÃO	OBSERVAÇÃO
			TOTAL (AT)	BICARB. (AB)					
06/06/95	800	6,7	2111	1023	1555	0,74	1,5	ASC., 1h	
07/06/95		6,7	1980	938	1488	0,75	--	ASC., 1h	
08/06/95		6,6	1980	938	1488	0,75	--	ASC., 1h	
09/06/95		6,6	1900	892	1440	0,76	--	ASC., 1h	
12/06/95		6,5	1920	862	1512	0,79	2,0	ASC., 1h	
13/06/95		6,8	2025	912	1590	0,78	2,0	ASC., 1h	
14/06/95		6,6	2000	908	1560	0,78	--	ASC., 1h	
15/06/95		6,7	2075	962	1590	0,77	--	ASC., 1h	
16/06/95		6,8	2100	1113	1410	0,67	--	ASC., 1h	
19/06/95		6,7	2250	1074	1680	0,75	2,0	ASC., 1h	
20/06/95		6,8	2325	1170	1650	0,71	--	ASC., 1h	
21/06/95		6,8	2300	1159	1630	0,71	--	ASC., 1h	
22/06/95		6,7	2428	1021	2010	0,83	--	ASC., 2h	
28/06/95		6,8	2500	1206	1848	0,74	--	ASC., 2h	
03/07/95		6,9	2800	1859	1344	0,48	--	ASC., 2h	
04/07/95		6,8	2720	1796	1320	0,49	--	ASC., 2h	
05/07/95		6,9	2925	2064	1230	0,42	--	ASC., 2h	
06/07/95		6,9	2900	2039	1230	0,42	--	ASC., 2h	(pH = 6,74)
07/07/95		7,0	2800	2065	1050	0,38	--	ASC., 2h	(AV/AT= 0,70)
11/07/95	800	7,0	2900	2270	900	0,31	--	ASC., 4h	estabilização
13/07/95		7,0	2925	2274	930	0,32	--	ASC., 4h	(07/07 a 26/10)
14/07/95		7,0	2775	2208	810	0,29	--	ASC., 4h	
26/07/95		7,0	3075	2718	510	0,17	--	ASC., 4h	
01/08/95		7,1	3275	2855	600	0,18	--	ASC., 4h	
03/08/95		7,0	3250	2844	580	0,18	--	ASC., 4h	
04/08/95		7,0	3300	2740	800	0,24	--	ASC., 4h	
07/08/95		7,2	3225	2931	420	0,13	--	ASC., 4h	
08/08/95		7,2	3000	2727	390	0,13	--	ASC., 8h	

TABELA 5.1 - Valores do pH, da alcalinidade total, da concentração de ácidos voláteis e da alcalinidade de bicarbonato no lodo digerido do digestor piloto da CETREL.

Continuação

DATA	VAZÃO AFLUENTE (Qa, L.d ⁻¹)	pH	ALCALINIDADE (mg/L CaCO ₃)		ÁCIDOS VOLÁTEIS (AV, mg/L)	AV/AT	ALCALINIDADE EXTERNA (CAL, kg)	RECIRCULAÇÃO	OBSERVAÇÃO
			TOTAL (AT)	BICARB. (AB)					
14/08/95		7,0	2800	2464	480	0,17	--	ASC., 8h	
16/08/95		7,1	2850	2493	510	0,18	--	ASC., 8h	
18/08/95		7,0	2725	2326	570	0,21	--	ASC., 8h	
21/08/95		7,0	2950	2614	480	0,16	--	ASC., 8h	
23/08/95		7,2	2875	2623	360	0,13	--	ASC., 8h	
25/08/95		7,1	2800	2527	390	0,14	--	ASC., 8h	
28/08/95		7,1	2875	2539	480	0,17	--	ASC., 8h	
30/08/95		7,0	2850	2549	430	0,15	--	ASC., 8h	
01/09/95		7,1	3025	2626	570	0,19	--	ASC., 8h	
04/09/95		7,0	3000	2706	420	0,14	--	ASC., 8h	
06/09/95		7,2	3025	2731	420	0,14	--	ASC., 8h	
11/09/95	800	7,1	3025	2773	360	0,12	--	ASC., 8h	
13/09/95		7,1	2925	2610	450	0,15	--	ASC., 8h	
15/09/95		7,1	2800	2548	360	0,13	--	ASC., 8h	
16/09/95		--	--	--	--	--	--	(*)	
18/09/95		7,0	2725	2326	570	0,21	--	ASC., 8h	
20/09/95		6,9	2675	2108	810	0,30	--	ASC., 8h	
22/09/95		6,9	2850	2157	990	0,35	--	ASC., 8h	
25/09/95		6,9	2875	2287	840	0,29	--	ASC., 8h	
27/09/95		6,7	2375	1829	780	0,33	--	ASC., 8h	
02/10/95		6,9	2475	1866	870	0,35	--	ASC., 8h	
04/10/95		6,8	2525	1832	990	0,39	--	ASC., 8h	
06/10/95		6,9	2875	2266	870	0,30	--	ASC., 8h	
09/10/95		6,9	2600	1966	960	0,37	--	ASC., 8h	
16/10/95		7,0	2700	2133	810	0,30	--	ASC., 8h	

TABELA 5.1 - Valores do pH, da alcalinidade total, da concentração de ácidos voláteis e da alcalinidade de bicarbonato no lodo digerido do digester piloto da CETREL.

DATA	VAZÃO AFI.UEN- TE (Q _a , L.d ⁻¹)	pH	ALCALINIDADE (mg/L CaCO ₃)		ÁCIDOS VOLÁTEIS (AV, mg/L)	AV AT	ALCALI- NIDADE EXTERNA (CAL, kg)	RECIRCU- LAÇÃO	OBSERVAÇÃO
			TOTAL (AT)	BICARB. (AB)					
23/10/95	800	7,0	2800	2240	800	0,29	--	ASC., 8h	(pH = 7,01)
26/10/95		7,0	2575	2344	330	0,13	--	ASC., 8h	(AV/AT= 0,22)
MÁXIMA		7,20	3300	2931	2100	1,10	3,0	8,0	--
MÉDIA		6,85	2357	1548	1156	--	--	--	--
MÍNIMA		6,50	1607	447	330	0,13	1,0	1,0	--

() = média por período

(*) = ⊕ = Carga tóxica

AT = $(V_{H_2SO_4} \cdot N_{H_2SO_4} \cdot 50.000) / V_A$ (mL)

AV = $(V_{NaOH} \cdot N_{NaOH} \cdot 60.000) / V_A$ (mL)

AB = AT - 0,70AV

TABELA 5.2 - Valores da DQO (fase líquida) no lodo a ser digerido no afluente e no efluente do digester.

DATA	DQO (mg/L)	
	AFLUENTE	EFLUENTE
08/05/95	620	3.050
11/05/95	237	2.480
23/05/95	881	3.445
26/05/95	443	2.940
30/05/95	452	3.210
05/06/95	339	3.030
08/06/95	800	3.470
09/06/95	271	2.230
13/06/95	456	2.760
16/06/95	350	1.770
01/08/95	315	1.445
04/08/95	424	2.530
07/08/95	436	2.900
08/08/95	289	1.280
14/08/95	345	2.873

Continua

TABELA 5.2 - Valores da DQO (fase líquida) no lodo a ser digerido no afluente e no efluente do digestor.

DATA	DQO (mg/L)		Conclusão
	AFLUENTE	EFLUENTE	
21/08/95	321	3.050	
23/08/95	478	2.580	
28/08/95	290	1.060	
01/09/95	308	1.310	
18/09/95	620	1.250	
MÁXIMA	881	3.470	
MÉDIA	434	2.433	
MÍNIMA	237	1.060	

TABELA 5.3 - Concentração dos sólidos em suspensão no lodo a ser digerido (afl.) e no efluente (epl.) do digestor piloto, bem como a percentagem de remoção dos sólidos.

DATA	TEMPO DE PERMANÊNCIA (Tp, d)	SST (mg/L)			SSV (mg/L)			SSF (mg/L)			OBS.
		AFL.	EFL.	% REM	AFL.	EFL.	% REM	AFL.	EFL.	% REM	
12/12/94 a 19/03/95	--	(25.980)	(2.035)	(92)	--	--	--	--	--	--	(SST _a = 26,0g/L) (SST _e = 2,0g/L)
20/03/95		43.900	1.340	97	28.260	1.080	96	15.640	260	98	
22/03/95		40.900	2.960	93	26.480	2.260	91	14.420	700	95	
24/03/95	40	39.820	4.800	88	25.705	3.728	85	14.115	1.072	92	
30/03/95		43.280	1.200	97	34.960	980	97	8.320	220	97	(SST _a = 40,1g/L)
31/03/95		32.760	1.080	97	20.100	980	95	12.660	100	99	(SST _e = 2,3g/L)
03/04/95		54.860	2.600	95	34.660	1.900	95	20.200	700	97	
11/04/95		2.340	240	90	1.220	160	87	1.120	80	93	
12/04/95		10.410	1.240	88	6.940	860	88	3.470	380	89	
17/04/95	20	10.090	820	92	7.080	640	91	3.010	180	94	
19/04/95		39.620	9.820	75	27.240	6.220	77	12.380	3.600	71	(SST _a = 26,4g/L)
24/04/95		41.120	540	99	27.820	430	98	13.300	110	99	(SST _e = 2,5g/L)

TABELA 5.3 - Concentração dos sólidos em suspensão no lodo a ser digerido (afl.) e no efluente (epl.) do digester piloto, bem como a percentagem de remoção dos sólidos.

Continuação

DATA	TEMPO DE PERMANÊNCIA (Tp, d)	SST (mg/L)			SSV (mg/L)			SSF (mg/L)			OBS.
		AFL.	EFL.	% REM	AFL.	EFL.	% REM	AFL.	EFL.	% REM	
27/04/95		15.340	1.570	90	7.400	1.440	81	7.940	130	98	
03/05/95		9.620	360	96	6.840	300	96	2.780	60	98	
04/05/95		14.680	350	98	10.080	275	97	4.600	75	98	
08/05/95	13,3	52.420	10.69	80	21.820	7.030	68	30.600	3.660	88	
11/05/95		26.860	2.740	90	18.360	1.850	90	8.500	890	90	(SST _e = 21,5g/L)
12/05/95		10.280	2.549	75	7.120	1.709	76	3.160	840	73	(SST _e = 3,0g/L)
22/05/95		23.380	7.178	69	16.440	5.409	67	6.940	1.769	75	
23/05/95		34.260	11.540	66	24.500	7.500	69	9.760	4.040	59	
26/05/95		26.920	15.860	41	19.780	9.940	50	7.140	5.920	17	
30/05/95		29.520	11.220	62	22.360	4.840	78	7.160	6.380	11	
09/06/95		29.320	6.000	79	21.620	4.000	81	7.700	2.000	74	
13/06/95		35.440	22.894	35	26.760	20.070	25	8.680	2.824	67	
16/06/95		27.780	19.700	29	21.540	16.523	23	6.240	3.177	49	
11/07/95 ^(*)		44.830	32.080	28	29.190	18.774	36	15.640	13.306	15	
01/08/95		38.660	30.118	22	28.102	21.373	24	10.558	8.745	17	
04/08/95		35.470	19.508	45	25.397	15.111	41	10.073	4.397	56	
07/08/95	10	30.255	17.276	43	25.150	14.587	42	5.105	2.689	47	
14/08/95		32.556	19.696	40	26.520	16.151	39	6.036	3.545	41	
16/08/95		37.233	22.898	39	25.118	15.774	37	12.115	7.124	41	
23/08/95		44.140	28.647	35	34.500	23.060	33	9.640	5.587	42	
25/08/95		28.080	22.324	20	21.760	17.887	18	6.320	4.437	30	
05/09/95		41.700	31.900	23	31.900	22.740	29	9.800	9.160	7	
11/09/95		33.740	27.000	20	25.280	18.980	22	8.460	8.020	5	
15/09/95		30.780	24.900	19	23.520	17.800	24	7.260	7.100	2	
18/09/95		21.380	17.180	20	15.780	12.240	22	5.600	4.940	12	
25/09/95		24.580	17.133	30	18.960	12.767	33	5.620	4.366	22	
27/09/95		38.660	31.237	19	30.420	24.123	21	8.240	7.114	14	

TABELA 5.3 - Concentração dos sólidos em suspensão no lodo a ser digerido (afl.) e no efluente (efl.) do digester piloto, bem como a percentagem de remoção dos sólidos.

DATA	TEMPO DE PERMANÊNCIA (Tp, d)	SST (mg/L)			SSV (mg/L)			SSF (mg/L)			Conclusão
		AFL.	EFL.	% REM	AFL.	EFL.	% REM	AFL.	EFL.	% REM	OBS.
02/10/95	10	35.275	25.680	27	27.700	18.520	33	7.575	7.160	5	{SST ₁₀ = 32,5g/L}
04/10/95		22.160	16.275	26	17.760	11.975	32	4.400	4.300	2	
09/10/95		34.780	24.400	30	27.180	20.303	25	7.600	4.097	46	
MÁXIMA		54.860	32.080	99	34.960	24.123	98	30.600	13.306	99	--
MÉDIA		30.956	13.355	--	21.935	9.812	--	9.021	3.543	--	--
MÍNIMA		2.340	240	19	1.220	275	18	1.120	60	2	--

(*) = estabelecimento do regime estacionário.

() = média por período.

TABELA 5.4 - Valores dos nutrientes presentes no afluente e no sobrenadante do digester piloto.

DATA	N-NH ₃ (mg/L)		PO ₄ ³⁻ (mg/L)		P (mg/L)	
	AFL.	EFL.	AFL.	EFL.	AFL.	EFL.
05/06/95	44	333	--	--	--	--
08/06/95	37	306	13	58	4	19
09/06/95	53	282	5	39	2	13
13/06/95	70	317	11	41	4	13
16/06/95	32	237	3	23	1	8
01/08/95	76	573	14	80	5	26
08/08/95	37	702	17	101	6	33
21/08/95	49	602	69	137	23	45
23/08/95	61	422	47	64	15	21
28/08/95	47	393	7	56	2	18
01/09/95	41	521	11	31	4	10
05/09/95	24	545	34	68	11	22
06/09/95	22	478	4	31	2	10
13/09/95	53	200	21	31	7	10
18/09/95	32	212	20	49	7	16
25/09/95	55	389	10	47	4	15
02/10/95	41	292	5	50	2	16

Continua

TABELA 5.4 - Valores dos nutrientes presentes no afluente e no sobrenadante do digestor piloto.

DATA	N-NH ₃ (mg/L)		PO ₄ ⁻³ (mg/L)		P (mg/L)		Conclusão
	AFL.	EFL.	AFL.	EFL.	AFL.	EFL.	
09/10/95	36	350	15	39	5	13	
16/10/95	45	428	14	44	5	14	
23/10/95	54	456	16	58	5	19	
MÁXIMA	76	702	69	137	23	45	
MÉDIA	46	402	18	55	6	18	
MÍNIMA	22	200	3	23	1	8	

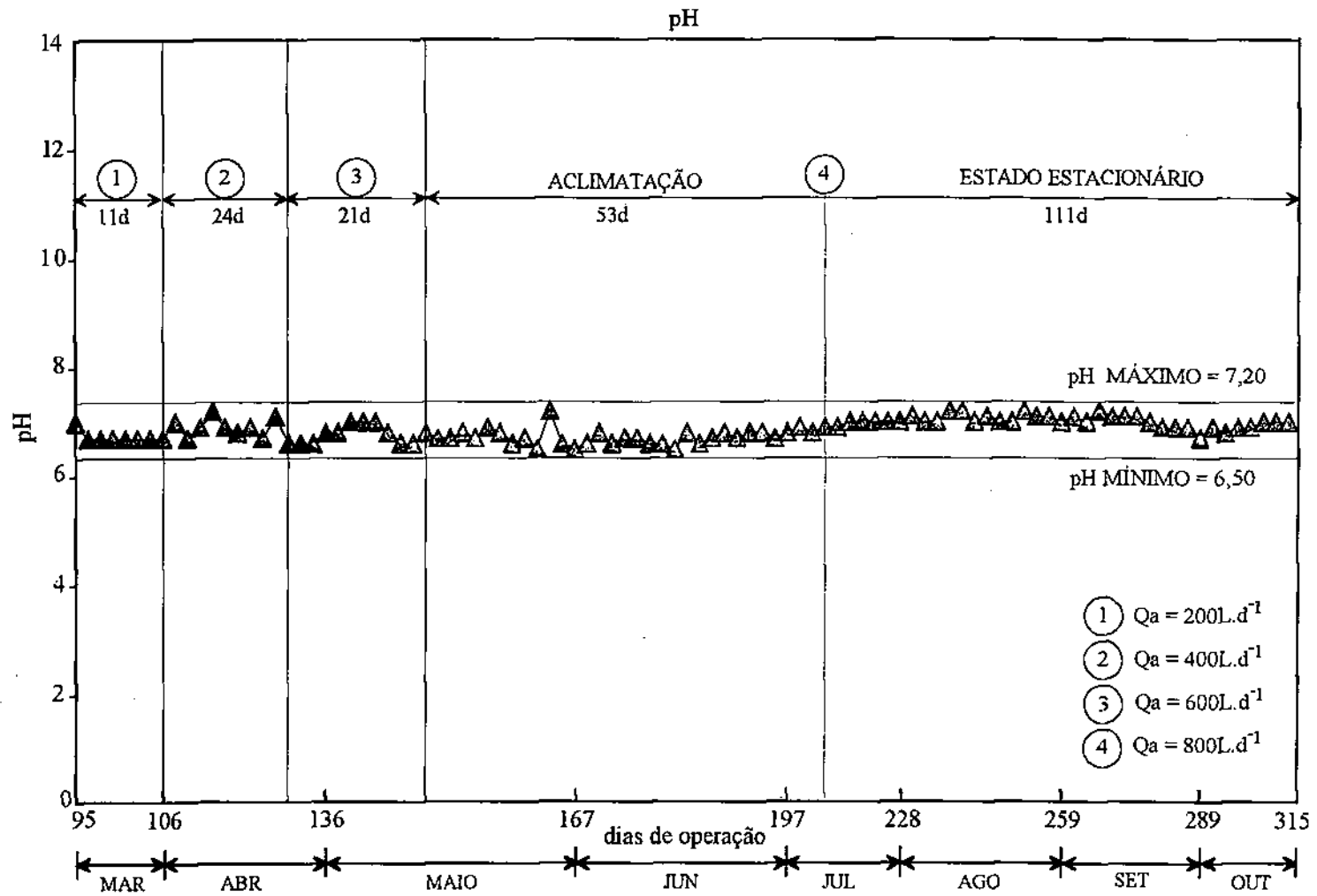


Figura 5.1a - Resultados do pH durante a operação da planta piloto com o aumento progressivo da vazão afluente.

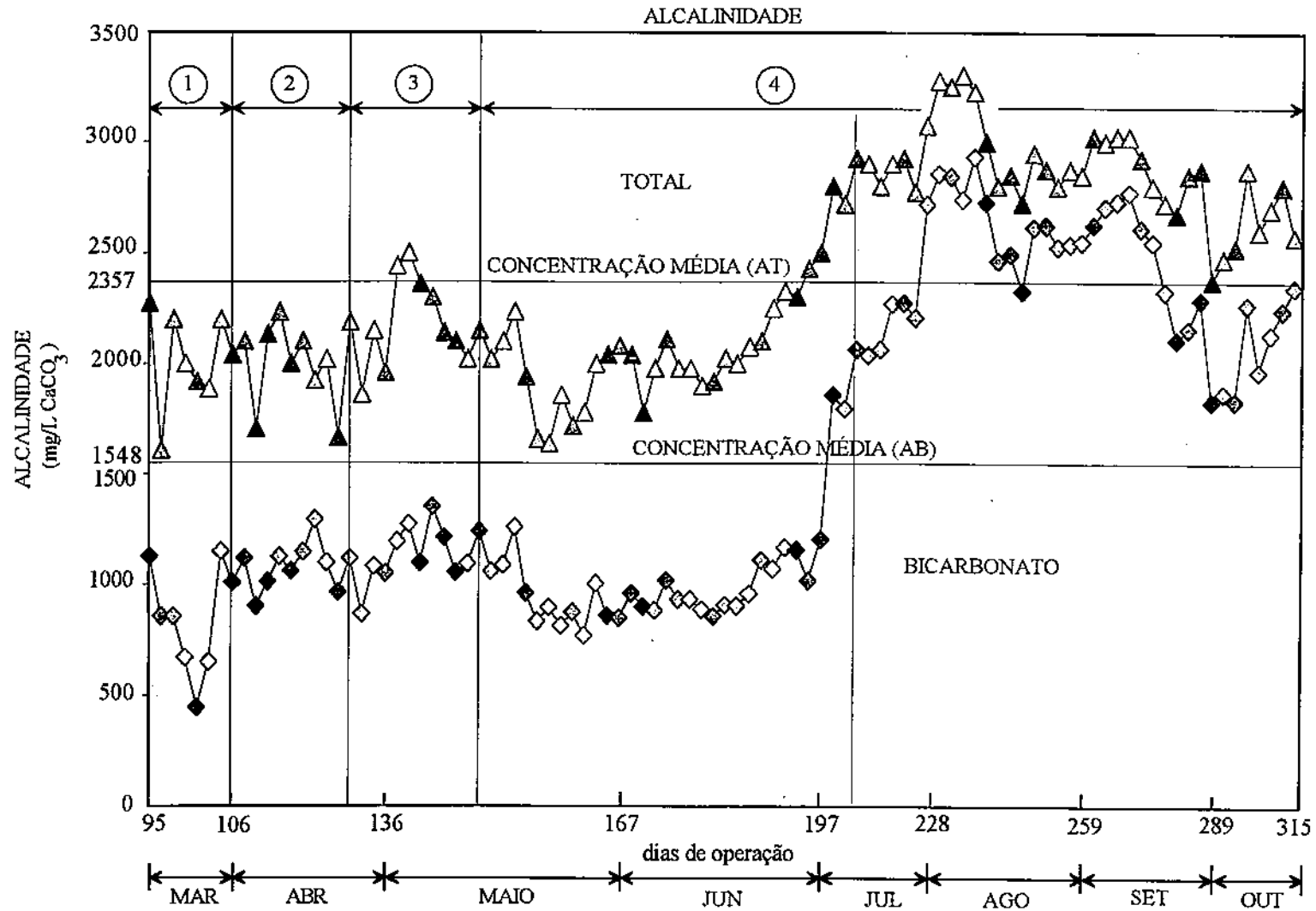


Figura 5.1b - Resultados da alcalinidade durante a operação da planta piloto com o aumento progressivo da vazão afluyente.

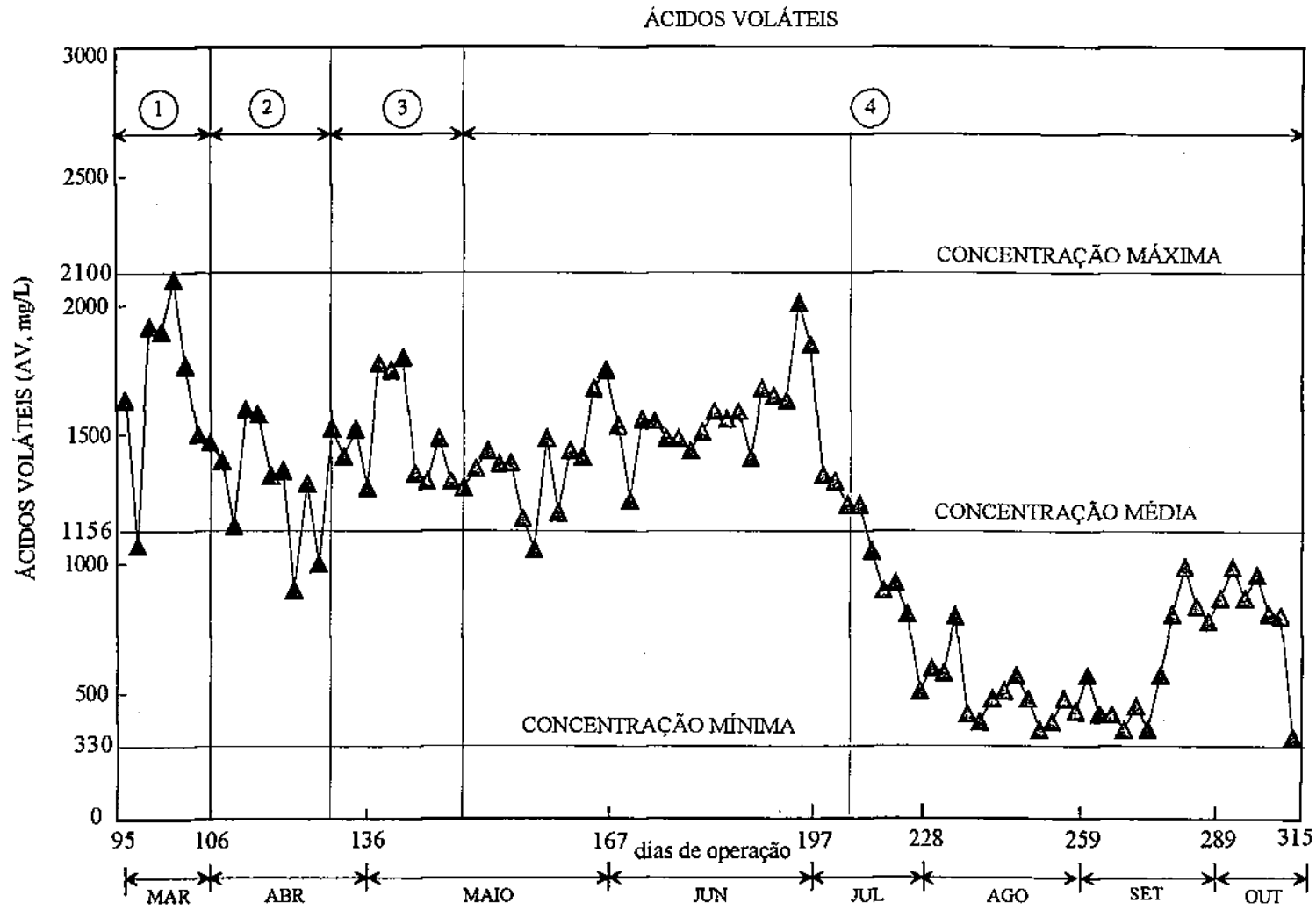


Figura 5.1c - Resultados dos ácidos voláteis durante a operação da planta piloto com o aumento progressivo da vazão afluente.

5.2 - Teste de Bancada: Avaliação do Processo de Digestão do Lodo.

5.2.1 - Estabilidade do pH.

A investigação em escala de laboratório foi realizada numa sala sem refrigeração, localizada no Laboratório Central da CETREL, cuja temperatura média era de $35 \pm 2^\circ\text{C}$.

Durante um período de 83 (oitenta e três) dias de operação não se registrou nenhum problema operacional nos 3 (três) digestores em estudo (D_1 , D_2 e D_3). De acordo com o plano adotado de não utilização de alcali (cal) no afluente (correção do pH), os resultados obtidos no período do experimento (07/06 a 28/08/95) demonstraram claramente que a digestão anaeróbia do lodo de excesso é tecnicamente viável.

As Tabelas 5.5a, 5.5b, 5.5c e 5.5d mostram os parâmetros operacionais relacionados à estabilidade do pH para os diferentes digestores. Foram utilizados no teste digestores completamente misturados, tendo-se uma variação no tempo de permanência de $T_p = 10\text{d}$ (D_1), $T_p = 13,3\text{d}$ (D_2) e $T_p = 16\text{d}$ (D_3).

Fazendo uma superposição dos resultados do teste de bancada (D_1) com os valores encontrados no digestor piloto, observa-se uma convergência com relação ao desempenho dos digestores. Por outro lado, em se tratando do tempo de maturação do lodo, ou seja, o tempo necessário para formação de uma população bacteriana volumosa e ativa (lodo metanogênico), os digestores D_1 , D_2 e D_3 apresentaram um tempo menor comparado com o digestor piloto. Mas isso já era esperado, dada a opção de iniciar a partida dos digestores no teste de bancada utilizando-se inóculo externo (lodo anaeróbio floculento proveniente do digestor piloto).

A constatação desse fato pode ser comprovado comparando-se o tempo gasto em cada sistema para colocar os parâmetros operacionais (AV e AT) na faixa adequada de operação ($AV/AT \leq 0,35$), garantindo um bom desempenho do digestor. Enquanto que o digestor piloto consumiu um tempo de 176 dias (12/12/94 a 07/07/95) para

se enquadrar na faixa acima recomendada (ver Tabela 5.1), os digestores D_1 e D_2 consumiram apenas 50 dias (07/06 a 26/07/95) de operação, conforme mostram as Tabelas 5.5a, 5.5b e 5.5c. Os valores obtidos do pH e AV/AT estão plotados nas Figuras 5.2a, 5.2b e 5.2c.

5.2.2 - Eficiência da Digestão.

Ao longo do experimento todos os digestores (D_1 , D_2 e D_3) tiveram um desempenho estável quanto à estabilidade do pH, mas a eficiência de digestão (medida como a percentagem de remoção de sólidos voláteis) aumentou para tempos de permanência mais longos (13,3 e 16 dias).

As Tabelas 5.6a, 5.6b e 5.6c apresentam a concentração de sólidos (SST, SSV e SSF) e a percentagem de remoção destes em cada digestor.

A exemplo do digestor piloto, também ocorreu uma redução da eficiência de sólidos voláteis (SSV) ao longo da operação dos digestores. Esse decréscimo era absolutamente normal devido ao processo de aclimação do sistema. Paulatinamente os digestores em estudo (D_1 , D_2 e D_3) apresentaram uma fase de adaptação relativamente curta em 50 dias (07/06 a 26/07/95). No período de 26/07 a 25/08/95 os digestores já operavam em regime estacionário.

A Tabela 5.7 mostra os valores médios dos sólidos em suspensão (SST, SSV e SSF) no afluente e efluente dos digestores D_1 , D_2 e D_3 , com suas respectivas eficiências de remoção calculados a partir do estabelecimento do regime estacionário.

Observa-se uma eficiência de remoção de sólidos suspensos voláteis (SSV) de 34,4% para o digestor-1 (D_1 , $T_p = 10d$), 38,9% para o digestor-2 (D_2 , $T_p = 13,3d$) e 42,3% para o digestor-3 (D_3 , $T_p = 16d$). Comparando o valor da eficiência do digestor D_1 (34,4%) com àquele encontrado no digestor piloto (30,0%), observa-se uma pequena diferença nos resultados, o que comprova que o digestor piloto operava sob condições favoráveis. Quando o tempo de permanência foi aumentado para 13,3 e 16 dias,

houve um aumento na eficiência da digestão para 38,9% e 42,3%, respectivamente. A explicação para este fato é que o digestor com um tempo de permanência inferior a 16 (dezesesseis) dias trabalha sobrecarregado, o que dificulta a degradação dos sólidos voláteis e, conseqüentemente, haverá uma redução na taxa de produção de metano no sistema.

A Figura 5.3 apresenta graficamente os resultados observados por O'ROURKE (1968), utilizando lodo primário, e os obtidos no presente estudo. Observa-se que a eficiência de remoção dos sólidos voláteis no lodo de excesso da CETREL é bem menor do que aquela observada por O'ROURKE.

5.2.3 - Produção de Biogás.

O desempenho dos digestores (D_1 , D_2 e D_3) também foi avaliado em termos da produção de biogás. Utilizando-se um gasômetro convencional acoplado a cada sistema foram registradas as médias horárias de produção de gás durante 10 (dez) dias.

A Tabela 5.8 mostra a produção de biogás obtida ao longo do experimento, podendo ser verificado que a produção de gás atingiu o seu valor máximo (35,1 mL/h) para um tempo de permanência de 16 (dezesesseis) dias (D_3). Esse resultado já era esperado, uma vez que a eficiência de remoção de sólidos voláteis no digestor-3 (42,3%) superava os valores dos outros dois digestores-1 e 2 com 34,4% e 38,9%, respectivamente.

Tendo-se definido a relação entre a eficiência de remoção de sólidos voláteis (SSV) e o tempo de permanência (T_p) foi possível calcular a produção teórica de metano (CH_4) nos digestores.

Com base na estequiometria do processo de digestão anaeróbia, sabe-se que em 1g de sólidos voláteis removido (SSV_{rem}), há uma produção teórica de metano (CH_4) de $1,5 \times 0,25 \times 26/16 = 609\text{mL}$, para $p \approx 0,95\text{atm}$ e $T \approx 300^\circ\text{K}$ (VAN HAANDEL, 1994). Tomando-se como referência os valores das Tabelas 5.7 e 5.8 a taxa teórica de produção de metano foi calculada para os diferentes digestores, estando apresentados na Tabela 5.9

(última coluna, 6), onde se mostram todos os dados relativos à produção de biogás, calculados em termos de lodo aplicado (coluna 4) e lodo digerido (coluna 5). A produção teórica foi obtida da seguinte forma:

$$D_1(L/2d) = 25,15 \times 0,8 \times 0,344 \times 609/1000 \\ = 4,22$$

$$D_2(L/2d) = 25,15 \times 0,6 \times 0,389 \times 609/1000 \\ = 3,57$$

$$D_3(L/2d) = 25,15 \times 0,5 \times 0,423 \times 609/1000 \\ = 3,24$$

TABELA 5.5a - Valores do pH, alcalinidade total e de bicarbonato, e concentração de ácidos voláteis no lodo digerido do digestor-1 com $T_p = 10d$.

DATA	DIA	pH	ALCALINIDADE (mg/L) $CaCO_3$		ÁCIDOS VOLÁTEIS (AV, mg/L)	AV/AT
			TOTAL (AT)	BICARB. (AB)		
07/06/95	1	6,69	1.860	852	1.440	0,77
08/06/95	2	6,71	1.675	793	1.260	0,75
09/06/95	3	6,67	1.775	851	1.320	0,74
12/06/95	6	6,54	1.750	742	1.440	0,82
13/06/95	7	6,71	1.800	813	1.410	0,78
14/06/95	8	6,74	1.800	897	1.290	0,72
15/06/95	9	6,78	1.800	960	1.200	0,67
16/06/95	10	6,76	1.775	977	1.140	0,64
19/06/95	13	6,73	1.900	913	1.410	0,74
20/06/95	14	6,71	1.900	892	1.440	0,76
05/07/95	29	6,67	2.050	1.021	1.470	0,72
26/07/95	50	7,05	2.243	1.694	785	0,35
31/07/95	55	7,21	2.850	2.241	870	0,31
03/08/95	58	7,02	2.975	2.310	950	0,32
07/08/95	62	7,17	2.375	1.892	690	0,29
14/08/95	69	7,01	3.000	2.545	650	0,22
18/08/95	73	7,09	2.775	2.263	660	0,24

Continua

TABELA 5.5a - Valores do pH, alcalinidade total e de bicarbonato, e concentração de ácidos voláteis no lodo digerido do digestor-1 com $T_p = 10d$.

DATA	DIA	pH	ALCALINIDADE (mg/L) $CaCO_3$		ÁCIDOS VOLÁTEIS (AV, mg/L)	Conclusão
			TOTAL (AT)	BICARB. (AB)		$\frac{AV}{AT}$
21/08/95	76	7,10	2.700	2.322	540	0,20
23/08/95	78	7,19	2.450	2.198	360	0,15
25/08/95	80	7,10	2.375	2.144	330	0,14
28/08/95	83	7,08	2.400	2.148	360	0,15
MÁXIMA		7,21	3.000	2.545	1.470	0,82
MÉDIA		6,90	2.201	1.498	1.000	--
MÍNIMA		6,54	1.675	742	330	0,14

TABELA 5.5b - Valores do pH, alcalinidade total e de bicarbonato, e concentração de ácidos voláteis no lodo digerido do digestor-2 com $T_p = 13,3d$.

DATA	DIA	pH	ALCALINIDADE (mg/L) $CaCO_3$		ÁCIDOS VOLÁTEIS (AV, mg/L)	Continua
			TOTAL (AT)	BICARB. (AB)		$\frac{AV}{AT}$
07/06/95	1	6,68	1.880	838	1.488	0,79
08/06/95	2	6,69	1.800	813	1.410	0,78
09/06/95	3	6,71	1.825	754	1.530	0,84
12/06/95	6	6,59	1.850	800	1.500	0,81
13/06/95	7	6,70	1.875	825	1.500	0,80
14/06/95	8	6,70	1.825	838	1.410	0,77
15/06/95	9	6,70	1.875	783	1.560	0,83
16/06/95	10	6,74	1.850	905	1.350	0,73
19/06/95	13	6,71	1.925	875	1.500	0,78
20/06/95	14	6,71	1.925	875	1.500	0,78
05/07/95	29	6,81	2.275	1.267	1.440	0,63
26/07/95	50	7,09	2.950	2.383	810	0,27
31/07/95	55	7,18	2.975	2.282	990	0,33
03/08/95	58	7,06	2.975	2.345	900	0,30
07/08/95	62	7,19	2.575	2.050	750	0,29
14/08/95	69	7,12	2.750	2.204	780	0,28
18/08/95	73	7,22	2.925	2.589	480	0,16
21/08/95	76	7,22	2.825	2.531	420	0,15

TABELA 5.5b - Valores do pH, alcalinidade total e de bicarbonato, e concentração de ácidos voláteis no lodo digerido do digestor-2 com $T_p = 13,3d$.

DATA	DIA	pH	ALCALINIDADE (mg/L) $CaCO_3$		ÁCIDOS VOLÁTEIS (AV, mg/L)	Conclusão
			TOTAL (AT)	BICARB. (AB)		$\frac{AV}{AT}$
23/08/95	78	7,28	2.675	2.444	330	0,12
25/08/95	80	7,17	2.650	2.398	360	0,14
28/08/95	83	7,15	2.700	2.385	450	0,17
MÁXIMA		7,28	2.975	2.589	1.560	0,84
MÉDIA		6,92	2.329	1.580	1.069	—
MÍNIMA		6,59	1.800	754	330	0,12

TABELA 5.5c - Valores do pH, alcalinidade total e de bicarbonato, e concentração de ácidos voláteis no lodo digerido do digestor-3 com $T_p = 16d$.

DATA	DIA	pH	ALCALINIDADE (mg/L) $CaCO_3$		ÁCIDOS VOLÁTEIS (AV, mg/L)	Continua
			TOTAL (AT)	BICARB. (AB)		$\frac{AV}{AT}$
07/06/95	1	6,70	1.840	849	1.416	0,77
08/06/95	2	6,76	1.875	825	1.500	0,80
09/06/95	3	6,67	1.875	783	1.560	0,83
12/06/95	6	6,63	1.975	862	1.590	0,81
13/06/95	7	6,73	1.950	879	1.530	0,78
14/06/95	8	6,70	1.900	787	1.590	0,84
15/06/95	9	6,73	1.950	837	1.590	0,82
16/06/95	10	6,77	1.900	955	1.350	0,71
19/06/95	13	6,74	2.000	929	1.530	0,77
20/06/95	14	6,79	2.050	1.000	1.500	0,73
05/07/95	29	6,86	2.375	1.283	1.560	0,66
26/07/95	50	7,09	2.975	2.345	900	0,30
31/07/95	55	7,19	3.075	2.361	1.020	0,33
03/08/95	58	7,09	3.000	2.356	920	0,31
07/08/95	62	7,18	2.725	2.179	780	0,29
14/08/95	69	7,16	2.725	2.200	750	0,28
18/08/95	73	7,28	2.950	2.635	450	0,15
21/08/95	76	7,29	2.900	2.627	390	0,13
23/08/95	78	7,31	2.775	2.586	270	0,10

TABELA 5.5c - Valores do pH, alcalinidade total e de bicarbonato, e concentração de ácidos voláteis no lodo digerido do digester-3 com $T_p = 16d$.

DATA	DIA	pH	ALCALINIDADE (mg/L $CaCO_3$)		ÁCIDOS VOLÁTEIS (AV, mg/L)	Conclusão
			TOTAL (AT)	BICARB. (AB)		$\frac{AV}{AT}$
25/08/95	80	7,23	2.800	2.548	360	0,13
28/08/95	83	7,19	2.750	2.435	450	0,16
MÁXIMA		7,31	3.075	2.635	1.590	0,84
MÉDIA		6,96	2.398	1.631	1.095	--
MÍNIMA		6,70	1.840	783	360	0,10

TABELA 5.5d - Valores médios do pH, da alcalinidade total, da concentração de ácidos voláteis e da alcalinidade de bicarbonato nos efluentes dos digestores D_1 , D_2 e D_3 .

LODO	pH	AT (mg/L $CaCO_3$)	AV (mg/L)	AB (mg/L $CaCO_3$)
EFL. D_1 *	7,10	2.614	620	2.176
EFL. D_2 *	7,17	2.800	627	2.361
EFL. D_3 *	7,20	2.868	629	2.427

(*) Regime estacionário (considerado a partir do dia 26/07/95).

TABELA 5.6a - Concentração dos sólidos em suspensão no lodo a ser digerido no aflente (afl.) e no efluente (efl.) do digester-1, bem como a percentagem de remoção dos sólidos ($T_p = 10d$).

DATA	SST (mg/L)			SSV (mg/L)			SSF (mg/L)		
	AFL.	EFL.	% REM.	AFL.	EFL.	% REM.	AFL.	EFL.	% REM.
08/06/95	28.760	12.942	55	20.150	8.262	59	8.610	4.680	46
13/06/95	35.440	16.657	53	26.760	9.901	63	8.680	6.756	22
19/06/95	18.920	7.946	58	14.540	5.671	61	4.380	2.275	48
26/07/95 ^(*)	30.476	16.457	46	25.150	13.078	48	5.326	3.379	36
31/07/95	29.880	17.032	43	20.345	10.173	50	9.535	6.859	28
03/08/95	38.660	21.263	45	29.780	17.868	40	8.880	3.395	62

Continua

TABELA 5.6a - Concentração dos sólidos em suspensão no lodo a ser digerido no afluente (afl.) e no efluente (efl.) do digester-1, bem como a percentagem de remoção dos sólidos (Tp = 10d).

DATA	SST (mg/L)			SSV (mg/L)			SSF (mg/L)			Conclusão
	AFL.	EFL.	% REM.	AFL.	EFL.	% REM.	AFL.	EFL.	% REM.	
14/08/95	32.556	24.417	25	26.520	19.625	26	6.036	4.792	21	
18/08/95	23.840	18.166	24	18.020	14.668	19	5.820	3.498	40	
23/08/95	44.140	32.300	27	34.500	23.660	31	9.640	8.640	10	
25/08/95	28.080	20.976	25	21.760	16.603	24	6.320	4.373	31	
MÁXIMA	44.140	32.300	58	34.500	23.660	63	9.640	8.640	62	
MÉDIA	31.075	18.816	--	23.752	13.951	--	7.323	4.865	--	
MÍNIMA	18.920	7.946	24	14.540	5.671	19	4.380	2.275	10	

TABELA 5.6b - Concentração dos sólidos em suspensão no lodo a ser digerido no afluente (afl.) e no efluente (efl.) do digester-2, bem como a percentagem de remoção dos sólidos (Tp = 13,3d).

DATA	SST (mg/L)			SSV (mg/L)			SSF (mg/L)		
	AFL.	EFL.	% REM.	AFL.	EFL.	% REM.	AFL.	EFL.	% REM.
08/06/95	28.760	14.409	50	20.150	7.456	63	8.610	6.953	19
13/06/95	35.440	14.176	60	26.760	7.760	71	8.680	6.416	26
19/06/95	18.920	9.271	51	14.540	6.979	52	4.380	2.292	48
26/07/95 ^(*)	30.476	17.676	42	25.150	12.324	51	5.326	5.352	--
31/07/95	29.880	15.836	47	20.345	10.173	50	9.535	5.663	41
03/08/95	38.660	21.804	44	29.780	18.017	39	8.880	3.787	57
14/08/95	32.556	21.975	32	26.520	18.431	30	6.036	3.544	41
18/08/95	23.840	15.973	33	18.020	12.254	32	5.820	3.719	36
23/08/95	44.140	27.764	37	34.500	22.980	33	9.640	4.784	50
25/08/95	28.080	17.073	39	21.760	13.339	39	6.320	3.734	41
MÁXIMA	44.140	27.764	60	34.500	22.980	71	9.640	6.953	48
MÉDIA	31.075	17.596	--	23.752	12.971	--	7.323	4.624	--
MÍNIMA	18.920	9.271	32	14.540	7.456	30	4.380	2.292	19

TABELA 5.6c - Concentração dos sólidos em suspensão no lodo a ser digerido no afluente (afl.) e no efluente (efl.) do digestor-3, bem como a percentagem de remoção dos sólidos (Tp = 16d).

DATA	SST (mg/L)			SSV (mg/L)			SSF (mg/L)		
	AFL.	EFL.	% REM.	AFL.	EFL.	% REM.	AFL.	EFL.	% REM.
08/06/95	28.760	15.243	47	20.150	10.277	49	8.610	4.966	42
13/06/95	35.440	17.720	50	26.760	12.764	52	8.680	4.956	43
19/06/95	18.920	10.406	45	14.540	6.397	56	4.380	4.009	8
26/07/95 ^(*)	30.476	16.706	45	25.150	13.581	46	5.326	3.125	41
31/07/95	29.880	15.836	47	20.345	6.510	68	9.535	4.863	49
03/08/95	38.660	22.790	41	29.780	18.499	38	8.880	4.291	52
14/08/95	32.556	19.892	39	26.520	16.416	38	6.036	3.476	42
18/08/95	23.840	15.019	37	18.020	11.713	35	5.820	3.306	43
23/08/95	44.140	27.455	38	34.500	21.528	38	9.640	5.927	39
25/08/95	28.080	16.848	40	21.760	13.295	39	6.320	3.553	44
MÁXIMA	44.140	27.455	50	34.500	21.528	68	9.640	5.927	52
MÉDIA	31.075	17.791	--	23.752	13.098	--	7.323	4.247	--
MÍNIMA	18.920	10.406	37	14.540	6.397	35	4.380	3.125	8

TABELA 5.7 - Concentração média dos sólidos em suspensão no lodo a ser digerido nos afluentes e nos efluentes dos digestores D₁, D₂ e D₃ (conc. g/L), bem como a percentagem de remoção de sólidos suspensos.

LODO	SÓLIDOS SUSPENSOS (g/L)			PERCENTAGEM DE REMOÇÃO (%)		
	TOTAIS	FIXOS	VOLÁTEIS	TOTAIS	FIXOS	VOLÁTEIS
AFL.	32,50	7,36	25,15	--	--	--
EFL. D ₁	21,52	4,99	16,51	33,8	32,2	34,4
EFL. D ₂	20,35	4,37	15,36	37,4	40,6	38,9
EFL. D ₃	19,22	4,08	14,51	40,9	44,6	42,3

Nota: Estes valores foram calculados a partir do estabelecimento do regime estacionário (26/07/95).

TABELA 5.8 - Produção de biogás nos digestores D₁, D₂ e D₃.

DATA	D ₁ (Tp = 10d) mL/h	D ₂ (Tp = 13,3d) mL/h	D ₃ (Tp = 16d) mL/h
26/07/95	37,5	50,0	60,0
31/07/95	37,5	47,5	42,5
03/08/95	36,3	43,5	45,8
07/08/95	40,2	35,5	38,0
14/08/95	38,0	34,5	38,0
18/08/95	32,0	27,4	25,0
21/08/95	30,0	17,0	27,5
23/08/95	30,8	37,3	23,5
25/08/95	31,8	27,5	25,0
28/08/95	29,6	28,0	25,5
MÉDIA (mL/h)	34,4	34,8	35,1
MÉDIA (L/2d)	1,65	1,67	1,68

TABELA 5.9 - Produção média de biogás por alimentação dos digestores D₁, D₂ e D₃.

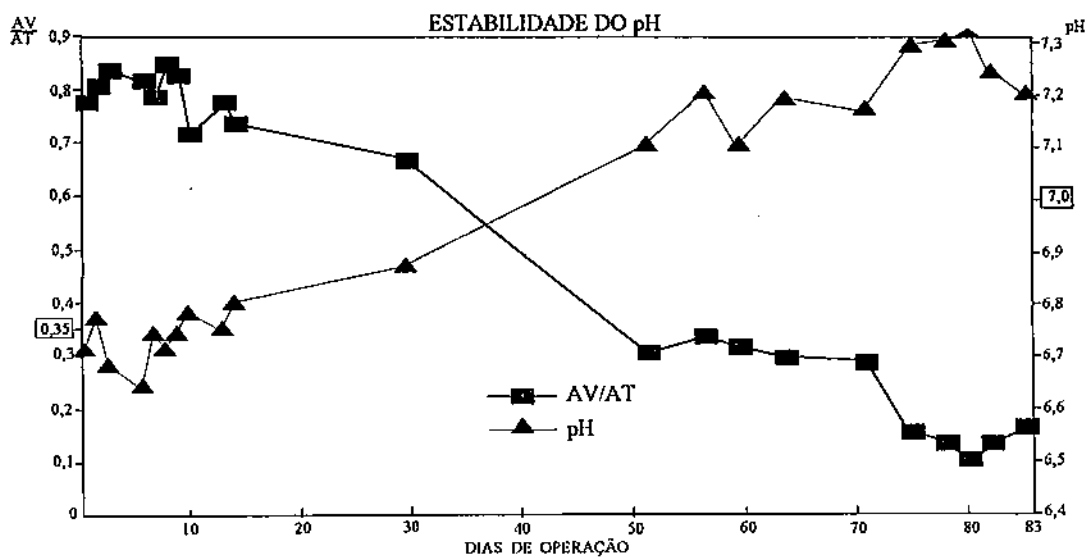
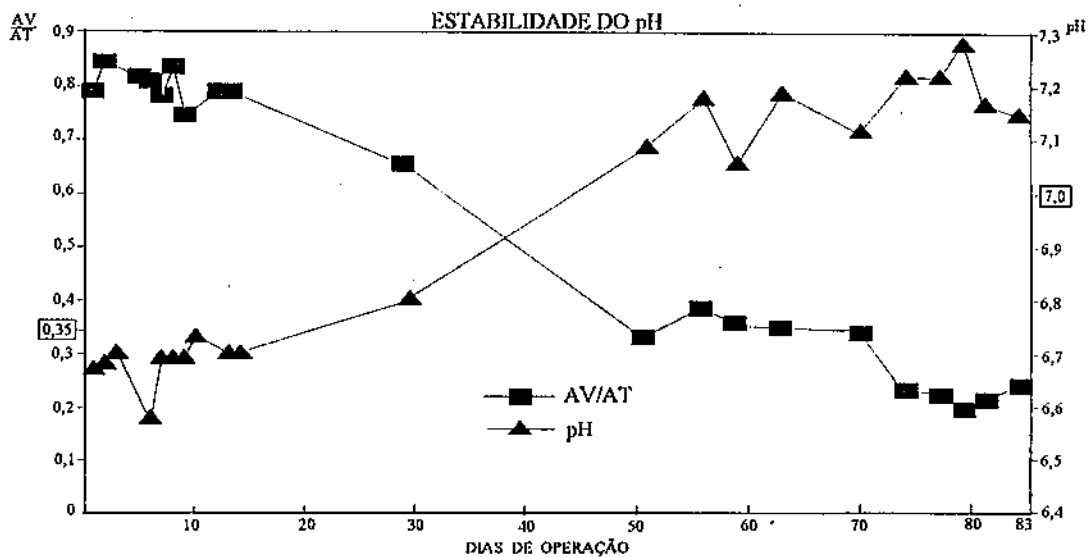
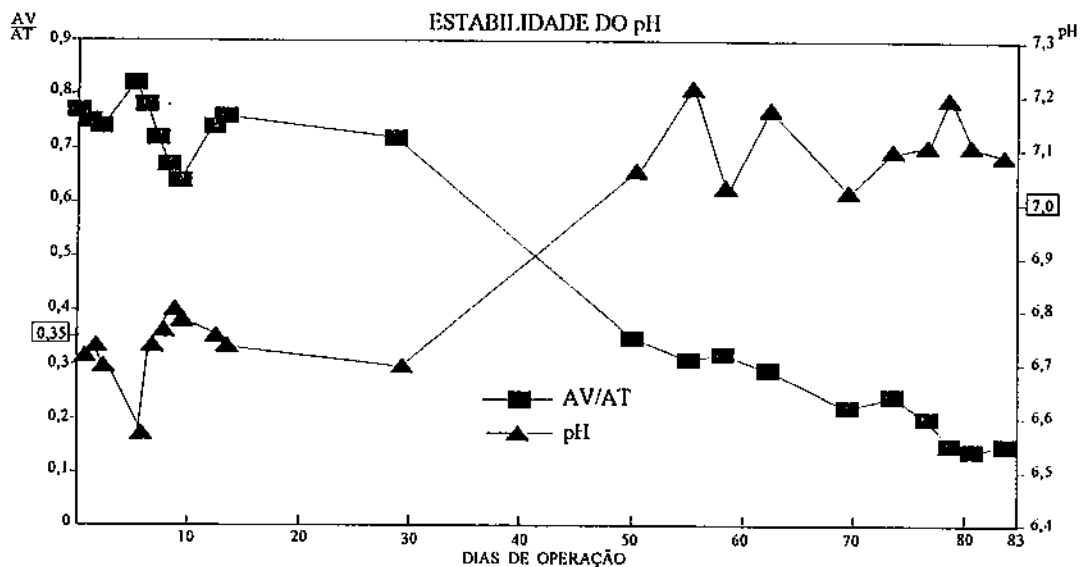
DIGESTOR	PRODUÇÃO DE METANO (CH ₄)				PRODUÇÃO TEÓRICA (L/2d)
	mL/h	L/2d	mL/gSSV aplic.	mL/gSSVrem.	
D ₁	34,4	1,65	82	238	4,22
D ₂	34,8	1,67	111	284	3,57
D ₃	35,1	1,68	134	316	3,24

Nota: L/2d = volume de biogás em litros no período de 2 (dois) dias entre duas alimentações consecutivas.

1g SSV_{rem.} ⇒ 609mL CH₄ (0,375g x 26L / 16g ≈ 609mL CH₄)

p = 1,5gDQO/gSSV (lodo biológico)

0,25g CH₄/g DQO (digestão anaeróbia).



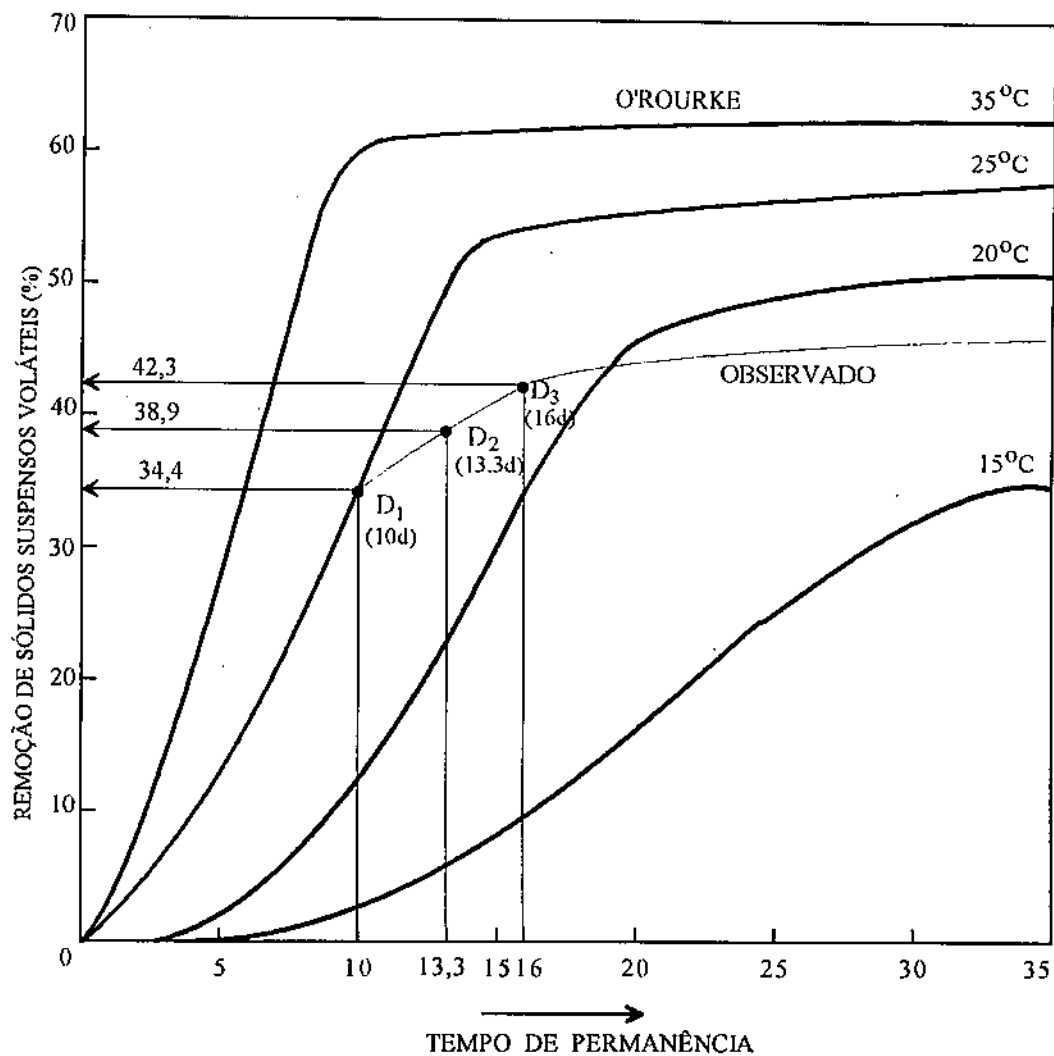


Figura 5.3 - Remoção de sólidos suspensos observados por O'ROURKE (1968) em função do tempo de permanência para diferentes temperaturas e valores experimentais observados na presente investigação.

5.3 - Teste de Bancada: Percolação, Evaporação e Secagem do Lodo.

Na investigação da secagem do lodo procurou-se comparar os tempos de percolação e evaporação da água para lodos estabilizados via aeróbia e anaeróbia respectivamente. Foram analisadas as propriedades mecânicas de 3 (três) amostras de lodo: (1) lodo aeróbio proveniente do digestor principal (LAE), (2) lodo anaeróbio retirado diretamente do digestor piloto (LDG) e, (3) lodo anaeróbio coletado do decantador acoplado ao sistema (LDD). Os testes de percolação e evaporação foram executados considerando-se dois processos sequenciais não simultâneos.

5.3.1 - Percolação.

No teste de percolação as amostras de lodo em estudo (LAE, LDG e LDD) foram submetidas a um processo de drenagem sobre um leito filtrante, onde parte da “água livre” do lodo era removida por gravidade.

A Tabela 5.10 apresenta os resultados do teste de percolação da água do lodo em função da carga de sólidos aplicada. Observa-se na Tabela 5.10 que a duplicação da carga aplicada na amostra de lodo estabilizado aerobicamente (LAE), levou a um aumento no tempo de percolação praticamente nas mesmas proporções. Já para o lodo anaeróbio (LDG e LDD) essa proporção não foi verificada. O acréscimo da carga de sólidos no lodo estabilizado anaerobiamente (LDD) proporcionou apenas um pequeno aumento no tempo de percolação, provavelmente devido ao grande tamanho dos grânulos, facilitando a percolação da água livre do lodo, conforme mostram os resultados experimentais.

TABELA 5.10 - Tempo de percolação em função da carga aplicada no teste.

AMOSTRA	CARGA APLICADA (kg/m ²)	TEMPO DE PERCOLAÇÃO (d)
(1) Lodo aeróbio (LAE)	11	5
(2) Lodo aeróbio (LAE)	25	12
(2) Lodo anaeróbio (LDG)	17	9
(3) Lodo anaeróbio (LDD)	24	13

Esses valores encontrados para o tempo de percolação (Tabela 5.10) em função da carga de sólidos aplicada, obedeceram à mesma relação quadrática (1) obtida por VAN HAANDEL *et al.* (1990), trabalhando com a digestão anaeróbia do lodo de excesso da CETREL.

$$T_{\text{per}} = a C_s + b C_s^2 \quad (1)$$

Onde:

T_{per} = tempo necessário para a percolação (d);

C_s = carga de sólidos aplicada (kg/m²);

a, b = constantes que variam dependendo do tipo de lodo.

Para as amostras em estudo, essas constantes variaram conforme os valores abaixo discriminados:

(a) Lodo anaeróbio:

$$a = 0,494 \quad e \quad b = 0,002$$

(b) Lodo aeróbio:

$$a = 0,434 \quad e \quad b = 0,002$$

5.3.2 - Evaporação e Secagem.

Determinou-se o tempo de evaporação para diferentes cargas de sólidos para as 3 (três) amostras de lodo pesando-se diariamente os tubos cilíndricos até a obtenção de um peso constante. As Tabelas 5.11, 5.12 e 5.13 apresentam os valores do peso líquido

das amostras de lodo em função do tempo de evaporação para lodos digeridos aerobiamente (Tab. 5.11) e anaerobiamente (Tab. 5.12 e 5.13). No teste utilizou-se 6 (seis) tubos cilíndricos, sendo um tubo “ZERO” necessário para medir a taxa de evaporação diária da água pura, e os demais (1 a 5) contendo as amostras para a investigação do tempo de remoção da água do lodo. (Vide Tabelas 5.11, 5.12 e 5.13).

Os números circunscritos de 0 a 5 representam os tubos de PVC de $19,6\text{cm}^2$ de área interna, utilizados no teste. Nas Tabelas 5.11, 5.12 e 5.13, observa-se que na coluna 2 (tubo “ZERO”) existem números entre parênteses. Esses números indicam quanto de água foi adicionado no tubo após a pesagem, para garantir uma taxa de evaporação acumulativa durante o experimento. Tomava-se essa providência segundo duas condições: (1) quando o peso total bruto do tubo (água + tubo) se igualava a tara do tubo “ZERO”, sinal de que toda a água armazenada no tubo havia evaporado ou (2) por medida de precaução, sempre que se percebia o abaixamento do nível da água no tubo. Assim, por exemplo, na Tabela 5.11 observa-se que no início do teste ($T_{\text{evap}} = 0$) o tubo ① continha 58,5g de água pura. Depois de um $T_{\text{evap}} = 5$ dias registrou-se um peso total do tubo igual ao peso do tubo seco (condição-1), o que significa dizer que naquele período de tempo toda a água havia evaporado ($\text{EVAP} = 58,5\text{g}$). Imediatamente após a pesagem do tubo, adicionou-se mais 57,7g de água no tubo ①, perfazendo um total de água armazenada de $57,7 + 0,0 = 57,7\text{g}$. Com um $T_{\text{evap}} = 6$ dias houve uma redução da quantidade de água para 48,0g ($\text{EVAP}_{\text{acum.}} = 68,2\text{g}$). Para um $T_{\text{evap}} = 11$ dias registrou-se apenas 24,8g ($\text{EVAP}_{\text{acum.}} = 91,4\text{g}$), sendo adicionado mais 39,3g (condição-2), perfazendo um total de água armazenada de $39,3 + 24,8 = 64,1\text{g}$. Com um $T_{\text{evap}} = 13$ dias registrou-se apenas 42,2g ($\text{EVAP}_{\text{acum.}} = 113,3\text{g}$), tendo-se esse valor reduzido para 22,4g num $T_{\text{evap}} = 15$ dias ($\text{EVAP}_{\text{acum.}} = 133,1\text{g}$). Pelas mesmas razões anteriores, adicionou-se mais 41,7g e assim sucessivamente.

Para os demais tubos (1 a 5) a rotina operacional consistia exclusivamente na retirada eventual dos anéis, naqueles tubos onde havia abaixamento do nível do lodo, sendo em seguida providenciada a pesagem de cada cilindro (sólidos + água + tubo). Esse procedimento exigia um controle operacional cuidadoso, pois o peso de cada tubo correspondente àquele(s) anel(is) removido(s) teria(am) que ser atualizado(s) dia-a-dia com seus respectivos descontos ($\text{Peso atual} = \text{Peso anterior} - \sum \text{peso dos anéis removidos}$).

Utilizando-se essa técnica foi possível determinar exatamente o peso líquido de cada amostra (peso dos sólidos + água do lodo nos cilindros), durante um período de 78 dias (31/08 a 17/11/95).

Analisando-se as Tabelas 5.11, 5.12 e 5.13, observa-se nas colunas de 3 a 7 um decréscimo no peso do lodo (sólidos + água) contido em cada tubo em função do aumento do tempo de evaporação. Quando toda água era removida (evaporação), o peso das amostras de lodo permanecia praticamente constante. Esse peso remanescente (estável) correspondia exatamente ao peso dos sólidos secos de cada amostra, podendo-se afirmar que aquele lodo já havia atingido o seu peso de sólidos secos (estabilizado) através da secagem ao ar livre.

As Tabelas 5.14, 5.15 e 5.16 apresentam os valores da umidade do lodo em função do tempo de evaporação. Esses valores foram obtidos utilizando-se a expressão abaixo apresentada por VAN HAANDEL & LETTINGA (1994):

$$H_a = (1 - P_s / P_t) \times 100 \quad \text{ou} \quad H_a = 100 - \% \text{ ST} \quad (2)$$

Onde:

H_a = umidade do lodo após um tempo t de evaporação, %;

P_s = massa de sólidos secos, g;

P_t = massa de lodo (= peso dos sólidos + água do lodo), g;

ST = sólidos totais.

Nas Figuras 5.4a, 5.4b e 5.4c estão plotados os valores numéricos das Tabelas 5.14, 5.15 e 5.16. Observa-se que quanto maior a carga de sólidos aplicado (C_s), maior será o tempo de evaporação para secagem do lodo. As Figuras acima referidas (Fig. 5.4a a 5.4c) permitem estimar o tempo de evaporação para as 3 (três) amostras de lodo em estudo. Genericamente (Ponto (A)) na Figura 5.4a, tem-se que para diferentes cargas aplicadas, C_s (kg/m^2), a umidade diminui do seu valor inicial $H_i\%$ para um valor final $H_f\%$ (desejado) durante um período de tempo de evaporação expresso diretamente no eixo das abcissas x (d).

Obtendo-se, experimentalmente, o tempo de percolação e evaporação da água do lodo, pode-se calcular o tempo total (T_{total}) necessário para a secagem do lodo em função da carga de sólidos aplicada até a obtenção da umidade desejada, através da seguinte expressão apresentada por VAN HAANDEL & LETTINGA (1994):

$$T_{total} = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \quad (3)$$

Onde:

- T_{total} = tempo total para obter a umidade desejada;
- T_1 = tempo para preparação do leito e descarga do lodo;
- T_2 = tempo de percolação do lodo;
- T_3 = tempo de evaporação (até a obtenção da umidade desejada);
- T_4 = tempo de retirada do lodo e limpeza do leito;
- $T_1 + T_4$ = 2 dias (valor estimado).

As Figuras 5.5a, 5.5b e 5.5c apresentam a relação entre o tempo de evaporação (T_3) em função da carga de sólidos para diferentes valores da umidade final. Esses gráficos foram construídos segundo o seguinte procedimento: (a) da eq. (1) foram determinados o tempo de percolação (T_2) para diferentes cargas de sólidos (C_s); (b) com o peso da massa de lodo mensurada diariamente através da pesagem dos tubos, obteve-se o tempo de evaporação (T_3) em função da umidade desejada (eq. (2)). Genericamente (Ponto (B)) na Figura 5.5a, tem-se que para diferentes cargas aplicadas, C_s (kg/m²), pode-se estimar o T_{total} ($= T_1 + T_2 + T_3 + T_4$) necessário para se atingir uma umidade desejada (10 - 80%). Projetando o Ponto (B) no sentido horizontal (y (d)) determina-se o valor T_3 . Com o mesmo procedimento obtém-se o valor $T_1 + T_2 + T_4$, a partir da projeção do ponto de interseção da curva ($T_2 = a C_s + b C_s^2$) com a carga de sólido aplicado, no eixo das ordenadas y (d).

Com base nas Figuras 5.5a, 5.5b e 5.5c foram plotados os valores da produtividade do leito ($P_{(u)} = C_s / T_{total}$) em função da carga de sólidos para diferentes valores da umidade final (ver Figuras 5.6a, 5.6b e 5.6c). Finalmente a investigação foi concluída com um estudo comparativo do percentual (%) de remoção da água do lodo entre as amostras e a viabilidade econômica com relação à área do leito, conforme mostram as Tabelas 5.17 e 5.18 e a Figura 5.7, que serão posteriormente discutidas.

TABELA 5.11 - Peso das amostras de lodo digerido aerobiamente em função do tempo de evaporação da água do lodo.

TEMPO DE EVAPORAÇÃO (d)	ÁGUA (g) ①	PESO DOS SÓLIDOS + ÁGUA DO LODO NOS CILINDROS (g)				
		①	②	③	④	⑤
0	58,5	102,6	241,2	341,8	489,0	724,4
1	45,1	92,4	228,0	324,1	469,2	709,8
4	3,4	62,6	194,8	286,9	426,0	659,3
5	(+ 57,7) 0,0	58,2	190,1	281,3	419,8	650,8
6	48,0	51,8	183,1	274,3	411,6	644,1
11	(+ 39,3) 24,8	29,4	160,3	251,4	380,6	634,3
13	42,2	18,0	147,9	240,2	366,8	621,8
15	(+ 41,7) 22,4	17,8	136,6	229,2	354,2	606,8
18	29,8	17,9	119,1	203,1	328,9	578,8
20	(+ 46,8) 11,8	17,8	110,9	201,7	311,8	568,3
22	(+ 25,5) 35,9	--	96,6	199,0	309,5	563,2
25	36,8	--	86,3	174,4	300,7	550,9
27	(+ 37,2) 20,4	--	79,3	167,5	295,5	543,7
32	(+ 54,6) 1,0	--	58,1	147,4	286,5	539,1
34	(+ 21,2) 32,8	--	46,9	135,6	281,7	534,5
36	(+ 23,4) 27,4	--	41,0	123,8	238,9	530,0
39	(+ 40,0) 13,5	--	40,4	109,5	215,2	519,0
40	42,2	--	40,7	106,4	212,5	506,5
41	(+ 26,4) 24,2	--	--	99,8	210,9	488,7
46	(+ 62,6) 0,0	--	--	85,1	181,8	479,4
48	29,7	--	--	78,9	172,5	466,9
49	(+ 40,4) 14,9	--	--	75,2	167,2	451,8
53	(+ 62,2) 0,0	--	--	60,6	151,3	439,2
55	35,5	--	--	59,4	142,3	431,6
56	(+ 31,2) 24,9	--	--	59,5	137,9	428,7
61	(+ 60,8) 0,0	--	--	--	116,6	411,8
63	(+ 37,2) 22,7	--	--	--	109,2	396,2
68	(+ 61,4) 2,5	--	--	--	97,4	384,1
69	46,1	--	--	--	93,4	372,7
71	29,5	--	--	--	89,5	359,9
74	(+ 52,3) 10,7	--	--	--	84,7	329,7
77	(+ 36,5) 24,1	--	--	--	84,6	321,2
78	32,8	--	--	--	84,7	300,5
PESO SÓLIDOS (g)		17,8	41,8	59,3	84,8	125,6
CARGA SÓLIDOS (kg/m ²)		9,1	21,3	30,3	43,3	64,1

TABELA 5.12 - Peso das amostras de lodo digerido anaerobiamente em função do tempo de evaporação da água do lodo.

TEMPO DE EVAPORAÇÃO (d)	ÁGUA (g) △	PESO DOS SÓLIDOS + ÁGUA DO LODO NOS CILINDROS (g)				
		△	△	△	△	△
0	51,6	99,6	248,5	345,3	538,8	708,4
1	49,0	90,7	231,3	330,4	517,9	687,2
4	19,2	56,0	189,3	293,0	473,2	619,0
5	(+ 48,3) 14,4	49,7	180,7	287,0	464,6	593,7
6	53,4	41,3	168,9	279,2	453,4	558,2
11	(+ 35,1) 29,7	18,7	142,4	231,8	414,8	479,1
13	43,5	7,3	121,7	209,1	394,6	457,9
15	(+ 42,1) 23,9	7,3	105,4	183,4	373,5	435,9
18	32,2	7,4	65,8	141,4	338,6	408,7
20	(+ 46,9) 14,4	7,5	52,9	126,4	321,6	399,2
22	(+ 26,8) 39,1	--	39,4	112,3	300,5	393,2
25	38,4	--	28,3	98,4	280,6	387,3
27	(+ 33,2) 23,2	--	20,0	78,2	262,0	381,6
32	(+ 53,8) 2,7	--	18,3	41,7	221,6	376,1
34	(+ 43,6) 12,5	--	18,4	31,4	202,3	370,7
36	(+ 20,2) 28,4	--	--	25,9	175,6	355,5
39	(+ 44,3) 10,7	--	--	25,7	143,6	332,7
40	45,7	--	--	25,4	137,9	303,5
41	(+ 25,1) 25,3	--	--	--	124,7	277,5
46	(+ 65,0) 0,0	--	--	--	78,8	240,3
48	28,1	--	--	--	60,2	229,6
49	(+ 48,3) 11,4	--	--	--	51,1	215,4
53	(+ 65,8) 0,0	--	--	--	40,8	173,0
PESO SÓLIDOS (g)		7,3	18,2	25,3	39,5	51,9
CARGA SÓLIDOS (kg/m ²)		3,7	9,3	12,9	20,2	26,5

TABELA 5.13 - Peso das amostras de lodo anaeróbio decantado em função do tempo de evaporação da água do lodo.

TEMPO DE EVAPORAÇÃO (d)	ÁGUA (g) [0]	PESO DOS SÓLIDOS + ÁGUA DO LODO NOS CILINDROS (g)				
		[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
0	57,3	105,6	257,4	366,2	476,7	679,4
1	(+ 16,7) 44,9	87,4	233,3	339,2	444,7	635,5
6	(+ 64,3) 0,0	26,6	152,3	244,4	341,9	606,0
8	(+ 34,7) 29,1	14,3	118,6	194,3	304,2	582,8
13	(+ 64,0) 2,5	14,4	83,1	127,0	246,4	575,5
14	47,7	14,3	77,2	119,7	239,5	561,3
16	27,9	--	70,3	111,7	231,7	554,5
19	(+ 60,3) 6,7	--	63,8	104,4	225,3	525,9
22	(+ 38,2) 23,1	--	46,5	88,8	194,4	508,3
23	35,2	--	34,7	79,9	185,2	469,2
26	(+ 62,5) 6,8	--	34,5	72,3	176,6	448,5
28	52,0	--	34,5	57,6	150,6	412,2
29	42,1	--	--	49,3	127,8	389,4
30	(+44,4) 24,6	--	--	49,3	113,1	366,0
34	23,9	--	--	49,2	64,3	314,4
PESO SÓLIDOS (g)		14,2	34,7	49,3	64,2	91,5
CARGA SÓLIDOS (kg/m ²)		7,2	17,7	25,2	32,8	46,7

TABELA 5.14 - Umidade do lodo aeróbio em função do tempo de evaporação.

TEMPO (d)	% UMIDADE DO LODO				
	①	②	③	④	⑤
0	82,7	82,7	82,7	82,7	82,7
1	80,7	81,7	81,7	81,9	82,3
4	71,6	78,5	79,3	80,1	80,9
5	69,4	78,0	78,9	79,8	80,7
6	65,6	77,2	78,4	79,4	80,5
11	39,5	73,9	76,4	77,7	80,2
13	1,1	71,7	75,3	76,9	79,8
15	0,0	69,4	74,1	76,1	79,3
18	--	64,9	70,8	74,2	78,3
20	--	62,3	70,6	72,8	77,9
22	--	56,7	70,2	72,6	77,7
25	--	51,6	66,0	71,8	77,2
27	--	47,3	64,6	71,3	76,9
32	--	28,1	59,8	70,4	76,7
34	--	10,9	56,3	69,9	76,5
36	--	0,0	52,1	64,5	76,3
39	--	--	45,8	60,6	75,8
40	--	--	44,3	60,1	75,2
41	--	--	40,6	59,8	74,3
46	--	--	30,3	53,4	73,8
48	--	--	24,8	50,8	73,1
49	--	--	21,1	49,3	72,2
53	--	--	0,0	44,0	71,4
55	--	--	--	40,4	70,9
56	--	--	--	38,5	70,7
61	--	--	--	27,3	69,5
63	--	--	--	22,3	68,3
68	--	--	--	12,9	67,3
69	--	--	--	9,2	66,3
71	--	--	--	5,3	65,1
74	--	--	--	0,0	61,9
77	--	--	--	--	60,9
78	--	--	--	--	58,2

TABELA 5.15 - Umidade do lodo anaeróbio (digestor) em função do tempo de evaporação.

TEMPO (d)	% UMIDADE DO LODO				
	△1	△2	△3	△4	△5
0	92,7	92,7	92,7	92,7	92,7
1	92,0	92,1	92,3	92,4	92,4
4	87,0	90,4	91,4	91,7	91,6
5	85,3	89,9	91,2	91,5	91,3
6	82,3	89,2	90,9	91,3	90,7
11	61,0	87,2	89,1	90,5	89,2
13	0,0	85,0	87,9	90,0	88,7
15	--	82,7	86,2	89,4	88,1
18	--	72,3	82,1	88,3	87,3
20	--	65,6	80,0	87,7	87,0
22	--	53,8	77,5	86,9	86,8
25	--	35,7	74,3	85,9	86,6
27	--	0,0	67,6	84,9	86,4
32	--	--	39,3	82,2	86,2
34	--	--	19,4	80,5	86,0
36	--	--	0,0	77,5	85,4
39	--	--	--	72,5	84,4
40	--	--	--	71,4	82,9
41	--	--	--	68,3	81,3
46	--	--	--	49,9	78,4
48	--	--	--	34,4	77,4
49	--	--	--	22,7	75,9
53	--	--	--	0,0	70,0

TABELA 5.16 - Umidade do lodo anaeróbio (decantador) em função do tempo de evaporação.

TEMPO (d)	% UMIDADE DO LODO				
	1	2	3	4	5
0	86,5	86,5	86,5	86,5	86,5
1	83,8	85,1	85,5	85,6	85,6
6	46,6	77,2	79,8	81,2	84,9
8	0,0	70,7	74,6	78,9	84,3
13	--	58,2	61,2	73,9	84,1
14	--	55,1	58,8	73,2	83,7
16	--	50,6	55,9	72,3	83,5
19	--	45,6	52,8	71,5	82,6
22	--	25,4	44,5	67,0	82,0
23	--	0,0	38,3	65,3	80,5
26	--	--	31,8	63,6	79,6
28	--	--	14,4	57,4	77,8
29	--	--	0,0	49,8	76,5
30	--	--	--	43,2	75,0
34	--	--	--	0,0	70,9

$$\% H_x = [1 - (P_s / P_t)] \times 100$$

TABELA 5.17 - % Remoção da água do lodo aeróbio e anaeróbio respectivamente através da secagem ao ar livre (evaporação), utilizando tubos cilíndricos com área de 19,6 cm².

TEMPO (d)	LODO AERÓBIO (%)					LODO ANAERÓBIO (%)				
	①	②	③	④	⑤	△1	△2	△3	△4	△5
1	9,9	5,5	5,2	4,0	2,0	8,9	6,9	4,3	3,9	3,0
4	39,0	19,2	16,1	12,9	9,0	43,8	23,8	15,1	12,2	12,6
5	43,3	21,2	17,7	14,2	10,2	50,1	27,3	16,9	13,8	16,2
6	49,5	24,1	19,7	15,8	11,1	58,5	32,0	19,1	15,9	21,2
11	71,3	33,5	26,4	22,2	12,4	81,2	42,7	32,9	23,0	32,4
13	82,5	38,7	29,7	25,0	14,2	92,7	51,0	39,4	26,8	35,4
15	82,7	43,4	32,9	27,6	16,2	92,7	57,6	46,9	30,7	38,5
18	82,6	50,6	40,6	32,7	20,1	92,6	73,5	59,1	37,2	42,3
20	82,7	54,0	41,0	36,2	21,5	92,5	78,7	63,4	40,3	43,6
22	--	60,0	41,8	36,7	22,3	--	84,1	67,5	44,2	44,5
25	--	64,2	49,0	38,5	24,0	--	88,6	71,5	47,9	45,3
27	--	67,1	51,0	39,6	24,9	--	92,0	77,4	51,4	46,1
32	--	75,9	56,9	41,4	25,6	--	92,6	87,9	58,9	46,9
34	--	80,6	60,3	42,4	26,2	--	93,0	90,9	62,5	47,7
36	--	83,0	63,8	51,1	26,8	--	--	92,5	67,4	49,8
39	--	83,3	68,0	56,0	28,4	--	--	92,6	73,3	53,0
40	--	83,1	68,9	56,5	30,1	--	--	92,6	74,4	57,0
41	--	--	70,8	56,9	32,5	--	--	--	76,9	60,8
46	--	--	75,1	62,8	33,8	--	--	--	85,4	66,1
48	--	--	76,9	64,7	35,5	--	--	--	88,8	67,6
49	--	--	78,0	65,8	37,6	--	--	--	90,5	69,6
53	--	--	82,3	69,1	39,4	--	--	--	92,4	75,6
55	--	--	82,6	70,9	40,4	--	--	--	--	--
56	--	--	82,6	71,8	40,8	--	--	--	--	--
61	--	--	--	76,2	43,2	--	--	--	--	--
63	--	--	--	77,7	45,3	--	--	--	--	--
68	--	--	--	80,1	47,0	--	--	--	--	--
69	--	--	--	80,9	48,6	--	--	--	--	--
71	--	--	--	81,7	50,3	--	--	--	--	--
74	--	--	--	82,7	54,5	--	--	--	--	--
77	--	--	--	82,7	55,7	--	--	--	--	--
78	--	--	--	82,7	58,5	--	--	--	--	--

TABELA 5.18 - % Remoção da água do lodo anaeróbio decantado através da secagem ao ar livre (evaporação), utilizando tubos cilíndricos com área de 19,6 cm².

TEMPO (d)	LODO ANAERÓBIO DECANTADO (%)				
	1	2	3	4	5
1	17,2	9,4	7,4	6,7	6,5
6	74,8	40,8	33,3	28,3	10,8
8	86,5	53,9	46,9	36,2	14,2
13	86,4	67,7	65,3	48,3	15,3
14	86,5	70,0	67,3	49,8	17,4
16	--	72,7	69,5	51,4	18,4
19	--	75,2	71,5	52,7	22,6
22	--	81,9	75,8	59,2	25,2
23	--	86,5	78,2	61,1	30,9
26	--	86,6	80,3	63,0	34,0
28	--	86,6	84,3	68,4	39,3
29	--	--	86,5	73,2	42,7
30	--	--	86,5	76,3	46,1
34	--	--	86,6	86,5	53,7

LODO AERÓBIO
(Digestor)

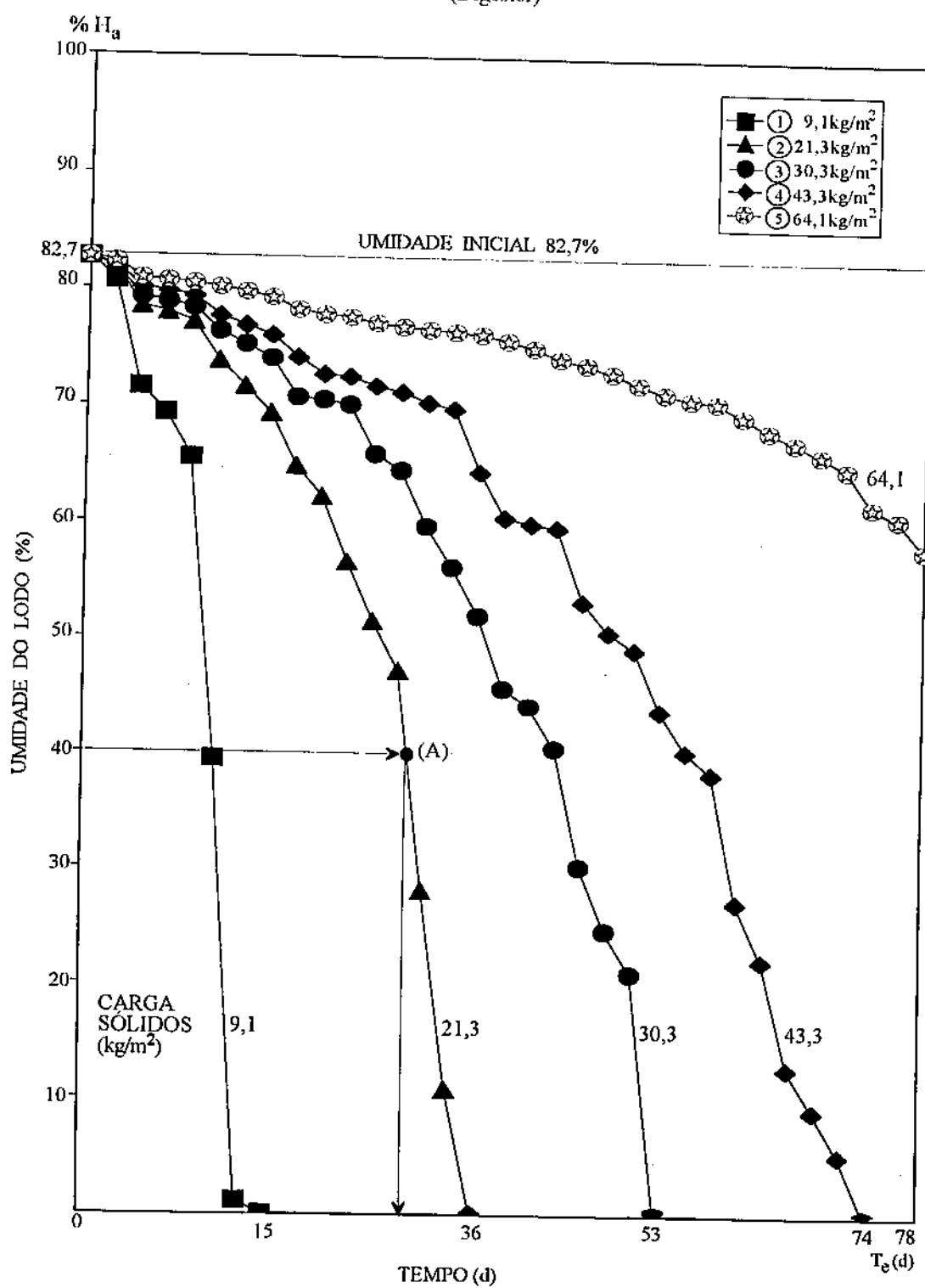


Figura 5.4a - Umidade do lodo em função do tempo de evaporação para diferentes cargas de lodo digerido aerobiamente.

LODO ANAERÓBIO
(Digestor)

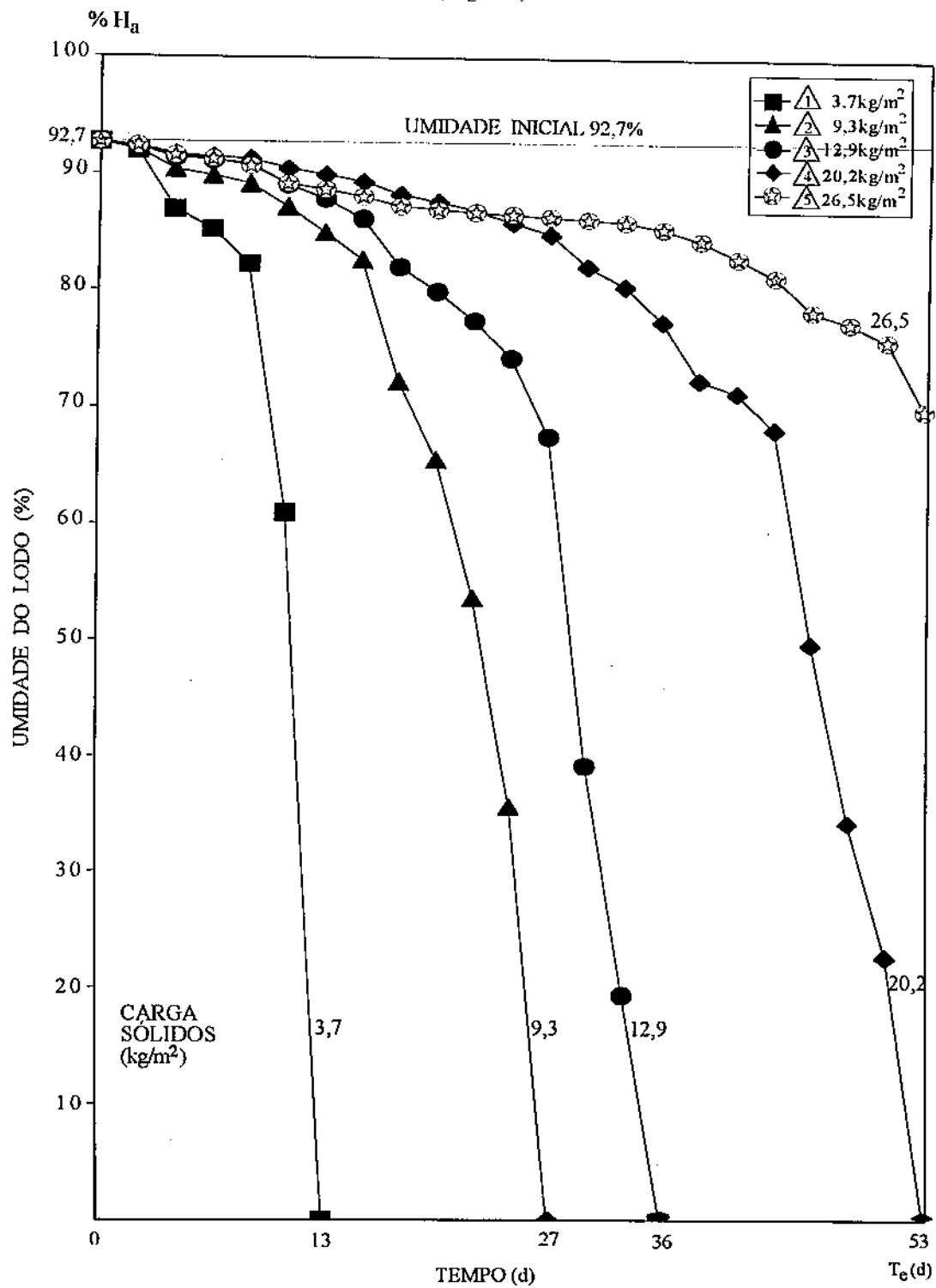


Figura 5.4b - Umidade do lodo em função do tempo de evaporação para diferentes cargas de lodo digerido anaerobiamente. (lodo do digestor em escala piloto)

LODO ANAERÓBIO DECANTADO

(Decantador)

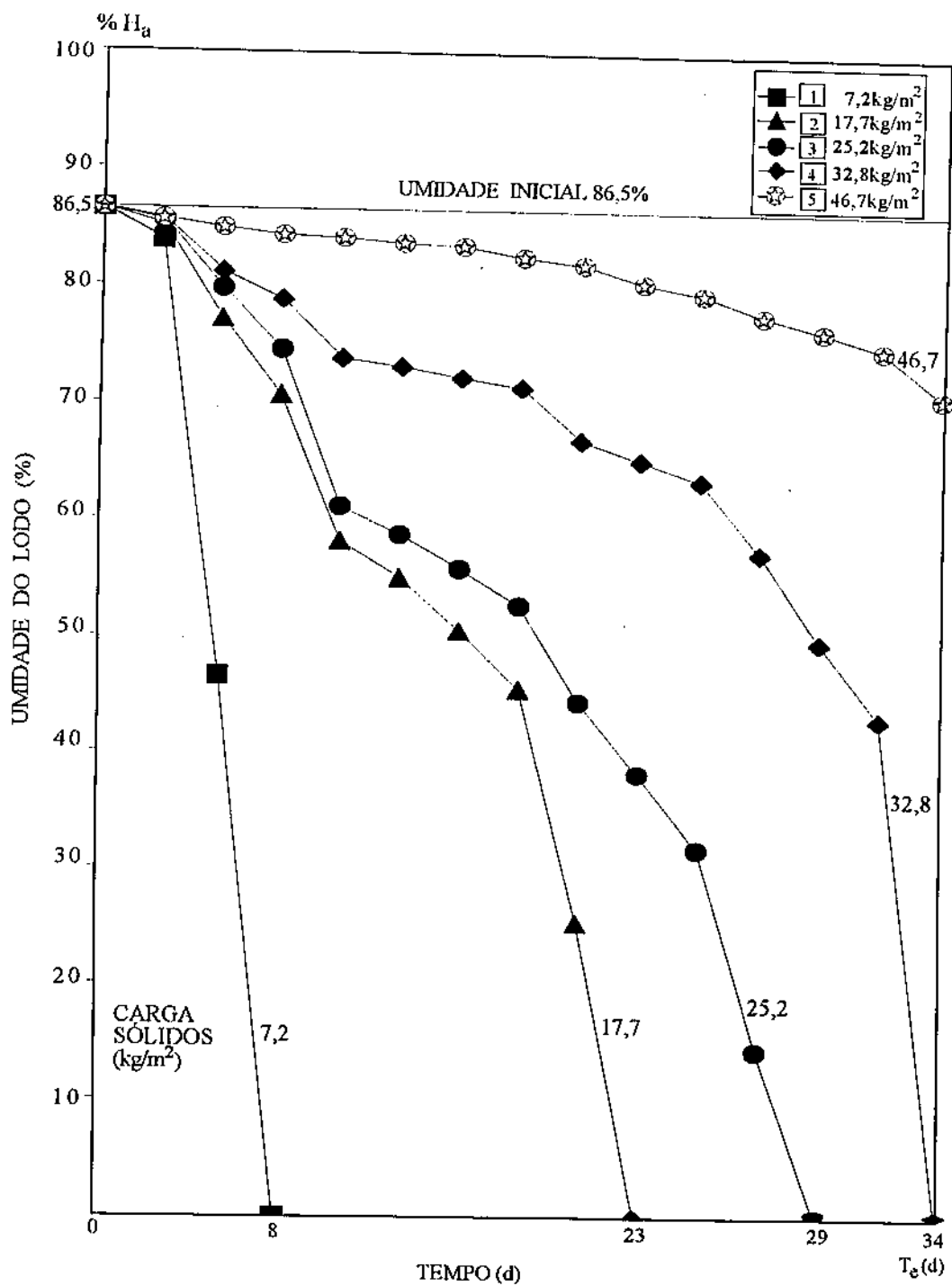


Figura 5.4c - Umidade do lodo em função do tempo de evaporação para diferentes cargas de lodo digerido anaerobiamente. (lodo do decantador).

LODO AERÓBIO
(Digestor)

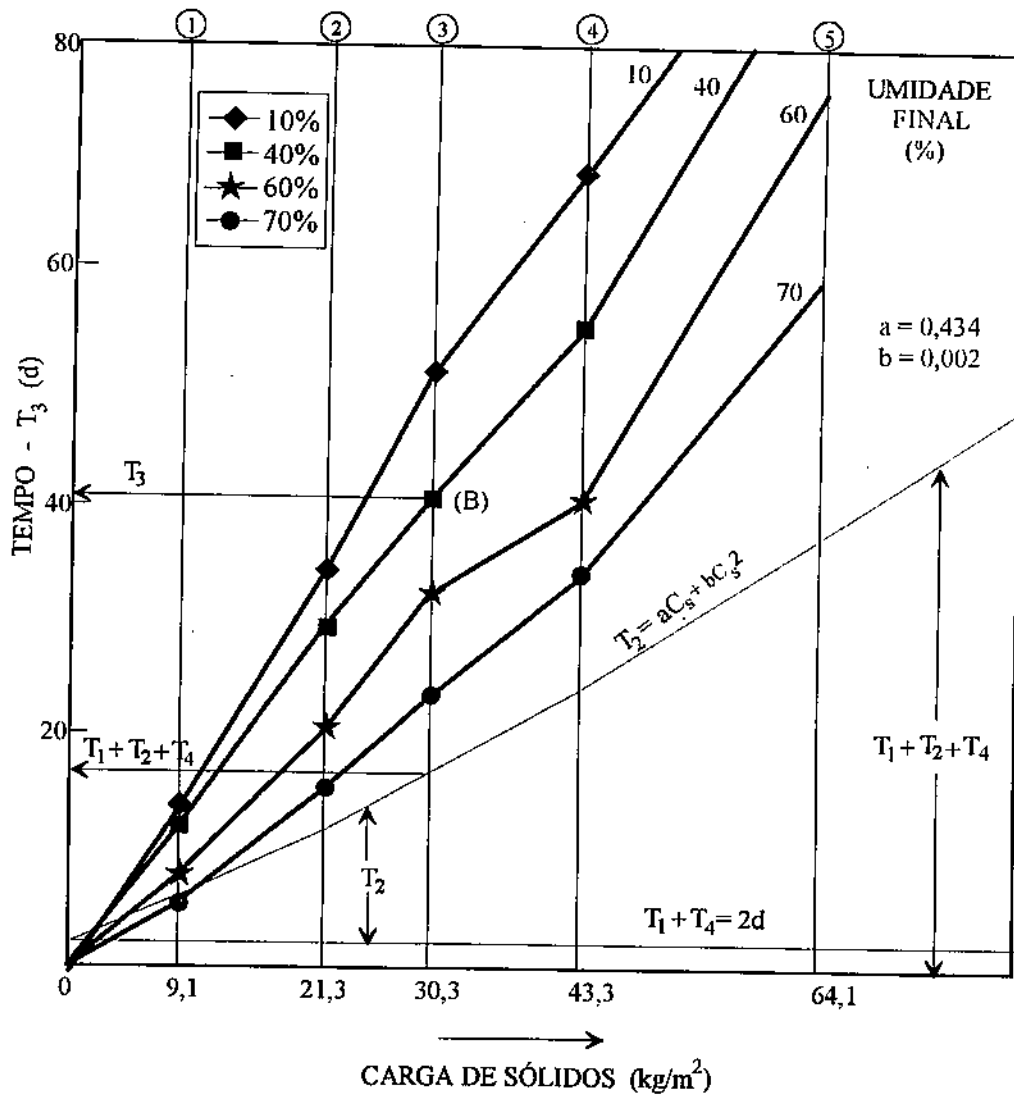


Figura 5.5a - Tempo de evaporação em função da carga de sólidos para diferentes valores da umidade final (70 a 10%). Os tempos para percolação, alimentação e retirada do lodo também estão indicados.

LODO ANAERÓBIO
(Digestor)

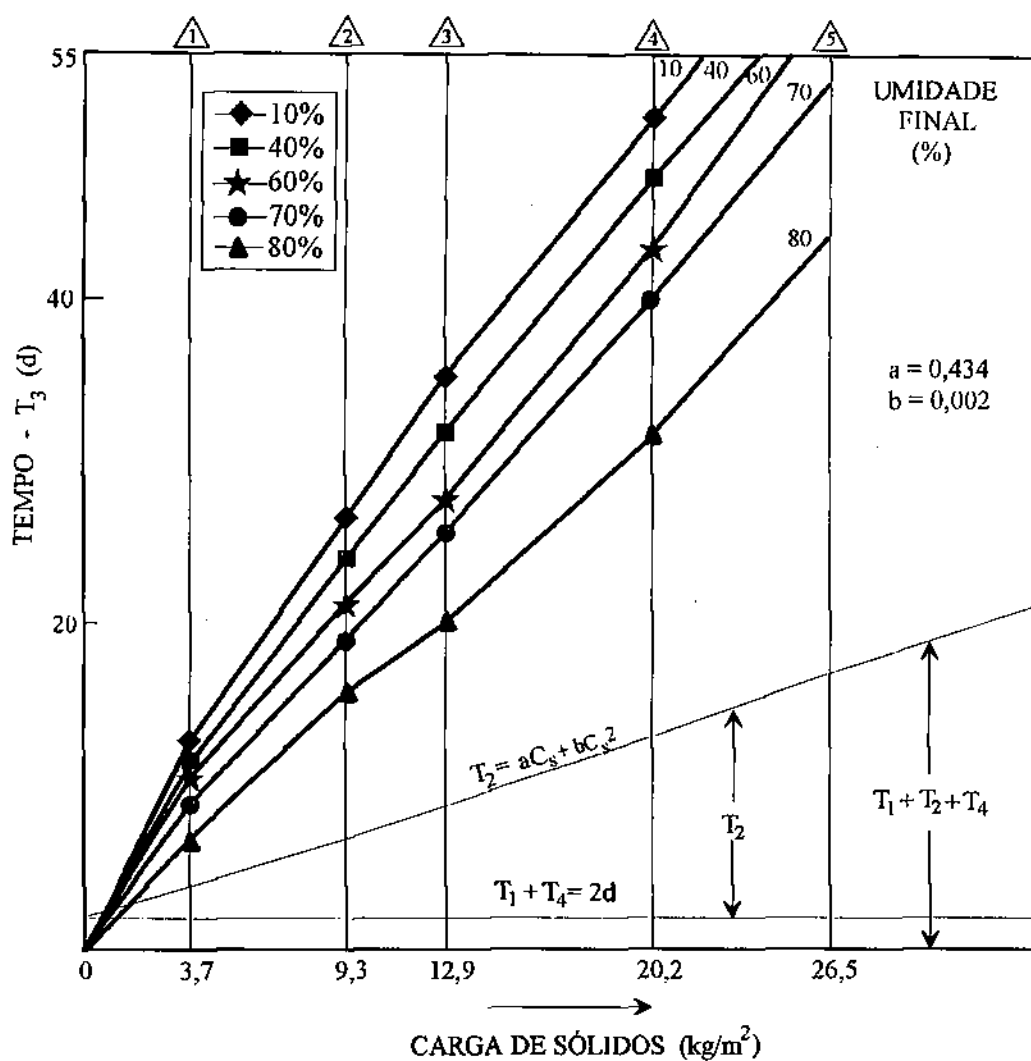


Figura 5.5b - Tempo de evaporação em função da carga de sólidos para diferentes valores da umidade final (80 a 10%). Os tempos para percolação, alimentação e retirada do lodo também estão indicados.

LODO ANAERÓBIO
(Decantador)

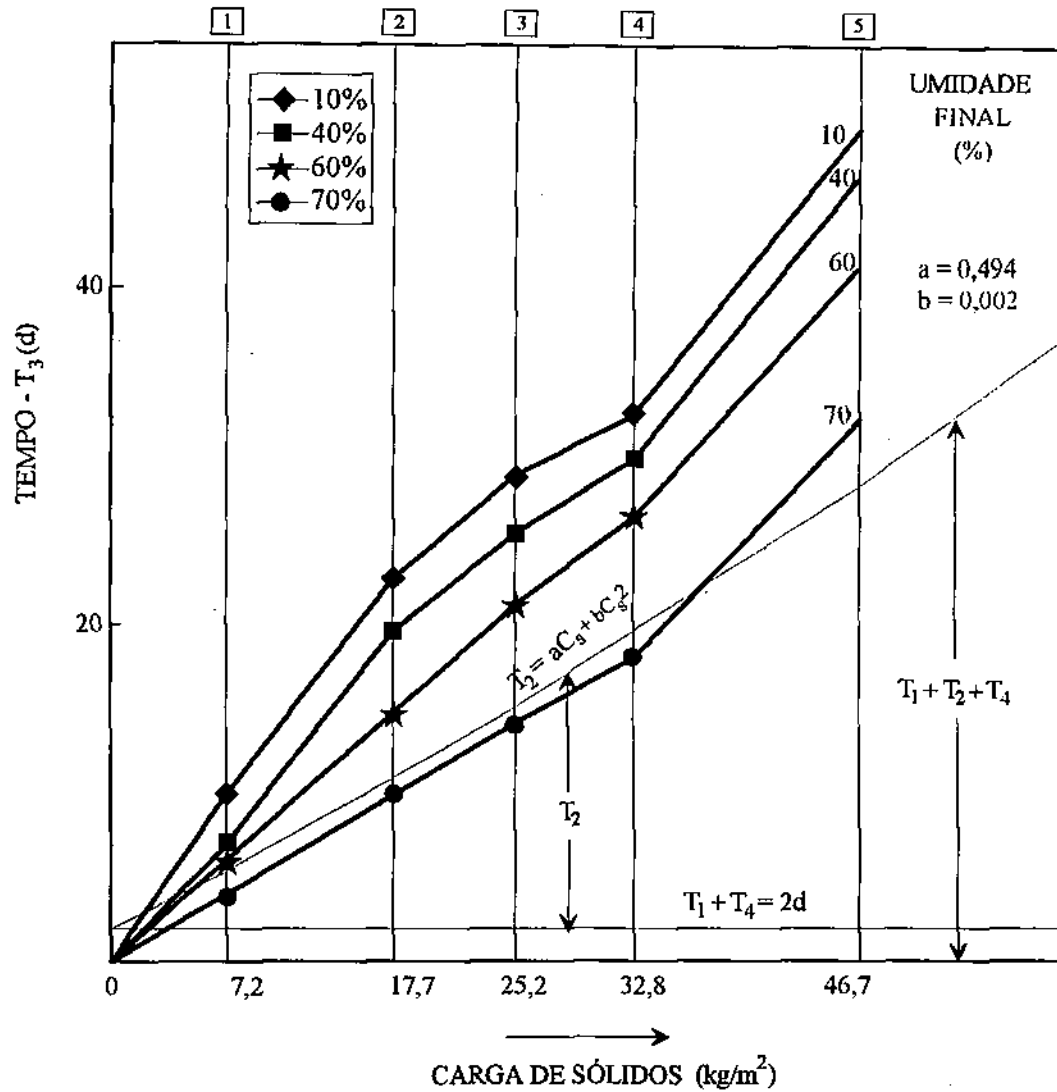


Figura 5.5c - Tempo de evaporação em função da carga de sólidos para diferentes valores da umidade final (70 a 10%). Os tempos para percolação, e alimentação e retirada do lodo também estão indicados.

LODO AERÓBIO
(Digestor)

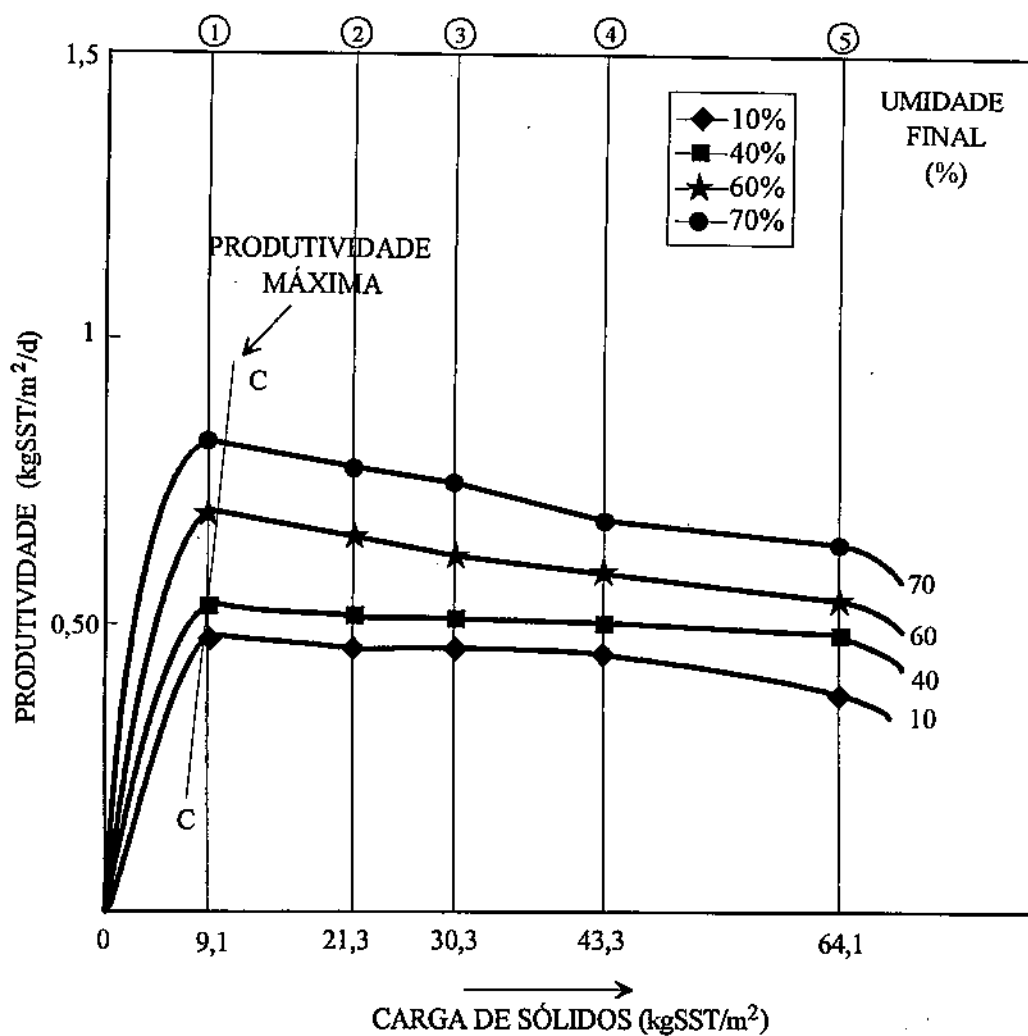


Figura 5.6a - Produtividade em função da carga de sólidos para diferentes valores da umidade final (10 a 70%).

LODO ANAERÓBIO
(Digestor)

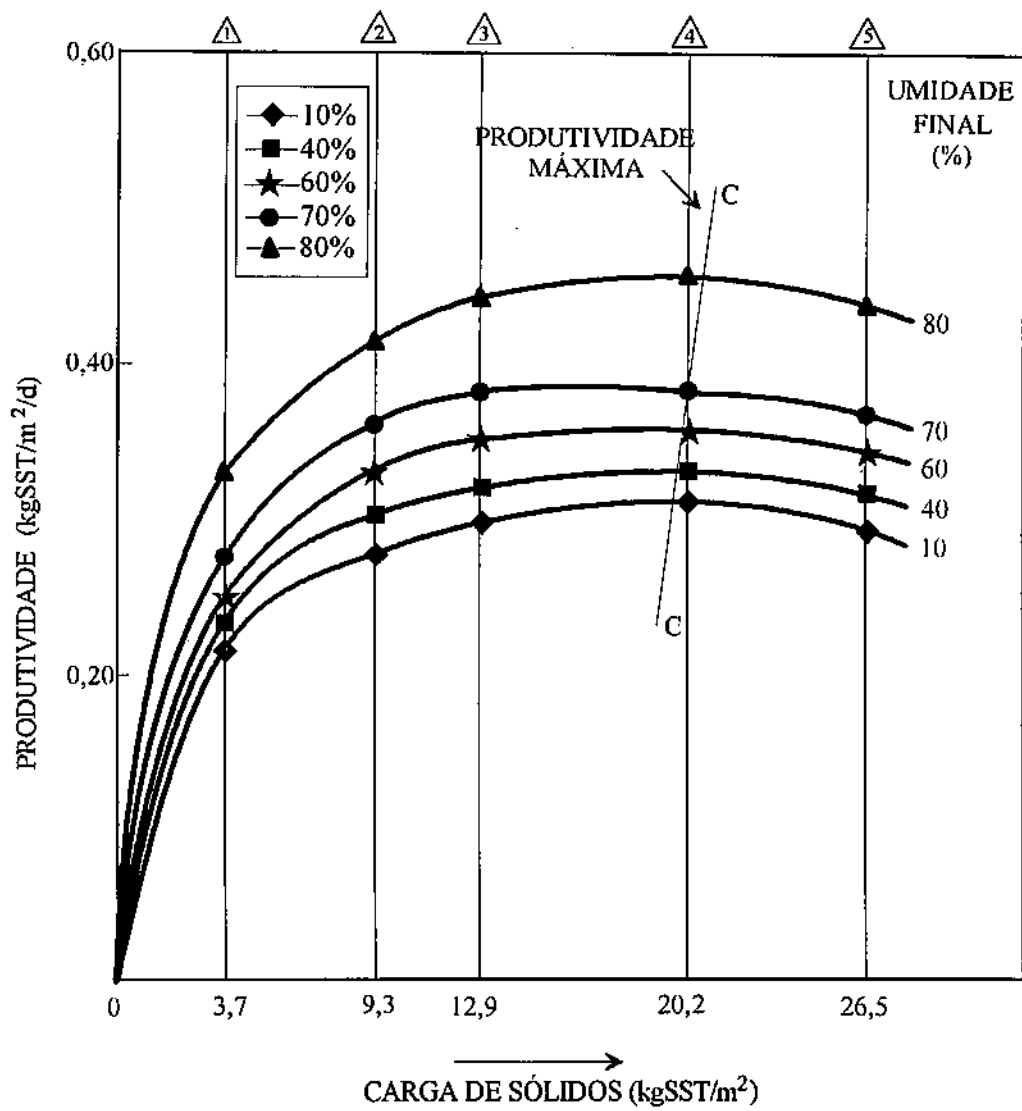


Figura 5.6b - Produtividade em função da carga de sólidos para diferentes valores da umidade final (10 a 80%).

LODO ANAERÓBIO
(Decantador)

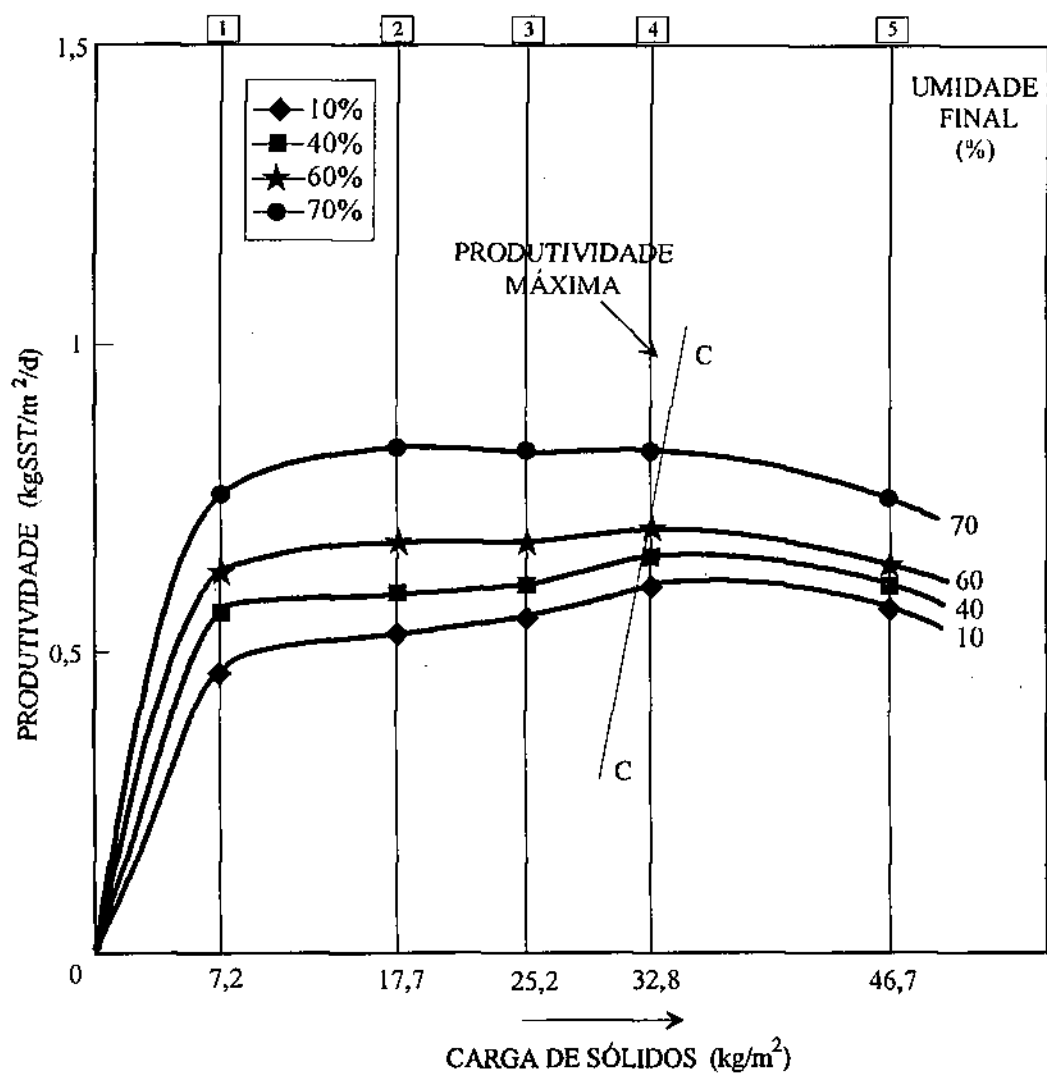


Figura 5.6c - Produtividade em função da carga de sólidos para diferentes valores da umidade final (10 a 70%).

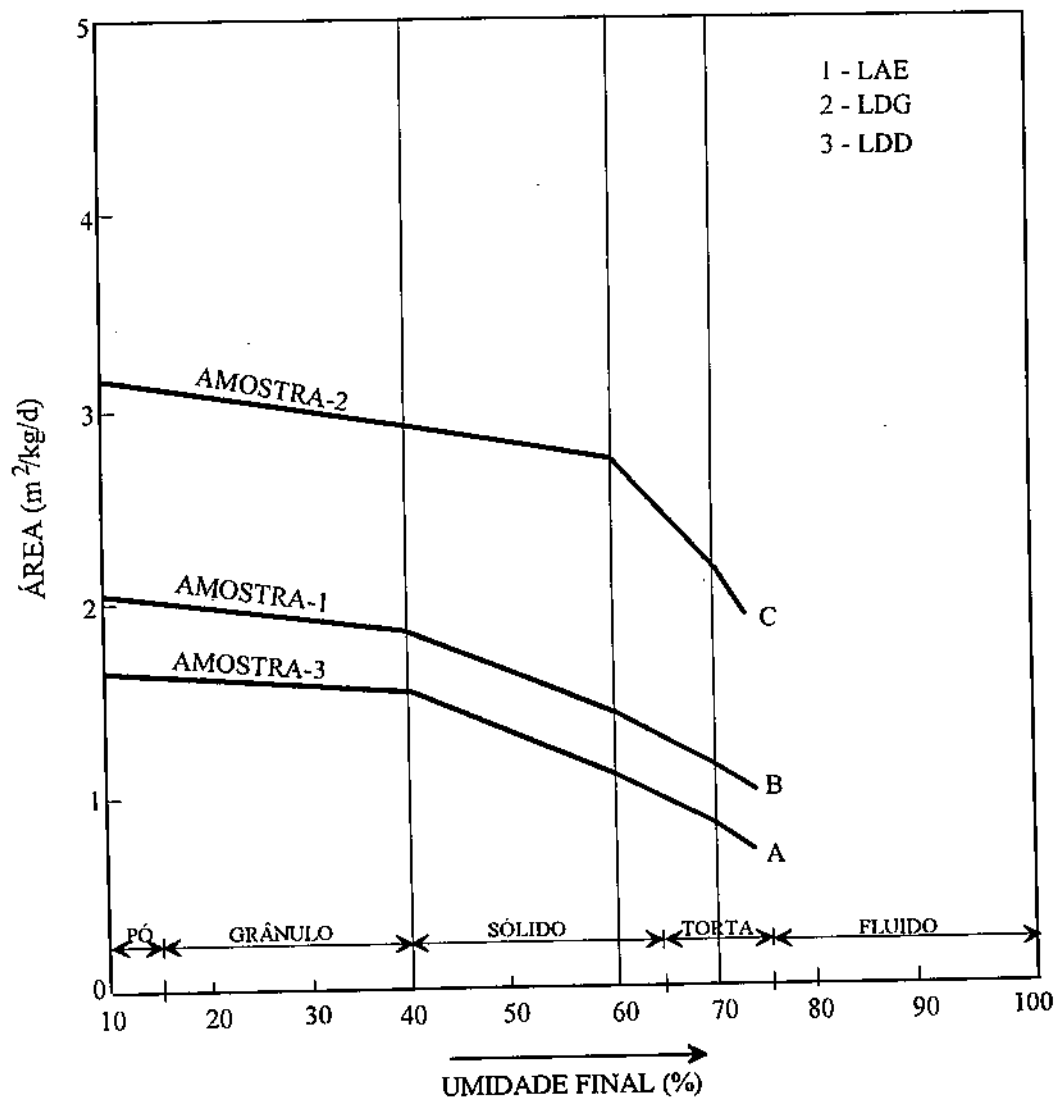


Figura 5.7 - Estimativa de área do leito para se processar uma unidade de massa de sólidos secos por dia em função da umidade do lodo.

CAPÍTULO 6

6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1 - Considerações Gerais.

O digestor piloto da CETREL esteve em operação durante um período de 315 (trezentos e quinze) dias. Durante esse período foram investigadas a eficiência da digestão anaeróbia na estabilização do lodo de excesso produzido na CETREL e as propriedades mecânicas do lodo estabilizado.

Para execução dessa tarefa foram observados os seguintes parâmetros: estabilidade do pH, remoção de sólidos voláteis, nutrientes e produção de biogás; percolação, evaporação e secagem do lodo estabilizado. Estes parâmetros informavam o desempenho do sistema em estudo, fornecendo as condições para análise de sua eficiência.

6.2 - Viabilidade Técnica da Digestão.

6.2.1 - Estabilidade do pH no Digestor Piloto.

Durante a partida do digestor piloto a maior atenção foi dada à obtenção de um lodo metanogênico de alta atividade a partir do lodo de excesso da CETREL, de acordo com o plano adotado de não utilização de inóculo externo. Essa estratégia foi

adotada devido a dois fatores: (1) não se dispunha de inóculo metanogênico externo e, (2) melhorar a simulação do sistema, objetivando uma operação semelhante a um digestor em escala real, que provavelmente não será inoculado.

Os parâmetros operacionais observados ao longo da operação do sistema demonstraram que a partida do digestor piloto se desenvolveu bem. Conseguiu-se operar o digestor com um tempo de permanência curto de 10 (dez) dias, sem que houvesse necessidade de uma adição contínua de alcalinidade externa. Cal era adicionada em situações esporádicas quando o pH oscilava entre 6,5 e 6,7.

O amadurecimento do lodo e, provavelmente, a ausência de cargas tóxicas contribuíram efetivamente para a estabilidade do pH. De modo correspondente, o tempo de mistura também teve uma parcela de contribuição.

Inicialmente cogitava-se que um tempo de recirculação de 1 (uma) hora após a alimentação seria suficiente para promover uma mistura completa do conteúdo do digestor através da dissipação de 31w/m^3 . Mas como o lodo anaeróbio exibe boas características de sedimentabilidade e como o fluxo de recirculação ascendente (LR-⊙) ainda favorecia o surgimento de zonas mortas dentro do digestor, constatou-se a formação de uma camada de espuma, nitidamente comprovada pela obstrução na entrada da tubulação do efluente digerido, demonstrando com isso que não havia mistura completa. Tentou-se eliminar o problema aumentando-se gradativamente o tempo de recirculação. Após a adoção desse procedimento, observou-se uma redução da camada de espuma para um tempo de 2 (duas) horas. Posteriormente, adotou-se um tempo ainda maior de 4 (quatro) horas por dia, tendo-se verificado que sob essa nova condição operacional já não havia mais formação de espuma e que a concentração de ácidos voláteis se reduzia substancialmente. Nessa fase ficou claramente estabelecido (ver Tabela 5.1) que a razão entre ácidos voláteis (AV) e a alcalinidade total (AT) já era menor que 0,35. Para um tempo máximo de mistura de 8 (oito) horas diárias, constatou-se uma melhor homogeneização do lodo atribuída à boa característica do efluente, considerada como indicativo das condições de mistura do digestor. Verificou-se, também, uma tendência de redução ainda maior da razão AV/AT, tendo-se registrado valores em torno de 0,15, ou seja, uma concentração de ácidos voláteis apenas

de 15% da alcalinidade total, o que é extremamente satisfatório para a estabilidade do pH. Tal fato é um demonstrativo claro de que uma boa mistura do lodo no digestor melhora o seu desempenho.

No Quadro 6.1 observa-se claramente a viabilidade técnica do processo de digestão anaeróbia. Os parâmetros operacionais, obtidos via experimento, endossam esta afirmativa.

QUADRO 6.1 - Valores médios mensais relacionados à estabilidade do pH na unidade piloto.

PARÂMETRO MÊS	ESTABILIDADE DO pH			
	pH	AT (mgCaCO ₃ /L)	AB (mgCaCO ₃ /L)	AV (mg/L)
JAN.	6,67	1454	373	1540
FEV.	6,72	1881	768	1590
MAR.	6,74	2015	846	1670
ABR.	6,83	2003	1067	1338
MAI.	6,77	2054	1043	1415
JUN.	6,69	3000	996	1576
JUL.	6,94	2869	2144	1036
AGO.	7,08	2983	2633	499
SET. Ⓢ	7,00	2845	2427	597
OUT.	6,93	2650	2092	804

AT = Alcalinidade Total

AB = Alcalinidade de Bicarbonato

AV = Ácidos Voláteis

Nota: Ⓢ = Carga tóxica.

Conseguiu-se provar que a composição do lodo de excesso da CETREL é perfeitamente digerível à temperatura ambiental, prevalescente na CETREL (30 a 35°C) não se registrando nenhuma ocorrência que pudesse levar à instabilidade do processo. Vê-se no Quadro 6.1 que, depois do 7º mês de operação, constatou-se uma excelente estabilidade do pH ($pH_{ot} \approx 7,0$) em decorrência da redução dos ácidos voláteis ($AV < 1000$ mg/L), o que representa um resultado expressivo, sobretudo quanto ao fator

custo, não sendo necessário incrementar ao sistema nenhuma adição de alcalinizante externo.

Quanto à estabilidade do pH, observa-se nas Fig. 5.1a, 5.1b e 5.1c que o sistema apresentou uma boa assimilação da carga orgânica, apesar de se esperar a presença de substâncias tóxicas no lodo que poderiam eventualmente provocar um desequilíbrio no digestor. A estabilidade do sistema era de certa forma esperada a longo prazo, tendo em vista que, o crescimento gradativo do lodo metanogênico produzia respectivamente um aumento da alcalinidade interna, capaz de reduzir os ácidos voláteis, o que provavelmente contribuiu para a obtenção de uma satisfatória “performance” do digestor a partir do 7º mês de operação. O bom desempenho do digestor piloto mostra que eventuais materiais tóxicos puderam ser assimilados ou absorvidos sem problemas.

6.2.2 - Eficiência da Digestão do Lodo no Digestor Piloto.

Inicialmente as cargas aplicadas eram baixas e, à medida que eram obtidas respostas favoráveis, a ponto de ser considerado um certo nível de estabilização, procedia-se um aumento das cargas orgânica e hidráulica no digestor. Observa-se na Tabela 5.3 que o aumento gradativo da vazão afluente e, conseqüentemente, da carga orgânica (ver Tabela 4.3) levava a uma redução da remoção de sólidos voláteis.

A média de remoção de sólidos apresentada pelo digestor anaeróbio piloto variou em torno de 28% para sólidos suspensos totais (SST), 30% para sólidos suspensos voláteis (SSV) e 20% para sólidos suspensos fixos (SSF) (ver Quadro 6.2). Esses valores foram obtidos a partir do estabelecimento do estado estacionário (16/06/95), o que evidenciou um equilíbrio do sistema, demonstrando sua capacidade de aclimatação do processo, frente ao aumento da taxa de carregamento orgânico e hidráulico.

QUADRO 6.2 - Valores médios mensais relacionados à eficiência de digestão na unidade piloto.

PARÁ-METRO MÊS	EFICIÊNCIA DA DIGESTÃO										
	SST (g/L)			SSV (g/L)			SSF (g/L)			DQO (mg/L)	
	AFLU.	EFLU.	% REM.	AFLU.	EFLU.	% REM.	AFLU.	EFLU.	% REM.	AFLU.	EFLU.
JAN. (*)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
FEV. (*)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
MAR. (*)	40,13	2,28	--	23,1	1,81	--	13,0	0,47	--	--	--
ABR. (*)	24,83	2,40	--	16,1	1,66	--	8,8	0,74	--	--	--
MAI. (*)	25,33	6,94	--	16,4	4,32	--	9,0	2,63	--	527	3025
JUN. (*)	30,85	16,20	--	28,5	13,53	--	7,5	2,67	--	443	2652
JUL. (Δ)	44,83	32,08	28	29,2	18,77	36	15,6	13,31	15	--	--
AGO. (Δ)	35,20	22,92	35	26,6	17,71	33	8,5	5,22	39	362	2215
SET. (Δ)	31,81	24,89	22	24,3	18,11	26	7,5	6,78	10	464	1280
OUT. (Δ)	30,74	22,12	28	24,2	16,93	30	6,5	5,19	20	--	--

Nota: (*) = Partida do digestor.
(Δ) = Regime estacionário.

Convém comparar a eficiência de remoção de sólidos voláteis com àquela observada por O'ROURKE (Fig. 3.11), publicada no livro "Sludge Stabilization (1985)". Uma estimativa de degradação de sólidos suspensos voláteis (SSV) via estudos de O'ROURKE, resultaria num percentual de remoção de aproximadamente 47,5%, obtido através da interpolação das curvas (25°C e 35°C) para T = 30°C e Tp = 10 dias. Outra vertente para esse cálculo provém da utilização da equação: $V_d = 13,7 \cdot \ln(\phi_d^m) + 18,94$ (STEPHEN & NEWBRY, 1985), cujo valor de remoção seria de 50,5%. Na prática o valor médio encontrado no final da operação do digestor anaeróbio em estudo foi de 30,0%, conforme relato anterior.

A explicação dessa aparente incongruência é que O'ROURKE (1968) e outros pesquisadores usaram lodo sanitário primário que tem uma alta fração de massa digerível (60% dos sólidos voláteis a 35°C), enquanto o lodo biológico da CETREL (lodo de excesso) compõe-se de duas frações praticamente iguais (ver Apêndice): 49% de lodo ativo (susceptível a digestão) e 51% de lodo inativo (pouco digerível), reportado no Relatório Final concedido pela ATECEL (VAN HAANDEL *et al.*, 1990). Ao fator composição do lodo, somam-se ainda os problemas de ordem operacional, a exemplo da

dissipação da energia de mistura do conteúdo do digestor, comprometida pela deficiência de recirculação.

Dados referentes à digestão anaeróbia de lodo secundário gerado a partir de esgoto doméstico revelaram que 53% da fração ativa do lodo (é massa de microrganismos) e somente 15% do lodo inativo (o restante dos sólidos inorgânicos) podiam ser degradados pela via anaeróbia, a 25°C, em digestores de mistura completa (VAN HAANDEL & ARAÚJO, 1993), o que denota um certo grau de equivalência com os resultados obtidos por O'ROURKE (1968) para lodo primário. Aplicando-se esses resultados para o lodo da CETREL, então, teoricamente, a eficiência de remoção dos sólidos voláteis será:

$$\begin{aligned} \text{Rem} &= 0,53 \cdot f_a + 0,15 \cdot (1 - f_a) \\ \text{Rem} &= 0,53 \cdot 0,49 + 0,15 \cdot (1 - 0,49) \\ \text{Rem} &= 0,53 \cdot 0,49 + 0,15 \cdot (0,51) \\ &= 34\% \end{aligned}$$

Onde:

$$\begin{aligned} \text{Rem} &= \text{fração de sólidos voláteis removidos (\%)} \\ f_a &= \text{fração de lodo ativo no lodo a ser digerido (no caso da CETREL 0,49)}. \end{aligned}$$

Esse valor calculado da eficiência de remoção de sólidos voláteis está bem próximo daquele obtido no digestor em escala piloto operando a uma temperatura de 30 a 35°C e um tempo de permanência relativamente curto de 10 (dez) dias, considerado por vários pesquisadores como tempo mínimo para se efetuar a digestão anaeróbia de sistemas de tratamento de esgotos (U. S. EPA, 1976).

Confrontando os resultados obtidos na presente investigação em escala piloto, com a que foi desenvolvida em laboratório por BARBOSA NETO *et al.* (1993), onde se obteve uma eficiência de remoção de somente 18% para um tempo de permanência de 10 (dez) dias, notadamente observa-se o bom desempenho do digestor durante os 4 (quatro) meses de operação sob condições estacionárias. Não se verificou nenhum registro de sinais de instabilidade do processo, mesmo em condições

extremas quando da ocorrência da descarga indesejável de grande quantidade de produtos tóxicos na ETE (16/10/95), estimada em 30,5 toneladas de dinitrotolueno, 700 quilos de nitrobenzeno e 3,3 mil quilos de ortodichlorobenzeno.

6.2.3 - Estimativa da Produção de Biogás no Digestor Piloto.

Na prática, a medição de gás "in situ" na unidade piloto não teve êxito, sendo automaticamente descartada da rotina operacional. Isso porque se constatou uma série de inconvenientes que impossibilitaram uma medida representativa e confiável do biogás produzido no sistema.

Um dos inconvenientes está relacionado à estanqueidade do sistema. Observou-se um grande número de fissuras e furos na tampa do digestor, bem como na mangueira plástica conectada ao gasômetro, por onde escapava, para a atmosfera, parte do gás armazenado na câmara de digestão. Dessa forma, o volume de gás no sistema não era suficiente para produzir uma vazão capaz de girar o marcador mecânico do gasômetro. Embora muito tenha sido feito para bloquear os vazamentos existentes, não se obteve sucesso nos serviços de calafetagem devido a incidência dos esforços de dilatação e contração na cúpula do digestor, que contribuíram de forma efetiva para o surgimento de novas zonas de escape.

Em se tratando da parte de instrumentação, o medidor de gás disponível não desempenhava satisfatoriamente sua função, tendo-se verificado ainda um outro fator agravante: o travamento do mecanismo interno do instrumento (engrenagens) devido ao efeito corrosivo do gás sulfídrico (H_2S) eventualmente presente no biogás.

Devido à precariedade do gasômetro, seria de interesse estimar a produção diária de gás gerado na unidade piloto, a partir dos dados experimentais da eficiência de digestão. Sabendo-se que o digestor era alimentado com uma vazão de $800L.d^{-1}$ ($T_p = 10d$) e que a concentração média do lodo afluyente era de $30gSST.L^{-1}$, a carga orgânica introduzida diariamente no digestor era de $800 * 30 = 24.000gSST.d^{-1}$,

sendo que 85% eram constituídas de sólidos voláteis ($24.000 * 0,85 = 20.400\text{gSSV.d}^{-1}$). Como o digestor apresentou uma eficiência de remoção em torno de 30%, a quantidade de sólidos voláteis convertidos em biogás foi de 6.120gSSV.d^{-1} . Ora, sabe-se de antemão, que o lodo biológico (secundário) tem uma DQO por sólidos orgânicos de $1,5\text{gDQO.g}^{-1}\text{SSV}$ e que, na digestão anaeróbia, há uma produção de $0,25\text{gCH}_4.\text{g}^{-1}\text{DQO}$ digerida. Calcula-se que a decomposição de 6.120gSSV.d^{-1} resultaria numa produção teórica de metano de $6.120 * 1,5/4 = 2.295\text{gCH}_4.\text{d}^{-1} \approx 2,3\text{kgCH}_4.\text{d}^{-1}$. Se $1\text{m}^3 \text{CH}_4 \approx 715\text{g CH}_4$, então o digestor em escala piloto operava com uma produção estimada de $3,2\text{m}^3\text{CH}_4.\text{d}^{-1}$ ($3.200\text{L CH}_4.\text{d}^{-1}$). Esse resultado denota nitidamente o potencial de produção energética da digestão anaeróbia.

Foram feitas análises de cromatografia gasosa (COPENE - Companhia Petroquímica do Nordeste) para determinação da composição do biogás, mas não foram obtidos resultados representativos e confiáveis, sendo estes descartados para efeito de discussão.

6.2.4 - Testes de Bancada.

6.2.4.1 - Eficiência da Digestão.

Paralelamente às investigações no digestor em escala piloto realizou-se também um estudo experimental em escala de laboratório (ver teste de bancada), visando obter dados quantitativos da eficiência de remoção para uma faixa de tempo de permanência (T_p) de 10 a 16 dias. Nas Tabelas 5.5a, 5.5b e 5.5c observa-se que em todos os tempos de permanência (10 a 16d) pesquisados, os digestores tinham um desempenho estável, mas a eficiência de digestão (medida como percentagem de remoção dos sólidos voláteis) aumentou para tempos de permanência mais longos. A Tabela 5.8 mostra que a eficiência de remoção dos sólidos voláteis foi de 34,4% ($T_p = 10\text{d}$), 38,9% ($T_p = 13,3\text{d}$) e 42,3% ($T_p = 16\text{d}$). Na Fig. 5.3 mostra-se os resultados obtidos nesse estudo comparando-os com o trabalho de O'ROURKE (1968), onde a baixa taxa da eficiência encontrada endossa a hipótese discutida anteriormente.

6.2.4.2 - Produção de Biogás.

Tendo-se estabelecida uma correlação entre a eficiência de remoção de sólidos voláteis com o tempo de permanência, foi possível calcular a produção teórica de metano para os diferentes digestores (1, 2 e 3) baseado na estequiometria do processo de digestão. Sabe-se que a massa de 1g de lodo biológico representa uma DQO por grama de sólidos orgânicos de $p = 1,5\text{gDQO/gSSV}$ e que, devido à digestão anaeróbia, há uma produção de $0,25 (1/4)\text{g CH}_4$ por grama de lodo digerido. Como nas condições experimentais ($p \approx 1 \text{ atm.}$, $T = 30 \pm 5^\circ\text{C}$) o volume de um mol de gás é $16\text{L}(\text{CH}_4)$ aproximadamente, a decomposição de 1gSSV resulta teoricamente em uma produção de metano na ordem de: $1,5 * 0,25 * 26/16 \approx 0,609\text{L CH}_4$ (ou $609\text{mL CH}_4/\text{g}^1\text{SSV}$ digerido). Na Tabela 5.10 observa-se a taxa teórica de produção de metano para os três digestores em estudo. Esta produção teórica (coluna-6) excedeu em muito os valores encontrados na prática via gasômetro (coluna-3), o que pode ser explicado segundo alguns fatores: (1) eventual escapamento de gás na tampa do digestor devido ao aumento da pressão interna; (2) ausência de uma mistura contínua no conteúdo do digestor; (3) formação de uma camada de espuma acima do sobrenadante, o que provavelmente contribuiu para o não desprendimento do gás da massa líquida; (4) parte dos sólidos mineralizados (liquefeitos) não são convertidos em metano, permanecendo na fase líquida como material dissolvido e, (5) imprecisão do equipamento utilizado (gasômetro convencional). Embora esses inconvenientes tenham interferido na avaliação de desempenho dos digestores, os valores obtidos nesse monitoramento podem ser comparados com os resultados reportados por outros pesquisadores. BARBOSA NETO *et al.* (1993), divulgaram os dados obtidos durante uma investigação experimental em escala de laboratório para estabelecer a viabilidade técnica da estabilização do lodo de excesso da CETREL através da digestão anaeróbia (ver Quadros 6.3, 6.4 e 6.5). Observa-se no Quadro 6.4 os seguintes resultados para remoção de sólidos voláteis:

$$T_p = 10 \text{ dias } (D_1) \rightarrow \text{SSV}_{\text{rem.}} = 18,8\%$$

$$T_p = 13,3 \text{ dias } (D_2) \rightarrow \text{SSV}_{\text{rem.}} = 31,8\%$$

$$T_p = 16 \text{ dias } (D_3) \rightarrow \text{SSV}_{\text{rem.}} = 36,5\%$$

No Quadro 6.5 observa-se que a produção de metano para sólidos suspensos voláteis aplicados foram:

$T_p = 10$ dias (D_1) → 89mL $CH_4/gSSV_{apl}$

$T_p = 13,3$ dias (D_2) → 154mL $CH_4/gSSV_{apl}$

$T_p = 16$ dias (D_3) → 189mL $CH_4/gSSV_{apl}$

QUADRO 6.3 - Regime de alimentação dos digestores utilizando como substrato lodo de excesso (CETREL), sendo a frequência de alimentação 1 vez de 2 em 2 dias.

Nº DO DIGESTOR	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6
• Volume de lodo adicionado em 2 dias	1,6	1,4	1,2	1,0	0,8	0,5
• Tempo de permanência (T_p)	10	11,4	13,3	16,0	20,0	32,0

Fonte: Anais do 17º Congresso Brasileiro de Engª Sanitária e Ambiental, Natal-RN, Tomo III, p. 362-372.
Nota: $p \approx 0,95$ atm. e $T = 27 \pm 2^\circ C$.

QUADRO 6.4 - Concentração dos sólidos em suspensão no lodo a ser digerido nos afluentes e nos efluentes dos 6 digestores (D_1 a D_6).

LODO	CONCENTRAÇÃO DE LODO			REMOÇÃO PERCENTUAL		
	TOTAIS	FIXOS	VOLÁTEIS	TOTAIS	FIXOS	VOLÁTEIS
Afluente	22,8	6,9	17,0			
Efluente D_1	18,6	4,8	13,8	18,4	30,4	18,8
Efluente D_2	17,1	4,6	12,5	25,0	33,3	26,5
Efluente D_3	15,6	4,0	11,6	31,6	42,0	31,8
Efluente D_4	14,4	3,6	10,8	36,8	47,8	36,5
Efluente D_5	14,0	3,8	10,2	41,4	44,9	40,0
Efluente D_6	14,0	4,0	10,0	41,4	42,0	41,2

Fonte: Anais do 17º Congresso Brasileiro de Engª Sanitária e Ambiental, Natal-RN, Tomo III, p. 362-372.
Nota: $p \approx 0,95$ atm. e $T = 27 \pm 2^\circ C$.

QUADRO 6.5 - Produção média de metano por alimentação e produção por unidade de massa de sólidos voláteis aplicados e removidos nos digestores D₁ a D₆, e a produção teórica de metano.

Nº DO DIGESTOR	PRODUÇÃO DE METANO (mL CH ₄ por gSSV)			PRODUÇÃO TEÓRICA DE METANO (L / 2d)
	L CH ₄ /2d	APLICADO	REMOVIDO	
D ₁	2,42	89	473	3,11
D ₂	3,04	128	482	3,84
D ₃	3,14	154	484	3,94
D ₄	3,22	189	519	3,78
D ₅	2,84	209	522	3,31
D ₆	1,85	218	544	2,07

Fonte: Anais do 17º Congresso Brasileiro de Eng^a Sanitária e Ambiental, Natal-RN, Tomo III, p. 362-372.

Nota: $p \approx 0,95 \text{ atm.}$ e $T = 27 \pm 2^\circ\text{C.}$

Fazendo-se a superposição dos dados acima mencionados com os obtidos na presente investigação (ver Tabelas 5.8, 5.9 e 5.10), constatou-se uma boa aproximação dos resultados. Tomando-se como referência o digestor com tempo de permanência de 16 (dezesseis) dias, a eficiência de remoção de sólidos voláteis atingiu um valor em torno de 40%, podendo gerar uma produção de metano de até 200mL CH₄/gSSV aplicado.

6.2.4.3 - Dimensionamento e Otimização do Leito de Secagem.

A otimização do leito de secagem consiste, essencialmente no estabelecimento de um procedimento operacional que resulte na menor área possível a fim de se obter um lodo seco, com umidade final desejada, para uma determinada massa diária de lodo estabilizado. Alternativamente, pode-se maximizar a produtividade do leito que expressa a massa de lodo que pode ser secada até a umidade desejada por unidade de tempo e por unidade de área do leito. A produtividade do leito pode ser expressa como:

$$P(u) = C_s / T_{\text{tot}} \quad (5)$$

Onde:

$P(u)$ = produtividade do leito, produzindo lodo com umidade final (u) ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{d}$);

C_s = carga de sólidos aplicada (kg/m^2);

T_{tot} = tempo total necessário para estabilizar o lodo

$$(T_{\text{tot}} = T_1 + T_2 + T_3 + T_4).$$

As Figs. 5.4a a 5.4c que mostram a relação entre umidade do lodo em função do tempo de evaporação. Tomando-se como exemplo o Ponto (A) na Fig. 5.4a (lodo aeróbio), obtém-se o seguinte tempo de evaporação (T_3):

$$H_i = 0,827 \text{ (82,7\%)}$$

$$H_f = 0,40 \text{ (40\%)} \quad \Rightarrow \quad T_3 = 30,0\text{d.}$$

$$C_s = 21,3 \text{ kg}/\text{m}^2$$

Nas Figs. 5.5a a 5.5c apresentam-se as curvas do tempo de evaporação necessário para atingir diferentes valores da umidade final (80 a 10%) em função da carga de sólidos aplicados no leito. Além desses parâmetros, também estão indicados os tempos para percolação (T_2), alimentação (T_1) e retirada do lodo (T_4) após a secagem. Com o auxílio dessas curvas ilustradas nas Figs. 5.5a a 5.5c e da Eq. (5), pode-se calcular a produtividade do leito para diferentes unidades em função da carga de sólidos aplicada. Tomando-se como exemplo o Ponto (B) na Fig. 5.5a que caracteriza o tempo para obter uma umidade final de 40%, quando a carga de sólidos aplicada é de $30,3\text{kg}/\text{m}^2$, lê-se na Fig. 5.5a que $T_1 + T_2 + T_4$ é igual a 17,0 (dezesete) dias enquanto que o tempo T_3 é de 41,0 (quarenta e um) dias, perfazendo um total de 58,0 (cinquenta e oito) dias. Portanto, para as condições estipuladas, a produtividade é de $P(0,40) = 30,3/58,0 = 0,52\text{kg}/\text{m}^2/\text{d}$. Isto significa que, ao se processar uma massa de $0,52\text{kg}/\text{m}^2/\text{d}$, o lodo no fim do processo de secagem terá uma umidade de 40%, se a carga aplicada em cada batelada a ser secada for de $30,3\text{kg}/\text{m}^2$.

As Figs. 5.6a a 5.6c mostram a produtividade do leito de secagem em função da carga de sólidos aplicados para diferentes valores da umidade final, obtidos através dos

resultados da investigação experimental. Observa-se, a priori, que as curvas possuem um valor máximo, ou seja, existe para cada umidade final desejada uma carga ótima que resulta na maior produtividade do leito para aquela umidade. Tomando-se como referência as Figs. 5.6a, 5.6b e 5.6c, verifica-se que para se obter uma umidade final desejada de 40%, o valor máximo da produtividade no lodo anaeróbio (digestor piloto), lodo aeróbio (digestor) e lodo anaeróbio (decantador) é de 0,34; 0,54 e 0,65kg/m²/d, quando se aplica uma carga no leito de 20,2; 9,1 e 32,8kg/m², respectivamente. Conclui-se, portanto, que o lodo anaeróbio decantado apresenta melhores características de secagem do que as outras duas amostras em estudo, conforme atesta o valor numérico encontrado da produtividade das amostras.

Convém ressaltar que as percentagens de água influenciam as propriedades mecânicas do lodo. Na medida em que a percentagem de água diminui, o lodo se torna mais pastoso e abaixo da umidade de 75% perde as características de um fluido e se transforma numa torta semi-sólida. Abaixo dos 65% o lodo se torna um sólido duro e abaixo dos 40% esse sólido se quebra em grânulos. Quando a percentagem de água se torna ainda mais baixa (15%), o sólido tende a desintegrar-se, formando um pó fino (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994).

Com base nos valores máximos da produtividade (reta cc), pode-se estimar a área necessária para processar uma certa produção de sólidos secos, para cada amostra, até atingir qualquer umidade desejada. Para os resultados obtidos anteriormente via investigação experimental, precisar-se-ia de uma área equivalente a $1/0,34 = 2,94\text{m}^2$ (lodo anaeróbio, digestor piloto), $1/0,54 = 1,85\text{m}^2$ (lodo aeróbio, digestor) e $1/0,65 = 1,54\text{m}^2$ (lodo anaeróbio, decantador) para secar $1\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$ de sólidos secos até uma umidade final de 40%. Na Fig. 5.7, observa-se a relação entre a área necessária por unidade de massa de sólidos secos processados por dia e a umidade final desejada para o lodo. Essa relação entre a área do leito e a umidade do lodo foi desenvolvida para as 3 (três) amostras separadamente, tornando-se possível comparar e otimizar os leitos de secagem para o lodo digerido via aeróbia e por via anaeróbia.

Notadamente observa-se na Fig. 5.7 que a AMOSTRA-3 apresenta-se com maior viabilidade econômica para secagem ao ar livre do que as demais amostras, visto que o lodo anaeróbio decantado requer uma área de 48 a 17% menor que a área necessária para

secagem da AMOSTRA-2 e AMOSTRA-1 respectivamente, apresentando essa tendência para qualquer que seja a umidade final desejada. Desse modo, conclui-se que, quanto a secagem do lodo, seria muito mais vantajosa a aplicação do lodo digerido anaerobiamente do que por via aeróbia, dada a economia de área (espaço) e de tempo para secagem.

É importante registrar que o experimento de avaliação das propriedades mecânicas do lodo de excesso foi desenvolvido na ETE da CETREL, onde verificou-se as seguintes condições ambientais durante o período de investigação: (1) temperatura média 33-34°C, (2) taxa média de evaporação da água pura 12g.d⁻¹ (19,6cm³), (3) precipitação pluviométrica média: SET./95 = 2,3mm.d⁻¹, OUT./95 = 0,3mm.d⁻¹ e NOV./95 = 6,0mm.d⁻¹ (teste = 78 dias) e (4) ventos em torno de 2,2m/s.

Com os resultados obtidos nesse experimento, é possível estimar a área do leito, o número de leitos de secagem e o tempo necessário para processar o lodo de excesso da CETREL. Sabendo-se que a produção atual de lodo é cerca de 30.000kgSST.d⁻¹, e que se deseja eventualmente uma umidade final de 40% para lodo digerido anaerobiamente proveniente do decantador (isto é 1,54m² por kg.d⁻¹ de sólidos secos), então a área total necessária para secagem seria 30.000 * 1,54 = 46.200m² (≈ 5ha). Nesse caso, aplicar-se-ia no leito uma carga de sólidos de 32,8kgSST.m⁻², o que necessitaria de uma área equivalente a 30.000/32,8 ≈ 1.000m².d⁻¹ e um tempo de processamento (período de um ciclo inteiro) de 46.200/1.000 ≈ 47 dias. Isto significa dizer que para as condições previamente levantadas, a CETREL precisaria construir 47 (quarenta e sete) leitos de secagem de 1.000m² cada (ou 24 x 1.925m²). Naturalmente, na prática, essa área deverá ser aumentada, adotando-se um fator de segurança conveniente para garantir uma condição operacional favorável, quando da ocorrência de fortes precipitações pluviométricas. Se a carga aplicada é de 32,8kgSST.m⁻² e a concentração média do lodo efluente decantado é de aproximadamente 95kgSST.m⁻³, então coloca-se a produção diária de lodo digerido sucessivamente nos diferentes leitos em camadas de 32,8/95 ≈ 0,35m.

6.3 - Viabilidade Econômica da Digestão Anaeróbia.

6.3.1 - Estimativa dos Custos de Implantação do Sistema em Escala Real.

Com intuito de avaliar a viabilidade econômica da digestão anaeróbia para a CETREL, seria interessante fazer primeiramente uma abordagem quantitativa dos custos de investimento para construção do sistema em escala real.

Atualmente a CETREL produz cerca de 30t.SST.d⁻¹ de lodo de excesso com uma fração orgânica de 85%, ou seja, uma produção de sólidos voláteis equivalente a 25t.d⁻¹. Considerando que a massa de lodo produzida no sistema seja descarregada na unidade de estabilização (digestor) com uma concentração média de 30g.L⁻¹ (após espessado), há uma vazão disponível de 30.000/30 = 1.000m³.d⁻¹. Para manter um tempo de permanência de 16d, precisar-se-ia de um digestor com volume de 16 * 1.000 = 16.000m³, o que poderia ser implantado através da conversão da unidade aeróbia principal existente na CETREL em uma unidade anaeróbia. Para tanto, a CETREL teria que aumentar a capacidade volumétrica do digestor principal (10.880m³) em 56,25% (folga = 30cm). Considerando a colocação da tampa e o acréscimo da capacidade volumétrica (mais 6.120m³) do digestor aeróbio, pode-se estimar o custo desse investimento para a empresa, a partir do cálculo do volume de concreto necessário para implantação (conversão) da unidade anaeróbia.

♦ Estimativa do volume de concreto necessário para implantação do digestor anaeróbio em escala real, a partir da conversão da unidade aeróbia principal existente (COMP. = 72,5m, LARG. = 30,0m e ALT. = 5,0m):

- PISO (e = 20cm) : $V = 41,05 \times 30,50 \times 0,20 = 250,41\text{m}^3$
- PAREDES (e = 25cm) : $V = 41,05 \times 2 + 30,00 \times 0,25 \times 5,00 = 140,13\text{m}^3$
- TAMPA (e = 15cm) : $V = 113,80 \times 30,50 \times 0,15 = 520,64\text{m}^3$
- VIGA (15 x 50cm, c/10m) : $V = 10 \times (0,15 \times 0,50 \times 30,50) + 2 \times (0,15 \times 0,50 \times 113,80) = 39,95\text{m}^3$
- PILAR (20 x 20cm, 2/viga): $V = 20 \times (0,20 \times 0,20 \times 5,00) = 4,00\text{m}^3$

$$\bullet \text{ FUNDAÇÃO (sapata, 1 x 1m): } V = 20 \times \left[(12 \times 0,40 + \frac{0,75}{3} [12 + 0,202 + \sqrt{1^2 + 0,20^2}] + 0,20^2 \times 0,80 \right] = 14,84\text{m}^3$$

VOLUME TOTAL ESTIMADO(*) $\approx 970\text{m}^3$

Admitindo-se que em Salvador-BA o preço unitário (P.U.) do concreto armado (aplicado) custa R\$631,85* (REV. CONSTRUÇÃO, MAR./96), o custo total da obra civil seria:

$$e = V(\text{m}^3) \times \text{P.U. (R\$/m}^3)$$

$$e = 970 \times 631,85$$

$$e = \text{R\$ } 612.894,50$$

NOTA* : O preço unitário do concreto armado aplicado inclui: materiais, mão-de-obra (MDO), leis sociais (LS = 124,6%) e Benefício e Despesas Indiretas (BDI = 35%).

A conversão da energia química gerada no processo de digestão anaeróbia (biogás) em energia elétrica (útil), pode ser feita utilizando um grupo gerador convencional ou um equipamento moderno como a turbina a gás. Este último (1000kW, 50% de conversão) custa em torno de US\$1.000.000,00 (Fonte: VAN HAANDEL, MAI/96).

Com os valores monetários acima estimados, o custo inicial do investimento (obra civil de grande porte + equipamento) seria R\$1.612.894,50 (Nota: 1US\$ = R\$0,992 \approx 1R\$, 27/04/96). Admitindo-se um gasto adicional de 25% desse valor para custear as despesas de implantação do sistema de mistura no digestor anaeróbio em escala real, pequenas obras civis e outros, o custo total do investimento para CETREL (obra civil: pequeno e grande porte + equipamento + acessórios) seria algo em torno de R\$2.000.000,00.

6.3.2 - Benefício (Economia) Resultante da Aplicação da Digestão Anaeróbia para Estabilização do Lodo de Excesso da CETREL.

Atualmente aplica-se o mecanismo aeróbio para tratamento do lodo de excesso em uma unidade composta de três digestores aeróbios, sendo um digestor principal com um volume útil de 10.000m^3 (capacidade volumétrica = 10.880m^3) e uma potência instalada de aeradores de $10 * 100\text{kW} = 1000\text{kW}$ e dois pequenos com volume de 2.690m^3 cada e uma potência instalada de $4 * 60\text{kW} = 240\text{kW}$, perfazendo um volume total de aproximadamente 16.000m^3 .

Admitindo-se uma eficiência de remoção em torno de 40% ($T_p = 16\text{d}$, operação otimizada do digestor), então 10t.d^{-1} das $30 * 0,85 = 25\text{t.d}^{-1}$ de sólidos voláteis seriam transformados em metano. Como as 10tSSV.d^{-1} representam 15tDQO.d^{-1} , ter-se-ia um potencial de produção de $15/4 (15 * 0,25) \approx 3,8\text{t.CH}_4.\text{d}^{-1}$. Sabendo-se que o calor de combustão do metano é $50.400\text{kJ.kg}^{-1}.\text{CH}_4$, então calcula-se a potência de energia elétrica gerada da seguinte forma: $3800\text{kg.CH}_4.\text{d}^{-1} * 50.400\text{kJ.kg}^{-1}.\text{CH}_4 (1\text{kJ} = 1\text{kW}) = 1,92 * 10^8\text{kW/d} \approx 2.217\text{ kW/s}$. Como a conversão da energia química (combustão) em energia útil (elétrica) tem uma eficiência de apenas 35%, logo a potência utilizável extraída de um grupo gerador, a partir de 30tSST.d^{-1} de lodo de excesso seria o equivalente a $0,35 * 2.217 \approx 800\text{ kW}$. Estima-se que hoje se gasta algo em torno de 800kW para aeração no digestor aeróbio principal, uma vez que apenas 8 (oito) aeradores de superfície estão sendo utilizados. Portanto, a produção de 800kW de energia via digestor anaeróbio, representa uma redução substancial dos custos operacionais.

Conforme cálculos anteriores, admitindo-se que o sistema real opere com um tempo de permanência de 16 (dezesseis) dias e uma vazão de lodo de excesso de $1.000\text{m}^3.\text{d}^{-1}$, precisar-se-ia de um volume útil de 16.000m^3 , sendo perfeitamente viável a conversão do digestor principal em uma unidade anaeróbia, usando-se um dos dois outros digestores que se encontram desativados como decantador de lodo digerido. Considerando-se que a potência útil gerada por 30tSST.d^{-1} de lodo de excesso é de 800kW , enquanto que hoje se gasta 800kW no digestor principal, ter-se-ia uma redução substancial

de 800kW através da estabilidade anaeróbia, o que representa 100% da energia consumida pelos aeradores da unidade aeróbia.

Para estimar monetariamente a redução dos custos operacionais é preciso relacionar o custo anual da energia elétrica consumida com os agitadores mecânicos de superfície e a potência útil gerada no processo de digestão anaeróbia. A seguir são mostrados os cálculos para avaliação da viabilidade econômica do sistema proposto. As fórmulas utilizadas para estimar o custo anual de energia elétrica foram reportadas por TAVARES & DIAS (1987).

(1) ***Sistema de mistura mecânica:***

- Potência instalada = 1.074 HP (800 kW)

Obs.: Dos 10 (dez) aeradores existentes no digestor aeróbio principal, apenas 8 (oito) estão em funcionamento.

- Regime de trabalho = 24 horas/dia, 365 dias/ano

- Preço kW.h (COELBA) = R\$0,07

- Rendimento = 90%

- Fator de potência = 0,85

$$\begin{aligned} \diamond \text{ Potência consumida (kW)} &= \frac{1.074 \times 0,745 \text{ HP/kW}}{0,90 \times 0,85} \\ &= 1.046 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \diamond \text{ Custo anual} &= 1.046 \text{ kW} \times 24 \text{ h/dia} \times 365 \text{ dias/ano} \times \text{R\$ } 0,07 \\ &= \text{R\$ } 641.407,20 \end{aligned}$$

(2) ***Energia gerada através do processo de digestão anaeróbia.***

- Potência = 1.074 HP (800kW),

- Produção = 24 horas/dia, 365 dias/ano

- Preço kW.h = R\$ 0,07

- Fator de potência = 0,85

$$\begin{aligned} \diamond \text{ Potência útil gerada (kW)} &= \frac{1.074 \times 0,745}{0,85} \\ &= 941\text{kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \diamond \text{ Benefício anual} &= 941\text{kW} \times 24 \text{ h/dia} \times 365 \text{ dias/ano} \times 0,07 \\ &= \text{R\$ } 577.021,20 \end{aligned}$$

$$\text{ECONOMIA ANUAL} = (1) + (2) = \text{R\$ } 1.218.428,40.$$

Para o sistema proposto, pode-se fazer a mistura do conteúdo do digestor utilizando-se a recirculação do gás. O emprego desse sistema inclui o uso de hastes tubulares contendo difusores, localizados em toda a extensão do fundo do digestor, por onde são liberadas as micro-bolhas de gás que irá promover a mistura. O contato das micro-bolhas de gás com o lodo favorece uma mistura eficiente de todo o conteúdo do digestor.

Considerando-se a implantação desse sistema de mistura no digestor anaeróbio em escala real, a energia gasta anualmente com o sistema de mistura mecânica no digestor aeróbio seria economizada, constituindo-se em uma economia para a empresa.

Com base nessas constatações, pode-se revelar que um potencial de 800kW ($Q_a = 1.000\text{m}^3.\text{d}^{-1}$ lodo de excesso) gerado através da digestão anaeróbia, representa uma ECONOMIA ANUAL em torno de R\$ 1.200.000,00. Este benefício resultaria numa redução substancial da demanda de energia da ETE da CETREL, o que justifica plenamente a sua implantação em escala real, uma vez que o tempo de retorno dos investimentos seria de menos de 2 (dois) anos.

CAPÍTULO 7

7. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos na pesquisa permitem concluir que:

1. O bom desempenho da unidade anaeróbia piloto, usando-se tão somente lodo de excesso da CETREL como substrato, demonstra que a viabilidade técnica do processo de digestão está claramente estabelecida.
2. A estabilização do lodo de excesso da CETREL via digestão anaeróbia se desenvolveu estavelmente à temperatura ambiental (30 a 35°C). De acordo com os resultados experimentais é perfeitamente possível operar um digestor anaeróbio em escala real, sem que haja necessidade de adição de qualquer substância química.
3. A relação entre a eficiência de digestão em termos de remoção de sólidos voláteis e produção de metano depende do tempo de permanência adotado. Para um tempo de permanência curto de 10 (dez) dias obteve-se uma remoção de apenas 30%. Por outro lado, aumentando-se o tempo de permanência a eficiência foi maior. Para um tempo de permanência de 16 (dezesesseis) dias registrou-se uma remoção máxima em torno de 40%, sendo esta condição considerada ideal porque, além de atender aos requisitos econômicos para implantação do sistema em escala real (tamanho do digestor), também apresenta uma operação otimizada do digestor, traduzida pela satisfatória remoção de sólidos voláteis e produção de metano.

4. Tendo-se em vista a disposição final do lodo em leitos de secagem, observou-se que o lodo anaeróbio via decantador apresenta maior facilidade de secagem do que o lodo aeróbio. Assim, para se obter um lodo com umidade final de 40% (grânulo seco), sob condições otimizadas, ter-se-ia que aplicar uma carga de 32,8kg SST.m⁻² numa área equivalente a 46.200m² (24 x 1.925m²), colocando-se camadas sucessivas de 35cm de lodo durante um período de 47 (quarenta e sete) dias.

5. A viabilidade econômica aplicada ao processo de digestão anaeróbia é um fato concreto, tendo-se uma economia nos custos operacionais (energia elétrica) em torno de R\$ 1.200.000,00 por ano aproximadamente, o que representa cerca de 40% da demanda de energia consumida pela ETE da CETREL. Este benefício custaria aos cofres da CETREL um investimento inicial na ordem de R\$ 2.000.000,00 para implantação do sistema em escala real e aquisição de equipamentos específicos. Em contrapartida, o retorno desse investimento seria em menos de 2 (dois) anos.

CAPÍTULO 8

RECOMENDAÇÕES

Tendo em vista os resultados obtidos, recomenda-se:

- ♦ utilizar um dos digestores aeróbios pequenos (desativado) como decantador de lodo digerido, implantando-se um sistema de recirculação dessa unidade para os espessadores. Desse modo haveria um melhoramento das características do lodo adensado, uma vez que o lodo digerido exibe uma excelente sedimentabilidade. Esse procedimento poderia aumentar substancialmente a concentração de sólidos orgânicos voláteis do lodo afluente, o que resultaria numa maior produção de gás.
- ♦ realizar uma investigação antes da implantação do sistema em escala real, no sentido de estabelecer a resposta do digestor a cargas tóxicas, tais como: espuma da URV, óleo e tóxicos específicos.
- ♦ fazer um estudo comparativo entre o método de secagem natural apresentado no presente trabalho (leitos de secagem) com outros processos utilizados, como: incineração, secagem térmica, centrifugação, etc. Essa investigação certamente mostrará novas alternativas para a empresa, tornando-se possível escolher o método mais adequado para disposição final do lodo estabilizado anaerobiamente, conforme sua viabilidade técnica e econômica comprovada nos experimentos.

- ♦ realizar estudos específicos para determinar a concentração de nutrientes e a qualidade sanitária do produto final (sólido seco) resultante da secagem do lodo. A disponibilidade de elementos indispensáveis ao crescimento vegetal, tais como: K, Mn, Fe, Ca, P e N e a ausência de organismos patogênicos e outros agentes são os requisitos básicos para demonstrar a viabilidade técnica da proposta de se utilizar a massa de lodo seco como fertilizante na agricultura e em áreas de jardinagem.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALAERTS, G. J.; VEENSTRA, S.; BENTVELSEN, M. and VANDUIJL, L.A. (1993). Feasibility of anaerobic sewage treatment in sanitation strategies in developing countries. Water Science and Technology, v. 27, n. 1, p. 179-194.
- APHA (1980, 1992). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 15th and 18th ed. American Public Health Association, Washington, D. C.
- AZEVEDO NETO, J. M. & ALVAREZ, G. A.(1991). Manual de Hidráulica. 7ª ed. atual. e compl. São Paulo, Edgard Blücher, v. 1, p. 249-306.
- BARBOSA NETO, D; NEVES, N. & VAN HAANDEL, A. C. (1993). Viabilidade da digestão anaeróbia do lodo de excesso gerado no complexo petroquímico em Camaçari. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. Natal: v. 2, T. IV, p. 362-372, setembro.
- BATISTA, L. F. (1981). Construção e Operação de Biodigestores. Brasília: Empresa Brasileira de Assistência Técnica e Extensão Rural (vinculada ao Ministério da Agricultura), Coordenadoria de Operações (ed.), não paginado. (Manual Técnico).
- BEZERRA, A. M. (1986). Aplicações técnicas da energia solar. João Pessoa: Ed. Universitária/UFPB, 2 ed., p.186-202.

- BHATTACHARYA, S. K.; MADURA, R. L.; UBEROI, V. and HAGHIGHI-PODEH, M. R. (1995). Toxic effects of cadmium on methanogenic systems. Water Research, v. 29, n. 10, p. 2339-2345.
- BOARDMAN, G. D.; TISINGER, J. L. and GALLAGHER, D. L. (1995). Treatment of clam processing wastewaters by means of upflow anaerobic sludge technology. Water Research, v. 29, n. 6, p.1483-1490.
- CENTRAL DE TRATAMENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS S/A - CETREL (1978). Padrões para recebimento de efluentes no sistema CETREL. Especificação, Camaçari, n.20703, não paginado, fevereiro.
- COLETÂNEA DE TRABALHOS SOBRE DIGESTÃO ANAERÓBIA [1993?] Archaeobacteria. Salvador: CETREL. Número especial.
- CORBELLINI, P. A. (1995). Estudos preliminares sobre a digestão anaeróbia em duas fases com substrato sintético à base de glicose. Encarte da Revista Bio, ABES, Brasil, p.11-18, janeiro/abril.
- CURDS, C. R. and HAWKES, H. A. (1983). Ecological Aspects of Used-Water Treatment Biological Activities and Treatment Processes. Academic Press, v. 2, Londres, Reino Unido.
- DE PAULA Jr., D. R. & FORESTI, E (1993). Resposta de um reator UASB ao aumento progressivo na concentração de DQO do afluente. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. Natal: v. 2, T.I, p. 743-761, setembro.
- DI BERNARDO, L.; CAMACHO, R. D. P.; FRAGIACOMO, P. & VIUDEZ, M. A. P. (1993). Emprego de reator anaeróbio de fluxo ascendente com manta de lodo para tratamento de despejos líquidos provenientes de laticínios. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2 Belém. Anais... Tomo-III. Belém: ABES, Brasil, p. 653-671, setembro.

- DO NASCIMENTO, R. S. (1994). Tratamento Anaeróbio. Campina Grande: Centro de Ciência e Tecnologia da UFPB, 19p. (Trabalho de aluno).
- ECKENFELDER, W. W. (1963). Industrial Water Pollution Control. McGraw-Hill International (2ed), New York, USA, p.245-260.
- GARCEZ, L. N. (1976). Elementos de engenharia hidráulica e sanitária. 2.ed. São Paulo, Edgard Blücher, 356p.
- LETTINGA, G. (1995). Sustainable integrated biological wastewater treatment. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TECHNOLOGY TRANSFER. Salvador, Brasil, p.141-154, september.
- LIMA, F. F. & PEREIRA, F. A. (1995). Complex changes put polo in control of waste minimization. Water Quality International (IAWQ), n.2, p.12-15.
- LIVINGSTON, A. G.; DOS SANTOS, L. M. F.; PAVASANT, P; PISTIKOPOULOS, E. N. & STRACHAN, L. F. (1995). Detoxification of industrial wastewaters in an extractive membrane bioreactor. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TECHNOLOGY TRANSFER. Salvador, Bahia, p.13-23, september.
- MAGALHÃES, J. P. (1982). Recursos naturais, meio-ambiente e sua defesa no direito brasileiro. Rio de Janeiro: Ed. da Fundação Getúlio Vargas, 76p.
- METCALF, L. and EDDY, H. P. (1991). Waste water engineering: Treatment, disposal, reuse. 3rd. ed. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc. 1334p.
- MUDRACK, K. and KUNST, S. (1986). Biology of Sewage Treatment and Water Pollution Control. 1ª ed. Ellis Horwood Limited. Chichester.
- NOBUYOSHI IDE, C. (1993). Tratamento do lodo bruto com cal: influência na sobrevivência de patógenos e na imobilização de metais pesados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. Natal: v.2, T.I, p.333-346, setembro.

- NOVA QUÍMICA (1995). As Maiores Empresas de Química e Petroquímica. São Paulo: Signus Editora Ltda, Ano I, n.1, 100p, agosto.
- PEREBOOM, J. H.; CONSULTING ENGINEERS, G.; VEREIJKEN, T. L. and PACQUES (1994). Stacking the odds per anaerobic treatment. Water Quality Internacional, n. 4, p.17.
- POHLAND, F. G. (1971). Anaerobic Biological Processes. American Chemical Society; Washington U.S.A.
- QUÍMICA INDUSTRIAL (1994). O novo momento de Camaçari. São Paulo: Signus Editora Ltda., Ano VII, n. 55, 47p., dezembro.
- REVISTA CONSTRUÇÃO (1996). Preços de materiais, serviços e equipamentos. Norte-Nordeste: Ed. Pini, ano XXIII, nº 274, março.
- REVISTA ENGENHARIA SANITÁRIA (1988). CETREL: um desafio à população. Rio de Janeiro: v. 27, n. 1, p. 54-56, jan./mar.
- SALVADOR (1992). Decreto-Lei número 619, CEPRAM - Conselho Estadual de Proteção ao Ambiente.
- SOUSA, M. E. (1982). Influência Simultânea de Elevadas Concentrações de Metais Pesados e Cianetos na Digestão Anaeróbia de Lodos de Esgotos. São Paulo: Univ. de São Paulo (USP), v.1, 125p (Dissertação, Mestrado em Engenharia Civil).
- STEPHEN, E. A. and NEWBRY, B. W. (1985). Sludge Stabilization - Manual of Practice Water Pollution Control Federation, Washington USA, p.9.30.
- STEWART, J. M.; BHATTACHARYA, S. K.; MADURA, R. L.; MASON, S. H. and SCHONBERG, J. C. (1995). Anaerobic treatability of selected organic toxicants in petrochemical wastes. Water Research, v.29, n.12, p.2730-2738.

- TAVARES, L. M. C. & DIAS, M. A. M. (1987). As vantagens do sistema de aeração por ar difuso em relação à aeração mecânica para estações de tratamento de esgotos. In: 20º CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL. São Paulo: ABCP, DRESSER, 68p. novembro.
- TOLEDO, A. S.; PLAZA G.; ROBREDO, P. & PACHECO, O. (1995). Anaerobic Treatment of the Municipal Solid Waste. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TECHNOLOGY TRANSFER. Salvador, Bahia, Brasil, p.269-275, september.
- VAN HAANDEL, A. C.; CATUNDA, P. F. C.; FLORENTINO, E. R. & DE MELO, H. F. (1990). Digestão anaeróbia de lodo de excesso da ETE da CETREL em Camaçari-BA. Campina Grande: UFPB-CCT-DEC através do Convênio ATECEL -CETREL, 23p. (Relatório).
- VAN HAANDEL, A. C. (1993). Influência da concentração do material orgânico sobre a alcalinidade e estabilidade do pH em digestores anaeróbios. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2, Natal. Anais... Tomo-I. Natal: ABES, p.483-496, setembro.
- VAN HAANDEL, A. C. (1995). Viabilidade técnica da digestão anaeróbia do lodo de excesso da CETREL. Salvador: Fontes & HAANDEL - Engenharia Ambiental. 21p, abril (Relatório de progresso).
- VAN HAANDEL, A. C. (1995). Acompanhamento do digestor de lodo em escala piloto instalado na ETE da CETREL. Salvador: FONTES & HAANDEL - Engenharia Ambiental, 8p, maio (Relatório).
- VAN HAANDEL, A. C. (1994). Tratamento de águas residuárias-II. Campina Grande: Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental da UFPB, 12p. (Notas de aula).
- VAN HAANDEL, A. C. & LETTINGA, G. (1994). Tratamento anaeróbio de esgotos. Um manual para regiões de clima quente. Campina Grande-PB, Brasil, 198p.

VAN HAANDEL, A. C. & ARAÚJO, L. DE S. (1993). Influência da composição de lodo ativado sobre a sua estabilização anaeróbia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2, Natal. Anais... Tomo-I. Natal: ABES, p.513-523, setembro.

U. S. ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (U.S.EPA, 1976). Operations Manual - Anaerobic Sludge Digestion, Office of Water Program Operations, Washington, D. C. 20460, não paginado, february.

APÊNDICE

APÊNDICE

A.1 - Introdução.

Esse apêndice tem como objetivo rever a teoria de MARAIS & EKAMA (1976) no sentido de mostrar que: (1) aproximadamente metade dos sólidos voláteis do lodo de excesso da CETREL compõe-se de lodo ativo ($f_a = 0,49$) e (2) metade de lodo inativo ($1 - f_a = 0,51$). O item A.2 mostra os cálculos para se chegar a essa conclusão. Esses cálculos foram extraídos dos ANAIS DO 17º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, NATAL-RN, V.2, TOMO III, p.371-372.

A.2 - Teoria básica do sistema de Lodos Ativados.

MARAIS & EKAMA (1976) desenvolveram um modelo consistente do sistema de lodo ativado no qual se subdivide o lodo volátil em duas frações: (1) o lodo ativo composto de microrganismos vivos, (2) o resíduo endógeno, um resto não biodegradável que permanece após o decaimento das células vivas como resultado da respiração endógena e (3) a fração inerte composta de material particulado não biodegradável que flocula no sistema de tratamento. As últimas duas frações formam o lodo inativo. MARAIS & EKAMA (1976) derivaram as seguintes equações básicas para as frações do lodo volátil.

$$\begin{aligned}mX_a &= (1 - f_{na} - f_{mp}) Y R_a / (1 + b_n R_n) \\mX_o &= (f b_n R_a \cdot mX_a) \\mX_i &= (f_{mp} \cdot R_a / p) \\mX_v &= mX_a + mX_o + mX_i \\&= (1 - f_{na} - f_{mp}) (1 + f b_n R_a) Y R_a / (1 + b_n R_n) + f_{mp} \cdot R_a / p \\mX_{na} &= mX_v - mX_a \\&= (1 - f_{na} - f_{mp}) f b_n R_a^2 Y / (1 + b_n R_n) + f_{mp} \cdot R_a / p\end{aligned}$$

onde:

- f_{na} = fração da DQO afluente que é não biodegradável e solúvel
 f_{np} = fração da DQO afluente que é não biodegradável e particulada
 mX_a = massa de lodo ativo por unidade de massa de DQO aplicada
 mX_o = massa de resíduo endógeno no reator por unidade de massa de DQO aplicada diariamente
 mX_i = massa do lodo inerte no reator por unidade de massa de DQO aplicada diariamente
 mX_v = massa de lodo volátil no reator por unidade de massa de DQO aplicada diariamente
 mX_{na} = massa de lodo inativo no reator por unidade de massa de DQO aplicada diariamente
 f = fração do lodo ativo que após o decaimento permanece como resíduo endógeno
 = 0,2
 Y = coeficiente de rendimento do crescimento de lodo ativo
 = 0,45 mgSVS/mgDQO
 p = razão DQO/SVS
 = 1,5 mgDQO/mgSVS
 b_n = constante de decaimento
 = 0,24 (1,04)^(t-20) = 0,30 d-1 (a 26°C)
 R_a = idade de lodo (d).

As equações acima mostram que as massa de lodo das diferentes frações dependem de vários fatores: (1) os parâmetros de massa de lodo (Y , p e f), que são constantes verdadeiras, (2) a composição das frações não biodegradáveis do material orgânico no afluente (f_{na} e f_{np}), (3) a temperatura (que determina b_n) e (4) a idade de lodo. Na CETREL presentemente as concentrações médias do afluente e do efluente e situam na faixa de 3000 e 1000mg.l⁻¹ respectivamente. No efluente há uma concentração de DQO de 375mg.l⁻¹ devido à presença de lodo sólidos sedimentáveis. Portanto a DQO dissolvida no efluente é de 1000 - 375mg.l⁻¹, de onde se calcula a fração não biodegradável e solúvel do afluente como:

$$f_{na} = 625 / 3000 = 0,21.$$

A concentração de lodo no tanque de aeração (que tem um volume de 74.000 m³) é mantida em torno de 4.000 mg.l⁻¹ de STS de modo que o sistema contém 4 * 74.000 = 296 t STS. Como a produção de lodo é de 30 t.d⁻¹ STS calcula-se a idade de lodo como $R_a = 296/30 = 10$ d.

Uma vez que a fração de lodo volátil é 85 por cento do lodo total, a massa de lodo volátil é de 0,85 * 292 = 252 t STS. Para a carga orgânica atual de 150 t.d⁻¹ de DQO a massa de lodo volátil por unidade de massa de DQO aplicada diariamente se determina como:

$$\begin{aligned} Mx_v &= MX_v/MS_{ta} = 252/150 = 1,68 \text{ mgSVS/mgDQO/d} \\ &= (1 - f_{na} - f_{np}) (1 + fb_n R_a) Y R_a / (1 + b_n R_a) + f_{np} \cdot R_a/p \\ &= (1 - 0,21 - f_{np}) (1 + 0,2 \cdot 0,3 \cdot 10) \cdot 0,45 \cdot 10 / (1 + 0,3 \cdot 10) + f_{np} \cdot 10/1,5 \end{aligned}$$

ou

$$f_{np} = 0,05$$

e

$$\begin{aligned} Mx_a &= (1 - f_{na} - f_{np}) Y R_a / (1 + b_n R_a) \\ &= (1 - 0,21 - 0,05) 0,45 \cdot 10 / (1 + 0,3 \cdot 10) \\ &= 0,83 \end{aligned}$$

Portanto pode-se calcular a fração de lodo ativo como:

$$\begin{aligned} f_a &= Mx_a/Mx_v = 0,83/1,68 \\ &= 0,49 \end{aligned}$$

A partir destes cálculos conclui-se que na CETREL aproximadamente metade do lodo volátil se compõe de microrganismos vivos (lodo ativo), enquanto a outra metade não exibe atividade biológica (lodo inativo).